



LEANDRO LUIS BRITO DA SILVEIRA ALVERNAZ

Licenciado em Ciências de Engenharia do Ambiente

METODOLOGIA PARA O MAPEAMENTO DE CHEIAS
EM ZONAS DE RISCO. APLICADO À BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO TÂMEGA.

MESTRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Universidade NOVA de Lisboa
Março, 2023

METODOLOGIA PARA O MAPEAMENTO DE CHEIAS EM ZONAS DE RISCO. APLICADO À BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TÂMEGA.

LEANDRO LUIS BRITO DA SILVEIRA ALVERNAZ
Licenciado em Ciências de Engenharia do Ambiente

Orientador: Professor Doutor Pedro Manuel Hora Santos Coelho,
Professor Associado, FCT-NOVA

Júri:

Presidente: Professora Doutora Leonor Miranda Monteiro do
Amaral
Professora Associada, FCT-NOVA

Vogais: Professor Doutor Pedro Manuel Hora Santos
Coelho,
Professor Associado, FCT-NOVA

Engenheiro Theo Rangel Correia da Silva
Fernandes,
Assistente Convidado, FCT-NOVA

Orientador: Professor Doutor Pedro Manuel Hora Santos
Coelho,
Professor Associado, FCT-NOVA

MESTRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Universidade NOVA de Lisboa

Março, 2023

Metodologia para o mapeamento de cheias em zonas de risco. Aplicado à bacia hidrográfica do rio Tâmega.

Copyright © Leandro Luís Brito da Silveira Alvernaz, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

"No man ever steps in the same river twice, for it's not the same river and he's not the same man."

Heráclito

Agradecimentos

Tudo começou com uma despedida da minha terra natal, ilha de São Jorge, com a meta de ingressar o curso de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, que agora chega ao seu desfecho com a conclusão desta dissertação. Durante este percurso pude contar com a amizade, apoio e afeto de inúmeras pessoas que em muito me ajudaram ao longo desta etapa da minha formação académica.

Ao meu orientador, Professor Pedro Santos Coelho, pela dedicação, paciência, disponibilidade e ensinamentos, que foram muito para além do dever. Pelas horas em que me acompanhou na execução desta dissertação, pelas críticas e correções que foram absolutamente essenciais para a realização da mesma.

À Professora Teresa Calvão, pela ajuda na utilização dos Sistemas de Informação Geográfica, e por toda a disponibilidade demonstrada para me ajudar.

À minha família, por todo o incentivo e carinho incondicional desde sempre, mas em especial ao longo de todo este percurso académico, à minha Mãe devo um agradecimento especial pelo amor e motivação que desde sempre me ajudaram a progredir.

Aos meus amigos, em especial ao Berni, Renato, Rafa, Garcia, Garcia, Calhau, Graça, Ruivo, David, Sílvia e Pani, pelo incentivo, companheirismo e apoio nesta importante fase da minha vida.

Obrigado e um bem-haja a todos.

Resumo

Atualmente as sociedades enfrentam graves problemas associados aos riscos naturais, desde impactes ambientais, a impactes económicos, sociais e culturais. Deste modo, é extremamente importante estudar e conhecer os fatores condicionantes da sua origem, bem como avaliar e mitigar os seus impactes negativos.

A Diretiva 2007/60/CE, relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações, estabelece que os Estados-Membros, de modo a disporem de um instrumento de informação eficaz, bem como de uma base para estabelecer prioridades e para a tomada de decisões técnicas, financeiras e políticas racionadas com a gestão de riscos de inundações, devem elaborar cartas de zonas inundáveis e cartas de riscos de inundações, indicando as potenciais consequências associadas a diferentes cenários.

Os mapas de inundações são ferramentas de extrema importância, permitindo uma fácil perceção das áreas inundadas e possíveis riscos associados às mesmas.

Este estudo consiste aplicação de modelos hidrológicos e hidráulicos na bacia hidrográfica do rio Tâmega, com incidência na cidade de Amarante, com recurso, também, ao desenvolvimento de uma metodologia para produzir a cartografia de zonas inundáveis do caso de estudo.

Foram utilizados os softwares HEC-HMS e HEC-RAS para simular o escoamento do rio Tâmega e as possíveis zonas inundáveis, respetivamente. Estes modelos, possibilitam a análise de dados topográficos através do MDT (Modelo Digital de Terreno) utilizado, possibilitando o processamento e visualização dos resultados obtidos.

Estes resultados foram posteriormente inseridos no programa ArcGIS, para a elaboração dos mapas de zonas inundáveis para os períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 500 anos. Este processo consiste na primeira etapa para a obtenção de mapas de zonas de risco de inundação, sendo necessário sobrepor estes mapas aos mapas de elementos de risco expostos.

Palavras-chave: Cheias, Modelação, Hidráulica, Hidrologia, Rio Tâmega, HEC-HMS, HEC-RAS.

Abstract

Currently, societies face serious problems associated with natural hazards, from environmental to economic, social and cultural impacts. In this way, it is extremely important to study and know the conditioning factors of its origin, as well as to determine and mitigate its negative impacts.

The directive 2007/60/EC, on the assessment and management of flood risks, establishes that Member States should develop flood zone maps and flood risk maps indicating the potential consequences associated with different flood scenarios, in order to have an effective information tool, as well as a basis for setting priorities and for taking decisions technical, financial and policy rationed with flood risk management

Flood maps, compared to graphs and other forms of flood representation, are extremely important tools, allowing an easy perception of flooded areas and possible risks associated with them.

This study consists of the application of hydrological and hydraulic models in the watershed of the Tâmega river, with an incidence in the city of Amarante, with recourse, also, developing a methodology capable of producing the cartography of flood zones of the case study.

The HEC-HMS and HEC-RAS software will be used to simulate the flow of the Tâmega River. These models enable the analysis of geometric data through the available MDT, enabling the processing and visualization of the results obtained.

These results will be later inserted in the ArcGIS program for the elaboration of maps of flood zones for the return periods of 10, 20, 50, 100 and 500 years. This process consists of the first step in obtaining maps of flood risk zones, for which it is necessary to superimpose these maps on maps of exposed risk elements.

Keywords: Floods, Modeling, Hydraulics, Hydrology, Tâmega River, HEC-HMS, HEC-RAS.

Índice

Resumo	x
Abstract	xi
Índice	xiii
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2. Objetivo da dissertação.....	2
1.3. Estrutura da dissertação	3
2. Revisão da literatura.....	5
2.1. Introdução	5
2.2. Cheias na Europa	6
2.3. Cheias em Portugal.....	7
2.4. Legislação.....	9
2.5. Tipos e causas das cheias	11
2.6. Registo histórico de cheias - caso de Amarante.....	13
2.7. Conceito de risco	16
2.8. Modelos Matemáticos e SIG	19
3. Metodologia.....	21
3.1. Caso de Estudo	21
3.1.1. Geologia	23
3.1.2. Uso do solo	25
3.1.3 Relevos	26
3.1.4. Estações hidrométricas e udométricas	27
3.2. Modelo hidrológico – hidráulico	29
3.2.1. Análise das séries de precipitações máximas diárias anuais	29
3.2.2. Análise das séries de registos hidrométricos	32
3.2.3. Tempo de concentração	33
3.2.4. Relação precipitação/escoamento	35

3.2.5. Caracterização da bacia hidrográfica do rio Tâmega. (ArcGIS e HEC-HMS)	43
3.2.6. Simulação hidrológica (HEC-HMS).....	45
3.2.7 Simulação hidráulica (HEC-RAS)	48
4. Resultados e discussão	51
4.1. Introdução	51
4.2. Comparação curvas CPU e Curvas IDF.....	54
4.3. Modelação hidrológica	55
4.4. Modelação hidráulica	60
5. Conclusões.....	67
6. Referências bibliográficas.....	69
A1.....	74
PERFIS TRANSVERSAIS DO ESCOAMENTO.....	74
A2.....	95
Mapas de zonas inundáveis	95

Índice de Figuras

Figura 1- Marcas das alturas das cheias de 1939, 1962 e 2001 em Amarante	14
Figura 2- Regiões hidrográficas de Portugal	21
Figura 3- Região Hidrográfica do Rio Douro	22
Figura 4 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Tâmega	22
Figura 5 - Bacia Hidrográfica do Rio Tâmega	23
Figura 6 - Litologia da Bacia Hidrográfica do rio Tâmega.....	24
Figura 7 - Tipo e uso do solo da Bacia Hidrográfica do rio Tâmega	25
Figura 8 – Mapa de relevo da bacia hidrográfica do rio Tâmega.....	26
Figura 9 - Estações Hidrométricas da Bacia hidrográfica do rio Tâmega	27
Figura 10 - Estações Udográficas da Bacia Hidrográfica do rio Tâmega.....	28
Figura 12- Polígonos de Thiessen	32
Figura 13 - Modelo Digital de Terreno com o preenchimento de depressões utilizando o comando Fill Sinks	44
Figura 14 - Direção de escoamento, Algoritmo de Determinístico de 8 direções de fluxo (D8) (Flow Direction)	44
Figura 15- Esquema hidrológico da bacia hidrográfica do rio Tâmega, gerado pelo HEC-HMS.....	56
Figura 16 - Esquema hidrológico da bacia hidrográfica do rio Tâmega, simplificado.	56
Figura 17 – Hidrograma de Cheia para o período de retorno de 10 anos.....	58
Figura 18- Hidrograma de Cheia para o período de retorno de 20 anos.	58
Figura 19 - Hidrograma de Cheia para o período de retorno de 50 anos	59
Figura 20 - Hidrograma de Cheia para o período de retorno de 100 anos ...	59
Figura 21 - Hidrograma de Cheia para o período de retorno de 500 anos ...	60
Figura 22- Troço do rio Tâmega selecionado para análise hidráulica, HEC-RAS	61
Figura 23- Geometria do troço selecionado, HEC-RAS.....	61
Figura 24 - Área inundada para um período de retorno de 10 anos.	62

Figura 25 - Área inundada para um período de retorno de 20 anos.	63
Figura 26 - Área inundada para um período de retorno de 50 anos.	63
Figura 27 - Área inundada para um período de retorno de 100 anos.	64
Figura 28 - Área inundada para um período de retorno de 500 anos.	64
Figura 29 – Carta de zonas inundáveis para um período de retorno de 10 anos.	

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Desastres Naturais com maior número de mortes, pessoas afetadas e prejuízos económicos em Portugal (1900-2019)	8
Tabela 2 - Eventos de cheia em Amarante (adaptado de jornais locais)	14
Tabela 3 - Classificação de Consequências em função do Risco Hidrodinâmica	18
Tabela 4 - Nível de Risco Hidrodinâmico para a população e edificações ...	18
Tabela 5 - Informação Geográfica utilizada para a caracterização da bacia hidrográfica do rio Tâmega.....	20
Tabela 6- Características das estações hidrométricas usadas.....	28
Tabela 7 - Características das estações udográficas usadas.....	28
Tabela 8- Parâmetros estatísticos da precipitação diária máxima anual	30
Tabela 9 - Precipitação extrema para um período de retorno de 10, 20, 50 100 e 500 anos	31
Tabela 10- Precipitação diária máxima da bacia hidrográfica do Tâmega recorrendo ao método dos Polígonos de Thiessen.....	32
Tabela 11 - Tempo de concentração (horas)	34
Tabela 12- Caracterização dos solos (Adaptado de: Lencastre e franco 2010)	35
Tabela 13 – Números de escoamento AMC-II (Adaptado de Lencastre e Franco 2010)	36
Tabela 14- Valores de CN para AMC-I e AMC-III em função de AMC-II	37
Tabela 15- Coeficiente de Escoamento para vários tipos de ocupação do solo.	40
Tabela 16- Características da Bacia Hidrográfica do rio Tâmega.....	51
Tabela 17- Tempo de concentração (tc) da Bacia hidrográfica do rio Tâmega	51
Tabela 18- Precipitação diária máxima anula para diferentes períodos de retorno recorrendo à Lei de Gumbel para as várias estações udográficas	52
Tabela 19- Precipitação diária máxima anual ponderada para a bacia hidrográfica do rio Tâmega.....	52

Tabela 20- Caudal de ponta de cheia para a Bacia Hidrográfica do rio Tâmega.

52

Tabela 21- Precipitação diária máxima anula para diferentes períodos de retorno recorrendo à Lei de Gumbel para as várias estações udográficas 53

Tabela 22 - Caudal de ponta de cheia pelo método racional e pelo método do Soil Concervation Servisse, para ambas as curvas 54

Tabela 23- Caudal de ponta de cheia para a área de influência da estação de Chaves, pelo método do Soil Concervation Servisse. 55

Tabela 24- Caudal de ponta de cheia para os períodos de retorno de 10, 20, 50, 100, 500 anos para a bacia hidrográfica do rio Tâmega.....56

Tabela 25 - valores das condições de escoamento para todas as secções do modelo. HEC-RAS 57

Abreviaturas

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

AMC – Antecedent Moisture Conditions

CN – Curve Number

HEC-HMS - Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System

HEC-RAS - Hydrologic Engineering Center - River Analysis System

EM-DAT – The International Disaster Database

ARH - Administração de Região Hidrográfica

INAG – Instituto da Água

ISDR - International Strategy for Disaster Reduction

DQA - Diretiva Quadro de Água

CNGRI – Comissão Nacional da Gestão de Riscos de Inundação

ANPC – Autoridade Nacional de Proteção Civil

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Atualmente as sociedades enfrentam graves problemas associados aos riscos naturais, desde impactes ambientais, a impactes económicos, sociais e culturais. Deste modo, é extremamente importante estudar e conhecer os fatores condicionantes da sua origem, bem como determinar e mitigar os seus impactes negativos.

Os eventos extremos têm vindo a tornar-se cada vez mais frequentes. O crescimento urbano e o impacte das alterações climáticas, relativamente aos fenómenos de precipitação e temperatura tem vindo a contribuir para este aumento de frequência (Corrêa, 2013).

Devido ao incremento de eventos extremos de cheia, este tema tem vindo a ser imensamente debatido dentro da comunidade científica, os eventos de cheia, nomeadamente cheias fluviais, são dos desastres mais frequentes e que mais danos determinam a nível económico à escala mundial (IPCC 2012).

A maioria dos problemas a nível ambiental que as sociedades enfrentam atualmente, verificam-se há décadas. No entanto, a sua avaliação tem diferido ao longo do tempo, tanto em termos de perceções das suas possíveis causas, bem como quanto aos seus efeitos.

Desde os tempos mais antigos, o Homem sempre se estabeleceu em áreas propensas a cheias devido às condições geográficas favoráveis que facilitaram o crescimento económico, como acessibilidade (transporte) e produção de alimentos (terras férteis). Assim sendo, as sociedades em todo o mundo desenvolveram meios para se protegerem contra as cheias. No entanto, estas ainda são o desastre natural que mais danos determina (Douben, 2006).

As cheias, dada a sua natureza, são o resultado de vários fatores, principalmente meteorológicos. De modo a contribuir para o controlo dos efeitos das cheias, é necessário desenvolver, a nível local, regional e nacional, uma adequada gestão dos recursos hídricos. Igualmente, devem ser uniformizadas as regras e procedimentos de defesa para cada bacia hidrográfica (Pires, 2017).

O sucesso da gestão de cheia depende da seleção de várias medidas com base na análise das características físicas e morfológicas da zona de risco, nas condições económicas e sociais da região, dos condicionamentos políticos e ambientais e, por último, na existência ou planeamento de obras de controlo de cheia (Pires, 2017).

Durantes as últimas décadas verificou-se um acréscimo no desenvolvimento de medidas de redução e mitigação de eventos de cheia, bem como da conscientização da população para as consequências das mesmas. É necessário que este desenvolvimento seja ajustável e que contemple a transição de estratégias de defesa existentes, tanto a nível nacional como europeu.

Deste modo, foi adotada, pela União Europeia, a Diretiva 2007/60/CE referente à avaliação de riscos de inundações, obrigando à elaboração de planos de gestão de risco de inundações bem como à realização de mapas de zonas inundáveis e de mapas de risco de inundações. Estes, comparados a gráficos e outras formas de representação de cheia, permitem uma fácil perceção das áreas inundadas e possíveis riscos associados.

1.2. Objetivo da dissertação

O objetivo da presente dissertação consiste na aplicação de modelos hidrológicos e hidráulicos na bacia hidrográfica do rio Tâmega, com incidência na zona da cidade de Amarante, com recurso, também, à utilização de um sistema de informação geográfica, desenvolvendo uma metodologia com capacidade para produzir a cartografia das zonas inundáveis.

Trata-se, por isso, de um trabalho de investigação aplicada, com o qual se pretende contribuir para o conhecimento relativamente à produção de cartografia de zonas inundáveis. Será desenvolvida uma revisão bibliográfica sobre o tema da Dissertação, bem como a recolha exaustiva dos dados disponíveis necessários ao seu desenvolvimento.

Serão utilizados os modelos HEC-HMS e HEC-RAS, para simular o escoamento no rio Tâmega, face a diferentes cenários. Estes modelos, possibilitam a análise de dados topográficos através do MDT utilizado, possibilitando o processamento e visualização dos resultados obtidos.

Pretende-se que a metodologia a desenvolver sirva de suporte no caso de estudo da bacia hidrográfica do rio Tâmega, e que seja igualmente aplicável a outras situações, desde que se disponha dos dados necessários ao funcionamento dos modelos a utilizar e à definição das condições de fronteira dos mesmos.

1.3. Estrutura da dissertação

O Capítulo 1 pretende enquadrar o tema desta dissertação, bem como descrever os objetivos de estudo e a estrutura do documento.

O Capítulo 2 faz uma síntese da problemática das cheias começando por um panorama europeu até ao caso de estudo, cidade de Amarante, suportada por dados históricos. Igualmente faz a referência ao conceito de risco bem como aos modelos matemáticos utilizados nesta dissertação.

O Capítulo 3 diz respeito à metodologia apresentada, sendo o Capítulo mais extenso da dissertação. Começa-se por analisar as condições geomorfológicas da bacia hidrográfica em estudo, passando para a caracterização hidrológica e hidráulica da mesma recorrendo aos softwares HEC-HMS e HEC-RAS.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos por ambas as simulações, dando ênfase às cartas de zonas inundáveis.

Por último, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do presente estudo.

2. Revisão da literatura

2.2. Introdução

Na literatura, não existe uniformidade relativamente ao conceito de cheias, existindo várias definições para estes eventos, consoante a perspetiva do autor e o objetivo. No entanto, de um modo geral, os autores definem este evento como uma subida do nível de água, quer seja de origem fluvial ou marítima, que ultrapasse o seu limite natural ou artificial, submergindo uma área que usualmente se encontra emersa. (Ramos, 2009)

Assim sendo, as cheias são fenómenos naturais extremos e temporários, maioritariamente gerados por intensas precipitações (Zêzere, 2006). Como consequência, estas precipitações provocam um aumento do caudal fluvial, levando ao transbordo dos rios do seu leito menor e a inundações nas áreas do leito maior.

As cheias e inundações são vistas, por vários autores da área das ciências sociais, como dois termos distintos, afirmando que todas as cheias provocam inundações, mas nem todas as inundações são devidas às cheias (Ramos, 2009).

Estas definições têm por base a perda de território permanentemente, função do galgamento oceânico. No entanto, de um ponto de vista hidrológico os termos cheia e inundação podem ser entendidos como sinónimos (Corrêa, 2013).

Lencastre e Franco (2006) definem que uma situação de cheia, do ponto de vista estritamente hidrológico, ocorre quando a precipitação origina escoamento superficial direto e este se traduz na formação de um hidrograma de cheia. Igualmente de acordo com Lencastre e Franco (2006): “As cheias são fenómenos perfeitamente naturais, decorrentes do carácter aleatório dos processos hidrológicos, cujo conhecimento interessa aprofundar para se minimizarem os riscos delas decorrentes “.

A precipitação que não é intercetada pela vegetação ou por outros obstáculos, atinge a superfície terrestre, de onde se evapora, se infiltra, ou permanece retida em depressões. O escoamento superficial, dá-se quando, a precipitação caída é superior às capacidades relativas dos processos anteriormente descritos. O volume de água excedente, obedecendo às leis da gravidade, escoar à superfície até à linha de água mais próxima (Lencastre e Franco, 2006).

Nos casos em que a precipitação for particularmente intensa ou prolongada, ou ambas, o escoamento superficial poderá exceder a capacidade de vazão das linhas de

água e transbordar do seu leito habitual, dando origem às cheias (Lencastre e Franco, 2006).

Como visto anteriormente, a precipitação extrema é o principal fator desencadeante das cheias. Por outro lado, existem outros fatores que podem agravar as consequências destes eventos. As características físicas das bacias hidrográficas como a densidade da rede de drenagem, o relevo e a ocupação e tipo de solo têm impacto direto nos tempos de concentração das bacias hidrográficas e na velocidade de escoamento (Corrêa, 2013).

A impermeabilização do solo em áreas de risco de inundação, contribui para o acréscimo dos efeitos negativos relacionados com as cheias (Cunha, 2017).

2.3. Cheias na Europa

Os danos mundiais causados pelas inundações têm sido extremamente graves nas últimas décadas. Correspondem ao evento hidrometeorológico que custou mais vidas humanas e que gerou maiores perdas económicas (Schanze, 2006). Um terço dos desastres naturais anuais e consequentes perdas económicas, bem como mais de metade de todas as vítimas registadas estão relacionadas com as inundações (Douben, 2006). Dos mais de 7.000 desastres naturais ocorridos nas últimas décadas, aproximadamente três quartos estiveram relacionados com a água (Schanze, 2006).

Os impactes no solo provenientes do desenvolvimento social e económico, têm aumentado o potencial de danos provocados por inundações. Em consequência, as falhas na defesa contra inundações a nível internacional tendem a ser frequentes. Este pode ser um indicador de que os extremos climáticos estão a aumentar em frequência e gravidade por meio dos impactes das mudanças globais (Schanze, 2006).

Em épocas de seca há uma tendência política natural para reduzir gastos relativamente aos meios de defesas contra inundações, em favor de outros objetivos, levando eventualmente ao aumento do risco de falhas (Bronstert, 1999).

No contexto europeu, as inundações representam uma ameaça constante. Na Holanda mais da metade da população vive abaixo do nível médio do mar, cerca de um quarto da população da Hungria vive na planície de inundação do Danúbio e seus afluentes. Embora as inundações sejam a causa da maior perda de vidas do continente

européu nas últimas décadas, continuam a ser o perigo natural mais frequente na Europa (Schanze, 2006).

2.4. Cheias em Portugal

A comunidade científica tem vindo a debater o impacto negativo das alterações climáticas nas catástrofes naturais. Vários autores defendem que a frequência, intensidade e magnitude das cheias tem aumentado globalmente, em consequência do efeito das alterações climáticas (EEA, 2017).

O Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC) de 2007 prevê para a Península Ibérica, um aumento de 6°C na temperatura média no Verão até 2070. Não obstante, o mesmo painel prevê um aumento de precipitações intensas em toda a Europa. Os impactos destes fenómenos extremos dependem da exposição e vulnerabilidade da população e dos sistemas naturais (IPCC 2012).

Dada a sua posição geográfica, geomorfologia e clima característicos, Portugal continental tem sido alvo de diversos eventos de cheia ao longo do tempo. Estes eventos causam diversos efeitos devastadores por todo o território levando a impactos económicos e sociais significativos.

Segundo Ramos (2001), no século XX, em Portugal continental, as cheias foram o desastre natural mais mortífero, seguidas pelos sismos, indicando que por cada morte devida aos sismos morreram sete pessoas devido às cheias.

Ao longo da sua história, Portugal assistiu a grandes cheias e inundações, especialmente no Norte onde devido à existência de zonas montanhosas os vales onde correm os cursos de água são abruptos, pelo que as inundações têm ocorrências localizadas (Prociv. 2011). O rio Douro origina, nalguns troços, grandes cheias cíclicas, com elevado impacto socioeconómico nas zonas ribeirinhas. Localidades como o Porto, Vila Nova de Gaia e Peso da Régua, nas margens do rio Douro, bem como Chaves e Amarante, no rio Tâmega, são frequentemente assoladas por cheias (Prociv. 2011).

Um levantamento documental efetuado por Quaresma (2008), possibilitou o registo de 1.018 eventos de origem hidrológica e geomorfológica com carácter danoso no período 1900-2006, equivalente a uma média de 10 ocorrências por ano. O tipo de

evento mais frequente no período em análise foram as cheias, com cerca de 82% dos casos contabilizados.

O The International Disaster Database (EM-DAT) constitui uma base de dados internacional sobre desastres naturais desde 1900 até ao presente. Tem como objetivo promover uma base para a avaliação da vulnerabilidade a desastres naturais e tecnológicos auxiliando no estabelecimento de normas prioritárias.

Para serem compreendidos nestes registos, os desastres, necessitam de cumprir pelo menos um dos seguintes critérios: registo de 10 ou mais mortes, 100 ou mais pessoas afetadas, declaração do estado de emergência e pedido de ajuda internacional. Para Portugal, estes critérios restringem diversos eventos (Zêzere, 2014).

Os dados registados no EM-DAT, entre 1900 e 2019, correspondem aos desastres naturais mais danosos em Portugal, tendo em conta os critérios acima mencionados, e são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Desastres Naturais com maior número de mortes, pessoas afetadas e prejuízos económicos em Portugal (1900-2019) (Fonte: https://www.emdat.be/emdat_db/)

Data (ano/mês)	Desastre Natural	Nº Mortes	Nº Afetados	Danos (\$)
1941/02	Tempestade	120	x	40.000
1966/09	Incêndios	25	x	x
1967/11	Cheias	462	1100	3.000
1973/01	Tempestade	11	x	x
1979/01	Cheias	19	20220	30.000
1979/02	Cheias	4	25000	2.100
1981/12	Cheias	30	900	x
1983/09	Incêndios	x	x	x
1983/11	Cheias	19	2000	95.000
1985/09	Incêndios	14	x	95.000
1986/06	Incêndios	15	50	x
1996/01	Cheias	10	1050	13.000
1996/12	Cheias	x	2000	x
1997/10	Tempestade	29	200	25.000
2000/12	Tempestade	4	70	x
2001/01	Cheias	6	200	x
2002/12	Cheias	1	60	x
2003/08	Temp. Extremas	2696	x	x
2003/08	Incêndios	14	150000	1.730.000
2003/01	Cheias	x	36	x
2005/06	Temp. Extremas	462	x	x
2005/05	Incêndios	15	136	1.650.000
Data	Desastre Natural	Nº Mortes	Nº Afetados	Danos (\$)

2006/07	Temp. Extremas	41	x	x
2006/10	Cheias	x	240	x
2008/02	Cheias	2	110	x
2010/02	Cheias	43	618	1.350.000
2010/02	Tempestade	3	x	270.000
2013/01	Tempestade	1	3967	x
2014/01	Tempestade	x	54	x
2015/11	Cheias	1	x	x
2016/08	Incêndios	4	1361	157.000
2017/06	Incêndios	64	704	232.000
2017/10	Incêndios	45	2771	500.000
2018/08	Incêndios	x	329	x
2018/10	Tempestade	2	88	115.500
2019/12	Tempestade	2	x	x

Após análise da Tabela 1, verifica-se que os incêndios são o desastre com o maior registo de danos e número de pessoas afetadas. O maior número de mortes em Portugal é devido as temperaturas extremas, seguidas pelas cheias. No entanto, as cheias são o evento que ocorre com mais frequência. A maior cheia registada em Portugal, até ao momento, foi a cheia de fevereiro de 1979, na Bacia hidrográfica do rio Tejo, sendo o segundo desastre com mais pessoas afetadas.

2.5. Legislação

Em 2007 foi publicada a Diretiva 2007/60/CE relativa a Avaliação e Gestão do Risco de Inundações. O Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de outubro transpõe essa Diretiva para a legislação nacional. Este Decreto-Lei veio complementar a Lei n.º 58/2005 (Lei da Água), que transpõe a Diretiva Quadro de Água (DQA) (Diretiva 2000/60/CE) para a legislação nacional, que constitui um instrumento de grande importância para a gestão da água e estabelece um quadro estratégico para a proteção e gestão sustentável das águas dos países membros da União Europeia.

A Diretiva 2007/60/CE, relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações, estabelece que os Estados-Membros, de modo a disporem de um instrumento de informação eficaz, bem como de uma base para estabelecer prioridades e para a tomada de decisões técnicas, financeiras e políticas relacionadas com a gestão de riscos de inundações, devem elaborar cartas de zonas inundáveis e cartas de riscos de

inundações, indicando as potenciais consequências associadas a diferentes cenários de inundação.

De acordo com a Diretiva 2007/60/CE, inundação consiste na cobertura temporária por água de uma terra normalmente emersa. Inclui as cheias ocasionadas pelos rios, pelos cursos de água efémeros mediterrânicos, pela subida do mar nas zonas costeiras, e pode excluir as inundações com origem em redes de drenagem de águas pluviais. O risco de inundação corresponde à combinação da probabilidade e consequência para a saúde humana, o ambiente, o património cultural e as atividades económicas.

Foram elaborados sete planos de gestão dos riscos de inundações, associados a sete regiões hidrográficas (Minho e Lima; Cávado, Ave e Leça; Douro; Vouga, Mondego e Lis; Tejo e Ribeiras do Oeste; Sado e Mira, e Ribeiras do Algarve). Através destes planos foi possível identificar 22 zonas críticas de risco de inundação. Os critérios para esta identificação foram, o registo de, no mínimo, quinze pessoas afetadas e pelo menos uma pessoa morta ou desaparecida (APA, 2015).

Sendo o foco desta dissertação as cheias no rio Tâmega, através da análise dos PGRI é possível verificar que o rio Tâmega possui uma zona crítica de inundação, a cidade de Chaves (APA, 2015).

Os planos de gestão dos riscos de inundações devem incorporar os seguintes elementos:

- Avaliação preliminar do risco de inundações: Avaliar o nível de risco de cheia para cada bacia hidrográfica e selecionar as áreas com potencial risco.
- Cartas de riscos de inundações e cartas de zonas inundáveis: Elaboração de cartas de zonas inundáveis e cartas de risco de inundações, por região hidrográfica, por parte dos Estados-Membros, identificando cenários de probabilidade de inundação fraca, média ou elevada e potenciais impactes negativos.
- Planos de gestão dos riscos de inundações: Elaboração de planos de gestão de riscos de inundações, para cada região hidrográfica, devendo haver cooperação entre os Estados-Membros no caso de existirem bacias hidrográficas partilhadas.

A DQA tem, também, o objetivo de contribuir para a mitigação dos efeitos das cheias. Assim, tanto a elaboração de planos de gestão de bacias hidrográficas como de

planos de gestão dos riscos de inundações, no âmbito da Diretiva 2007/60/CE, constituem elementos de uma gestão integrada da água.

O Projeto DISASTER surge no sentido de contribuir para uma melhor gestão dos riscos naturais em Portugal continental. Corresponde ao desenvolvimento de uma base de dados, entre 1865 e 2010, sobre desastres geomorfológicos (deslizamentos) e hidrológicos (cheias), de forma a potenciar uma base fidedigna para os processos de avaliação de riscos e a aplicação de medidas de proteção e redução dos efeitos deste tipo de desastres. Dada a sua facilidade de análise relativamente à distribuição espacial dos eventos em questão, à avaliação a suscetibilidade dos territórios e da vulnerabilidade dos elementos em risco, tornou-se num instrumento de grande importância para a avaliação e gestão do risco, tornando-se essencial para a tomada de decisão relativamente ao planeamento de emergência (Martins, 2017).

Analisando os resultados do projeto DISASTER, registaram-se 1622 ocorrências de cheias, provocando 1071 vítimas mortais e 40283 desalojados, entre 1865 e 2010, em Portugal continental.

Sendo o objetivo principal desta dissertação a modelação hidráulica e hidrológica de áreas potencialmente inundáveis, através da simulação de possíveis cenários de cheia, esta possibilita um suporte ao adequado ordenamento de território bem como proporciona uma redução das repercussões negativas destes eventos na população.

Martins (2017), refere a notoriedade com que, após a implementação da Diretiva 2007/60/CE surgiram imensos estudos relativos aos fenómenos das cheias. Igualmente, contribuindo para o aumento, rigor e qualidade destes estudos, existem vários softwares, constantemente em atualização, como exemplo, Mike, Iber, SMS - Surface-Water Modeling System e HEC-RAS, entre outros.

2.6. Tipos e causas das cheias

As cheias que serão tratadas ao longo desta dissertação, são o resultado do ultrapassar das capacidades relativas dos processos anteriormente referidos aquando

de um evento de precipitações extrema. No entanto, existem vários tipos de inundações, todas provenientes de causas diferentes.

De acordo com o Decreto-Lei n.º 115/2010, Inundação e Risco de inundação são definidos da seguinte forma:

Inundação – “cobertura temporária por água de uma terra fora do leito normal, resultante de cheias provocadas por fenómenos naturais como a precipitação, incremento do caudal dos rios, torrentes de montanha e cursos de água efémeros correspondendo estas a cheias fluviais, ou de sobrelevação do nível do mar nas zonas costeiras” (D.L. nº 115/2010).

Risco de Inundação - “combinação da probabilidade de inundações e das suas potenciais consequências prejudiciais para a saúde humana, o ambiente, o património cultural e as atividades económicas” (D.L. nº 115/2010).

É necessário adquirir um maior conhecimento sobre estes fenómenos, possibilitando uma redução dos seus possíveis riscos, assim sendo é necessária uma classificação dos diferentes tipos de inundações, e suas causas (Moreira, P. 2016).

Qualquer classificação de inundações é sempre um pouco arbitrária, existindo alguma concordância entre os autores (EEA 2012c):

- Cheias fluviais: São principalmente, o efeito de precipitação extrema, ou interrupta, degelo ou acomodação de detritos que bloqueiam o escoamento do rio. Ocorrem quando o nível da água aumenta, galgando áreas normalmente secas.

- Cheias rápidas: São o efeito de eventos de precipitação intensos e localizados. A impermeabilização dos solos e a reduzida capacidade de drenagem dos sistemas de drenagem, aumentam a gravidade do impacto destas cheias em ambientes urbanos. São cheias difíceis de prever devido à imprecisão associada aos padrões de precipitação local e à sua curta duração.

- Cheias costeiras: Ocorrem quando o nível médio do mar aumenta, galgando a costa devido ao aumento de ondulação causada por tempestades. São cheias de difícil previsão, requerendo a utilização de modelos para mitigar possíveis riscos.

- Cheias do lençol freático: São o efeito da emergência, excessiva, de águas subterrâneas muito próximas da superfície num determinado local ou ao longo de todo o seu trajeto. Têm várias causas dependendo da localização do lençol freático, podendo ser devido a eventos de precipitação persistentes ou o aumento do nível do mar. São

possíveis de prever caso existam dados relativos ao fluxo de águas subterrâneas, embora sejam pouco comuns.

- Cheias devidas a falhas nas barragens: Estas ocorrem principalmente devido ao erro humano. Este tipo de cheias, devido ao perigo associado ao arrastamento de material de construção da barragem, acarretam um elevado potencial devastador. Este tipo de cheias é de difícil previsão.

Segundo Corrêa (2013), os primeiros três tipos de cheias apresentados ocorrem, com maior frequência, em quase todo o continente europeu. Devido à sua topografia e padrões de precipitação, as zonas altas do mediterrâneo e zonas montanhosas são mais propícias ao risco de cheias rápidas. Igualmente para as zonas urbanas, onde a impermeabilização do solo leva ao aumento da velocidade e volume de escoamento e, consequentemente, ao aumento do caudal de ponta de cheia.

As cheias rápidas, devido à sua velocidade de formação e propagação e pela sua ocorrência súbita, são consideradas as cheias mais perigosas. Igualmente, o facto de estas começarem inesperadamente, resultando num tempo de reação curto por parte da população afetada, provoca um grande rasto de destruição. São vários os fatores que contribuem para este tipo de cheias, nomeadamente a impermeabilização dos solos em meio urbano, topografia, declive da bacia, a intensidade e duração da precipitação (EEA, 2010).

Sendo o caso de estudo a bacia hidrográfica do rio Tâmega, sendo um rio que desagua no rio Douro, ou seja, não tem qualquer ligação direta ao mar, serão apenas examinadas as cheias fluviais. Sendo que estas podem ocorrer de cheias rápidas ou de cheias progressivas. A distinção destas cheias depende do tempo de resposta da bacia hidrográfica.

2.7. Registo histórico de cheias - caso de Amarante

Já sendo uma realidade há várias décadas, as cheias na cidade de Amarante têm sido alvo de vários trabalhos, no intuito de prever e mitigar os seus impactes. Dadas as características morfológicas do sítio do burgo de Amarante e da passagem do rio Tâmega pelo seu centro histórico, são numerosos os episódios ligados às cheias (Pedrosa, 1999).

Através do projeto DISASTER, foram analisados os eventos de cheia registados na cidade de Amarante, entre 1865 e 2019. No entanto, apenas se registaram duas ocorrências de cheias, uma a 5 de janeiro de 2001, afetando 10 pessoas, e outra a 26

de janeiro de 2010, afetando 90 pessoas. Estes resultados devem-se aos critérios seguidos pelos autores para a identificação destas ocorrências, bem como aos critérios definidos para alimentar as bases de dados e às notícias publicadas na imprensa utilizadas para esta seleção.

Gomes (2004), refere que, na cheia de 21 de março de 2001, o caudal do rio Tâmega atingiu o pico máximo de quase 2600 m³/s, valor que ultrapassa o atingido em 1962, que se situou nos 1961 m³/s. Os impactes sentidos na área inundada foram de grande intensidade, ao longo do canal principal do rio Tâmega. Na Figura 1 estão marcadas as cotas das maiores cheias registadas na cidade de Amarante.



Figura 1- Marcas das alturas das cheias de 1939, 1962 e 2001 em Amarante

Pedrosa, (1999). Fizeram um levantamento dos eventos de cheia, relativamente aos quais existem registos hidrométricos, recorrendo às notícias da imprensa local, identificando a data e a área afetada (Tabela 2).

Tabela 2 - Eventos de cheia em Amarante (adaptado de jornais locais) Fonte: Pedrosa (1999).

Data	Área afetada	Descrição da Notícia
11/1960	Parte baixa da cidade	"Chuvas torrenciais... Navegou-se na Rua 31 de Janeiro até quase à Ponte de S. Gonçalo... o rio tentou por 3 vezes invadir este local"
01/1961	x	"Chuva há 4 meses"

Data	Área afetada	Descrição da Notícia
04/1962	Parte baixa da cidade	"Chuva continua... Inundação que obrigou a fazer o trajeto da parte alta para a baixa por meio de barcos... As águas do rio atingiram as pedras angulares dos 3 arcos da Ponte S. Gonçalo... Caudais Superior a 2000 m3/s"
01/1963	Parte baixa da cidade	"Chuvas fazem crescer o rio até às lojas destinadas aos arrumos"
01/1966 e 02/1966	Largo Conselheiro António Cândido	"Chuvas contantes... O rio atingia uma elevada altitude, galgando as oficinas e inundando o Largo Conselheiro António Cândido"
03/1969	Rua 31 de janeiro e Av. Beira-Rio	"Chuvas diluviais constantes... Galgou a Avenida Beira-Rio e obrigou a fazer a passagem em parte da Rua 31 de Janeiro de Barco... O rio Tâmega baixou lentamente ao seu leito normal"
02/1972	x	"O Tâmega andou nas ruas"
03/1978 e 12/1978	Rua 31 de janeiro e Largo Conselheiro	" 3 cheias quase seguidas com prejuízos materiais... Inundação de todas as casas da parte baixa da cidade... Lago no Largo Conselheiro criado pela subida das águas através dos escotos... O rio subiu cerca de 7 metros"
01/1979	Parte baixa da cidade	" Cerca das 14 horas, a PSP foi alertada por Mondim de Basto que o Tâmega está a sofrer uma forte cheia. Por volta das 15h, as águas começaram a subir à medida de um metro por hora, atingindo o nível da cheia de abril de 62. Eram cerca de 22 horas quando o Tâmega começou a baixar lentamente"
01/1982	Largo Conselheiro António Cândido	"Faltava apenas um palmo para o Tâmega Invadir o Largo Concelheiro"
10/1987	Praias fluviais	"A água cobriu a Praia Aurora e até meio das árvores de Praia de Areal"
12/1992	Toda a cidade	"Forte queda de água... Grandes inundações provocadas pelo transbordamento através das condutas dos esgotos em consequência do rápido aumento do caudal do Tâmega"
12/1995 e 01/1996	Parte baixa da cidade	"Inverno Chuvoso... Temporal com uma hora de chuvas torrenciais continuas... O rio ameaçou o Largo Concelheiro e a Rua 31 de Janeiro, tendo invadido o jardim Amadeu Sousa Cardoso. A ribeira de São Lázaro galgou as margens"
03/2001	Toda a cidade	"Subida do Rio Mais 10 metros, derrocadas de muros e de terras, estabelecimentos comerciais completamente destruídos e sujos de lama, bombas de gasolina arrancadas, Ínsua dos Frades ficou submersa"

2.8. Conceito de risco

De acordo, com o relatório da International Strategy for Disaster Reduction (ISDR, 2004) o risco pode ser definido como a probabilidade de consequências prejudiciais, ou perdas esperadas, resultante de um determinado perigo para determinados elementos durante um período especificado.

Os fenómenos extremos nem sempre são sinónimo de risco para as populações. São considerados riscos apenas quando a população é afetada, quer pela perda de vidas, bens e/ou interrupção das suas atividades económicas, dependendo igualmente da capacidade de mitigação da população (ISDR, 2004). Tendo como exemplo uma inundação de elevada magnitude a ocorrer numa zona desabitada entende-se que as consequências poderão ser nulas. No entanto, se uma inundação semelhante ocorrer numa zona habitada, a diferença entre dimensão das consequências esta na organização, medidas de defesa e planos de gestão dos riscos.

As cheias são um fenómeno hidrológico impossível de evitar, potencialmente perigosas, dependendo da sua magnitude, velocidade e frequência com que ocorrem. No entanto, estes fenómenos só provocam situações de risco no caso de existirem elementos expostos, (população, infraestruturas, etc.) em áreas inundáveis, podendo ser gravemente danificados ou destruído (Ramos, 2013).

Como referido no subcapítulo anterior, de acordo com o Decreto-Lei n.º 115/2010, que transpõe para a ordem jurídica interna a diretiva 2007/60/CE, o risco de cheia é "(...) a combinação da probabilidade de inundações, tendo em conta a sua magnitude, e das suas potenciais consequências prejudiciais para a saúde humana, o ambiente, o património cultural, as infraestruturas e as atividades económicas, sendo as suas consequências prejudiciais avaliadas através da identificação do número e tipo de atividade afetada, podendo por vezes ser apoiada numa análise quantitativa".

Conforme o caso de estudo e/ou os autores, a metodologia para a determinação do grau de risco comporta algumas variações. Do ponto de vista das ciências sociais, Julião (2009) define matematicamente o risco através da expressão:

$$\text{Risco} = \text{Probabilidade} \times \text{Consequência}$$

$$\text{Sendo, Consequência} = \text{Vulnerabilidade} \times \text{Valor}$$

A probabilidade, como o nome indica, é a hipótese de se fazer sentir, em determinada zona, um determinado evento de cheia com uma determinada magnitude associada em determinado espaço de tempo. A consequência sucede da identificação e classificação dos potenciais danos para a saúde humana, ambiente, património e atividades económicas. É o resultado do produto da vulnerabilidade, o grau de perda dos elementos expostos, e do valor ou exposição dos mesmos (Julião, 2009). Nesta definição é posta em realce a incerteza relativamente a valores, o que corresponde a uma apreciação social.

Segundo Viseu (2006), “Do ponto de vista técnico, e no âmbito das ciências da natureza, o conceito do risco pode ser definido como o valor expectável de perdas ou danos decorrentes de um acontecimento em determinado período. Esta é a definição que se aplica na engenharia a qual envolve probabilidades de ocorrência e perdas associadas.”

Vários autores adotam o resultado composto pela velocidade de escoamento (V) e pelo produto da altura da água (h) como um dos mais proveitosos para representar o grau de perigo, associado a uma cheia

De acordo com Viseu (2006), o Risco Hidrodinâmico (RH), dado em m^2/s , é a ameaça provocada pelo produto dos fatores anteriormente referidos, representado pela seguinte expressão:

$$RH = h \times V$$

Onde:

RH -Risco Hidrodinâmico (m^2/s);

h – Altura da lâmina de água (m);

V – Velocidade de escoamento (m/s).

Synalven (2000), realizou várias simulações com pessoas e modelos físicos de edificações com o objetivo de classificar o risco hidrodinâmico de uma inundação em função do nível de consequência, estes resultados estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação de consequências em função do risco hidrodinâmico. Fonte: Adaptado de Synalven (2000)

Risco Hidrodinâmico (m^2/s)	Consequências
< 0,5	Crianças são arrastadas
0,5 a 1	Adultos são arrastados
1 a 3	Danos e submersão das edificações
3 a 7	Possível colapso das edificações
> 7	Colapso de algumas edificações

Viseu (2006), propõe uma classificação para o risco hidrodinâmico, categorizando o mesmo em níveis, de reduzido a muito importante, diferenciando o RH para a população e edificado conforme se apresenta na Tabela 4.

Tabela 4 - Nível de risco hidrodinâmico para a população e edificações. Fonte: Adaptado de Viseu (2006)

Nível	Classe	RH para a população (m^2/s)	RH para as edificações (m^2/s)
Reduzido	Verde	< 3	< 0,5
Médio	Amarela	3 a 5	0,5 a 0,75
Importante	Laranja	5 a 7	0,75 a 1
Muito importante	Vermelha	> 7	> 1

De acordo com Rodrigues (2003), as cheias são um fenómeno hidrológico que ocorre em magnitudes variáveis, muitas delas devastadoras, sendo certo que estas continuarão a existir no futuro.

2.9. Modelos Matemáticos e SIG

De acordo com, Chow (1988), a elaboração de cartas de zonas inundáveis é o resultado da execução de modelos hidráulicos e hidrológicos. A modelação matemática corresponde à representação matemática, parte da recolha, tratamento e interpretação dos dados de um sistema real, com o objetivo de simular os vários processos e prever ocorrências futuras.

A evolução tecnológica recente, tem vindo a proporcionar a criação de bases de dados e a constante atualização de modelos matemáticos de grande alcance, nomeadamente no que se refere à gestão de recursos hídricos. No entanto, a dificuldade de previsão e identificação por parte do utilizador, dada a complexidade dos modelos numéricos, tornou essencial a criação de softwares de fácil aplicação, facilitando a integração dos modelos e dos seus resultados com SIG. (Corrêa, 2017)

Adicionalmente, a informação cartográfica em formato digital disponível atualmente, possibilita uma maior integração destes sistemas. (Santos, 2006) Deste modo, em 1990 é criado o Sistema Nacional de Informação Geográfica (SNIG) em Portugal e aberto ao público em 1995, possibilitando uma fácil aquisição de dados cartográficos.

Os Sistemas de informação Geográfica (SIG) são acessíveis e fáceis de usar, e existem atualmente várias aplicações de SIG para resolução de problemas de cariz geográfico. Estes sistemas possibilitam o tratamento de dados espaciais, como o tipo e uso do solo, cenários meteorológicos, e informações topográficas, possibilitando a simulação de vários cenários (Oliveira, 2009).

Segundo Santos (2006), a aplicação de modelos hidrológicos associados aos SIG estabeleceu uma evolução quantitativa e qualitativa na caracterização das características hidrológicas, e na tomada de decisão relativamente à gestão dos recursos hídricos e a ocupação do solo.

Tendo em conta esta simbiose, foram selecionados, o software ArcGIS disponível para estudantes gratuitamente e os modelos HEC-HMS (Hydrologic

Engineering Center - Hydrologic Modeling System), e HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System).

O modelo HEC-HMS é projetado para simular os processos hidrológicos de sistemas de bacias hidrográficas dendríticas, incluindo vários procedimentos necessários para simulação (USACE, 2022).

O modelo HEC-RAS permite executar cálculos de fluxo estável unidimensional, fluxo instável unidimensional e bidimensional, cálculos de transporte de sedimentos/leito móvel e modelagem de temperatura/qualidade da água (USACE, 2022).

Partiu-se da informação geográfica representada na Tabela 5 para a caracterização geográfica da bacia hidrográfica do rio Tâmega. Foi adotado um sistema de referência espacial único para todas as layers, com o objetivo de garantir a consistência da informação geográfica (Portugal Continental: PT-TM06/ETRS89).

Tabela 5 - Informação geográfica utilizada para a caracterização da bacia hidrográfica do rio Tâmega

Informação Geográfica	Formato	Resolução	Ano	Sistema de referência	Origem
Carta de Uso e Ocupação do Solo e Portugal Continental 2018 (COS 2018)	Vetorial	1: 25 000	2018	PT-TM06/ETRS89	Dados Abertos Gov.
Carta Administrativa Oficial de Portugal 2016 (CAOP 2016)	Vetorial	1: 25 000	2016	PT-TM06/ETRS89	Dados Abertos Gov.
Rede de estações hidrométricas (SNIRH)	Vetorial	1: 25 000	-	PT-TM06/ETRS89	Dados Abertos Gov.
Rede de Estações meteorológicas (SNIRH)	Vetorial	1: 25 000	-	PT-TM06/ETRS89	Dados Abertos Gov.
Carta Litológica (Atlas do Ambiente)	Vetorial	1: 25 000	-	PT-TM06/ETRS89	Dados Abertos Gov.
Carta das Regiões Hidrográficas de Portugal Continental	Vetorial	1: 25 000	-	PT-TM06/ETRS89	Dados Abertos Gov.
Rede Hidrográfica Geocodificada	Vetorial	1: 25 000	-	PT-TM06/ETRS89	Dados Abertos Gov.
MDT-Modelo Digital de Terreno - 30 m de resolução espacial, obtido pelo Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)	Vetorial	1: 25 000	2020	PT-TM06/ETRS89	U.S. Geological Survey (U.S. Geological Survey, 2020).

3. Metodologia

Os métodos utilizados para o estudo das cheias em bacias hidrográficas e permitem obter previsões probabilísticas com base nos dados fornecidos para um determinado caso de estudo.

Segundo Baldassarre (2012), a modelação hidráulica é o método mais usual para o estudo de cheias e correspondente gestão de áreas inundáveis, esta escolha, por parte de vários autores, decorre da forma eficaz com que esta ferramenta auxilia no ordenamento do território

O presente capítulo será dividido em duas partes, na primeira parte é apresentado o caso de estudo, de seguida serão descritos os modelos utilizados para a modelação hidráulica.

3.1. Caso de Estudo

O Continente Português está dividido em 19 regiões hidrográficas, representadas na Figura 2.

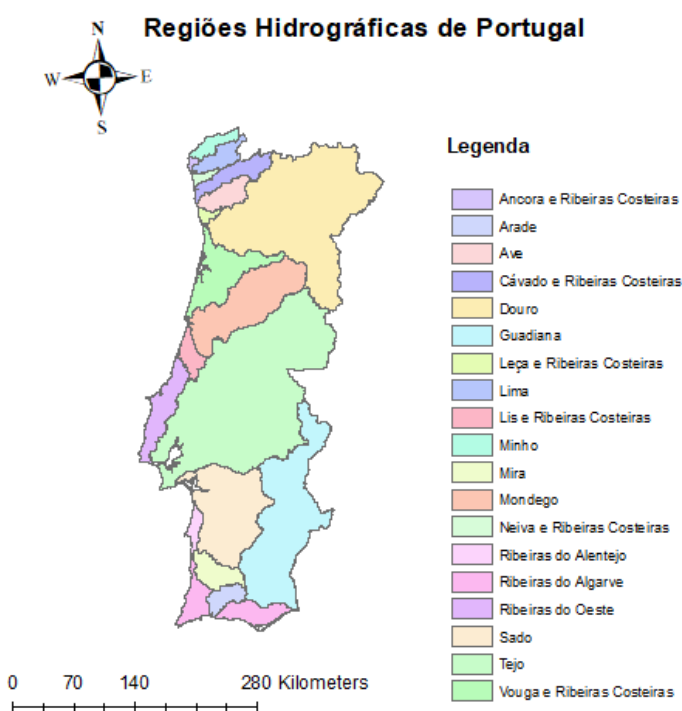


Figura 2- Regiões hidrográficas de Portugal

Dentro destas, a Região Hidrográfica do Douro possui uma área de aproximadamente 97 000 km² (Figura 3), dos quais, 19 000 km² estão presentes em território nacional (APA, 2012).

Relativamente à disponibilidade dos recursos hídricos superficiais, o escoamento total médio anual disponível na bacia hidrográfica do rio Douro é de, aproximadamente, 17 023 hm³, sendo que 8 023 hm³ são gerados na parte portuguesa da bacia hidrográfica (APA, 2012).

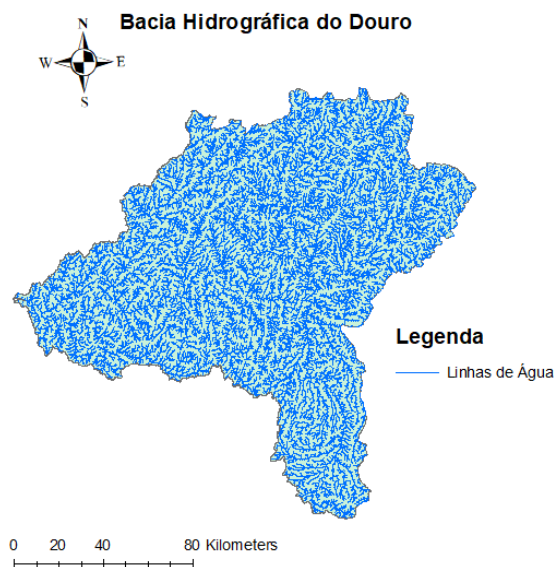


Figura 3- Região Hidrográfica do Rio Douro

Segundo Ribeiro (1988), a Bacia hidrográfica do rio Douro é a unidade natural mais extensa e bem definida da Península Ibérica. A bacia hidrográfica do rio Tâmega está integrada na Região Hidrográfica do Rio Douro (RH3), como apresentado na Figura 4.

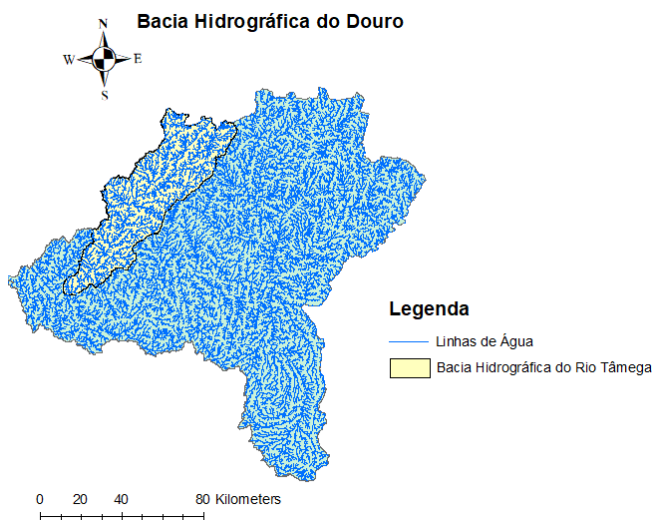


Figura 4 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Tâmega

O rio Tâmega nasce, a uma altitude de 950m, em Espanha, na província de Ourense, possui uma extensão de 187 km e desagua em Entre-os-Rios, no rio Douro, sendo um dos seus principais afluentes. A bacia hidrográfica do rio Tâmega possui uma área de aproximadamente 3314,77 km², pertencendo 20% (669,77 km²) a Espanha e 80% (2645 km²) a Portugal (Figura 5), abrangendo os seguintes concelhos, Amarante, Boticas, Cabeceiras de Basto, Celorico de Basto, Chaves, Fafe, Felgueiras, Marco de Canaveses, Mondim de Basto, Montalegre, Penafiel, Ribeira de Pena, Vila Pouca de Aguiar e Vila Real (APA, 2012).

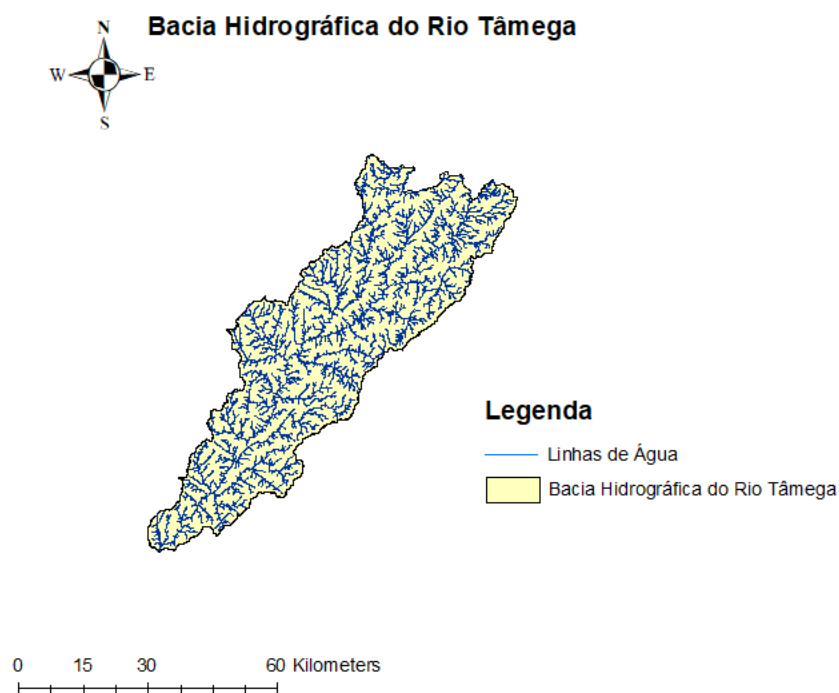


Figura 5 - Bacia Hidrográfica do Rio Tâmega

Desenvolvendo-se segundo uma orientação NE - SW Esta bacia hidrográfica insere-se entre as serras de Marão e Alvão, na parte oriental, e as serras da Cabreira e do Barroso, na parte ocidental. A bacia hidrográfica do rio Tâmega é influenciada por dois tipos de clima, nomeadamente, a influência continental na bacia superior e a influência atlântica na parte do Douro Litoral e Minho (Costa, 1998).

3.2.1. Geologia

O movimento e a distribuição da água de uma bacia hidrográfica, está rigorosamente ligado ao seu substrato geológico e ao seu tipo de solo, que influenciam

o escoamento superficial, condicionando a erosão e a magnitude das pontas de cheia (Lencastre e Franco, 2006).

Segundo Ramos (2005), o substrato geológico pode assumir várias composições, sendo que cada uma possui permeabilidades distintas que condicionam a infiltração da água, nomeadamente formações geológicas consolidadas, como rochas metamórficas e ígneas, ou por formações não consolidadas como, por exemplo, o cascalho e as areias. Assim sendo, de modo a analisar o escoamento de uma bacia hidrográfica, uma das principais propriedades do substrato geológico, são a porosidade e a permeabilidade.

A permeabilidade é a capacidade de absorção do solo, esta aumenta em função do aumento das descontinuidades existentes e da diminuição da compactação do mesmo, deste modo a porosidade é mais elevada nas formações rochosas não consolidadas (Ramos, 2005).

A partir da Carta Litológica (Atlas do Ambiente) é possível constatar que a bacia do rio Tâmega é constituída principalmente por Granitos e rochas afins (68.3%) e xistos e grauvaques (29.8%) (Figura 6).

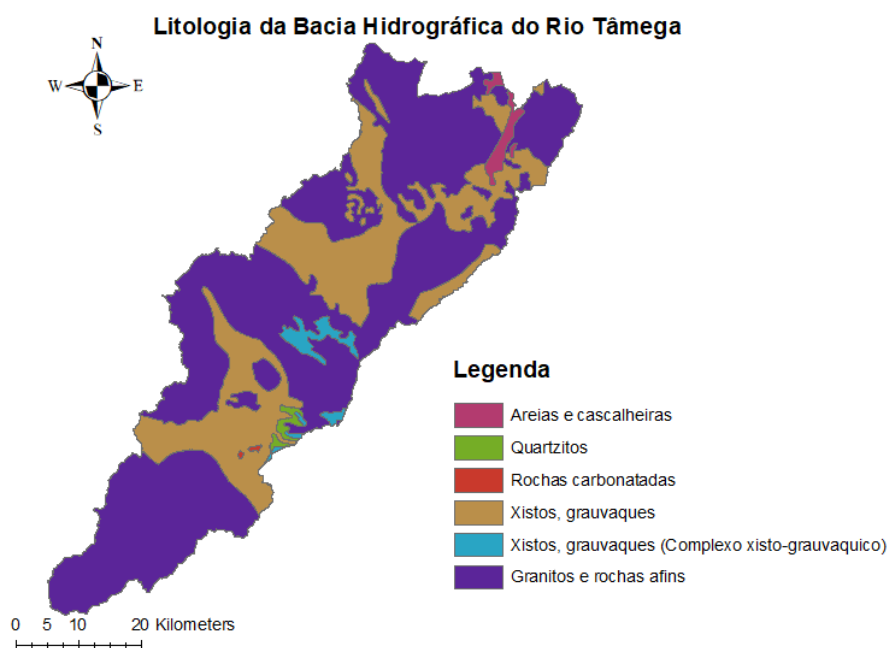


Figura 6 - Litologia da Bacia Hidrográfica do rio Tâmega

3.1.2. Uso do solo

O estudo do uso do solo de uma bacia hidrográfica é de grande importância dado que todas as alterações no seu uso têm um potencial impacto ao nível do escoamento superficial. O escoamento superficial, a capacidade de retenção de água e as taxas de evaporação são influenciadas pelo uso do solo (Rodrigues, 2010).

Segundo Lencastre e Franco (2006), numa bacia ocupada por amplas zonas florestais existe um favorecimento na infiltração de água no solo e, consequentemente, uma diminuição da velocidade de escoamento, diminuindo a probabilidade de ocorrência de cheias de grande magnitude.

Com base na carta Corine Land Cover 2018, foi possível analisar o uso do solo para a bacia hidrográfica em estudo, de acordo com o apresentado na Figura 7, sendo a mesma constituída por 9 classes de usos do solo.

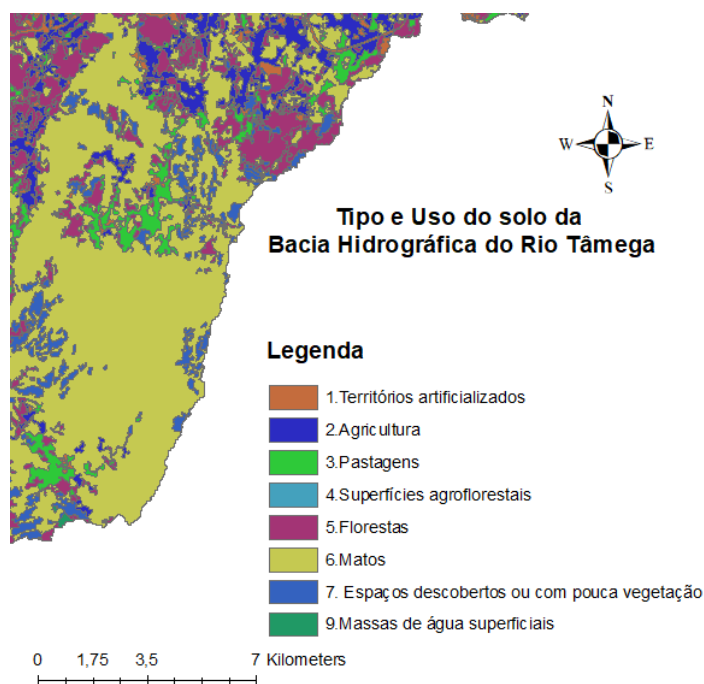


Figura 7 - Uso do solo da Bacia Hidrográfica do rio Tâmega

Através dos dados fornecidos pela Carta Corine Land Cover 2018, para a bacia hidrográfica do rio Tâmega, foi possível obter as percentagens relativas ao uso do solo, destacando-se as seguintes classes: Florestas (41.1%), Matos (25%), Agricultura (18%) e Territórios Artificializados (12,6%).

3.1.3 Relevo

O relevo influencia o comportamento de uma bacia hidrográfica, face a eventos de precipitação, interferindo com vários aspetos como, o transporte de materiais, a intensidade da erosão, e a velocidade de escoamento, tornando-se importante a sua análise.

Através do Modelo Digital de Terreno (MDT), foi possível obter o mapa de relevo da bacia hidrográfica do rio Tâmega (Figura 8). Sobrepondo o mapa da rede hidrográfica, torna-se perceptível o troço principal, bem como a direção preferencial do escoamento.

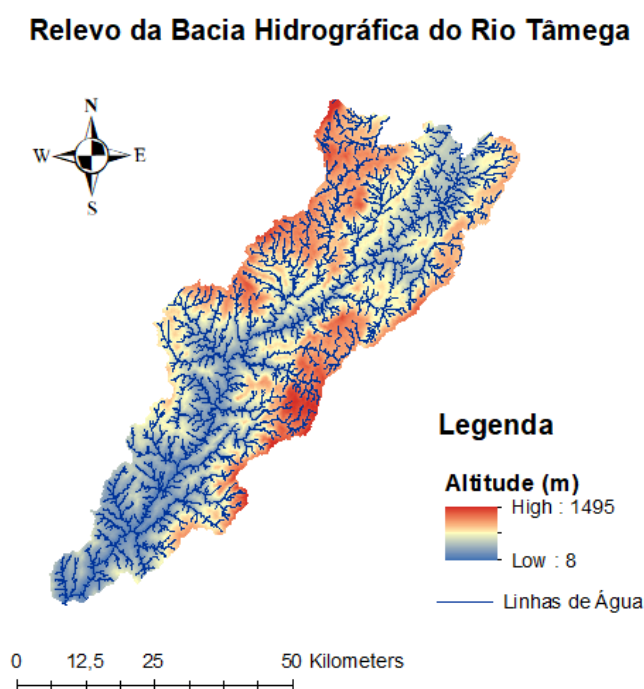


Figura 8 – Mapa de relevo da bacia hidrográfica do rio Tâmega

Através dos dados fornecidos pela carta de altitude, foi possível determinar, para a bacia hidrográfica do rio Tâmega, a altitude máxima de 1495 metros e mínima de 8 metros.

3.1.4. Estações hidrométricas e udométricas

O estudo das cheias fluviais está diretamente relacionado com a análise da distribuição da precipitação, dado que esta contribui diretamente para a sua ocorrência. De acordo com Brandão (2001), quando os dados hidrométricos não são suficientes, é fundamental obter dados udométricos para a determinação de caudais de ponta de cheia

Os dados relativos às redes meteorológica (792 estações) e hidrométrica (717 estações) em Portugal Continental, encontram-se disponíveis no Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH). De forma a adquirir os dados udométricos, foram selecionadas as estações relativas à bacia hidrográfica em estudo (SNIRH, 2022).

Ao longo do Rio Tâmega, existem apenas quatro estações com informação relativa ao caudal instantâneo máximo anual e ao caudal médio diário, que são representadas na Figura 9 e descritas na Tabela 6. A estação 06I/02H Ponte de Canavezes, encontra-se extinta desde março de 1988. No entanto, possui uma base de dados de mais de 50 anos de registos diários.

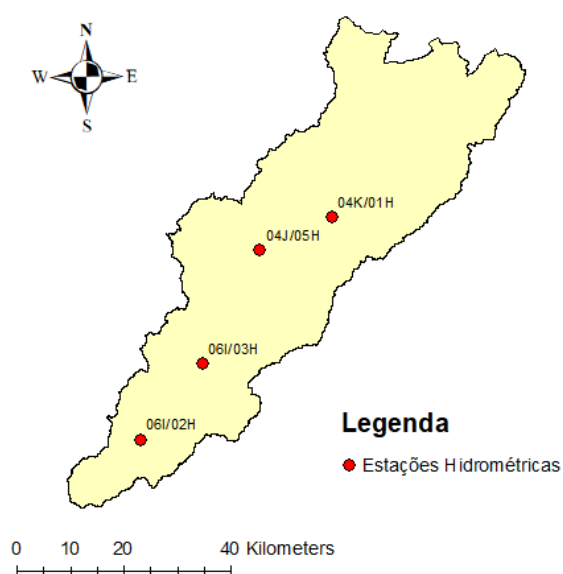


Figura 9 - Estações hidrométricas da bacia hidrográfica do rio Tâmega

Tabela 6- Características das estações hidrométricas usadas. Fonte: SNIRH, 2022

Código	Nome	Área drenada (km ²)	Altitude (m)	Latitude(°N)	Longitude (°W)
06I/02H	Ponte Canavezes	3163	67	41.195	-8.161
06I/03H	Fridão	2616	111	41.322	-8.023
04J/05H	Ponte Cavez	1996	211	41.513	-7.893
04K/01H	Parada Monteiros	1561	24	41.569	-7.732

Relativamente aos dados de precipitação diária máxima anual consideraram-se todos as estações udográficas, bem como todos os anos para os quais existem registos, de forma a obterem-se séries de dados suficientemente longas. No entanto, das 15 estações localizadas na bacia hidrográfica do rio Tâmega, foram selecionadas apenas 7 (Tabela 7), representadas na Figura 10, considerando todos os anos para os quais existem registos .

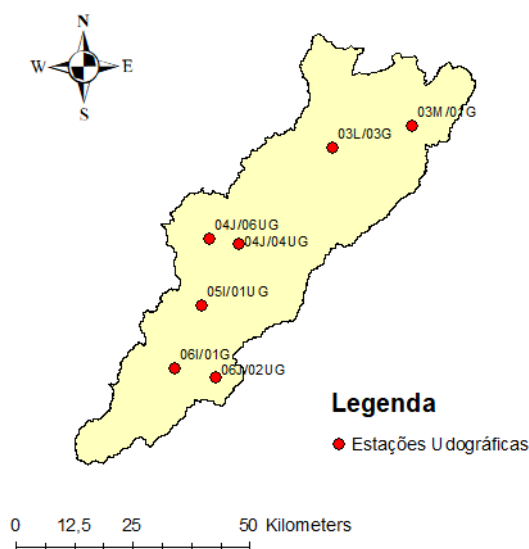


Figura 10 - Estações udográficas da bacia hidrográfica do rio Tâmega

Tabela 7 - Características das estações udográficas usadas. Fonte: SNIRH, 2022

Código	Nome	Altitude (m)	Latitude(°N)	Longitude (°W)
06I/01G	Amarante	146	41.264062	-8.069487
03L/03G	Boticas	501	41.686297	-7.665329
04J/06UG	Cabeceiras de Basto	263	41.512678	-7.979216
04J/04UG	Cavez	292	41.502957	-7.904215
05I/01UG	Celorico de Basto	227	41.383509	-8.001434
03M/01G	Chaves	350	41.727858	-7.459942
06J/02UG	Candemil	449	41.246	-7.965

3.3. Modelo hidrológico – hidráulico

A presente dissertação pretende adotar uma metodologia acessível e de ampla divulgação, de modo a contribuir para a elaboração de cartas de zonas inundáveis a incorporar nos Planos de Gestão de Riscos de Inundações em Portugal.

Como referido anteriormente, os dados de precipitação são o principal componente de todos os modelos hidrológicos. Estes dados foram obtidos através das estações udométricas presentes no Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH).

O modelo Hidrológico HEC-HMS simula os processos de transformação de precipitação em escoamento. Introduzidos os valores de precipitação, determina o excesso de precipitação através de hidrogramas, deduz as perdas e propaga a onda de cheia através de métodos de *routing* dando origem a um hidrograma de cheia.

É igualmente através deste software que são obtidos os dados geométricos referentes à rede de drenagem, através da sua análise com base no MDT, possibilitando os cálculos das várias variáveis necessárias à modelação hidrológica.

Obtendo os caudais de ponta de cheia, estes são introduzidos na modelação, através do modelo HEC-RAS, onde são extraídas as alturas de água e determinadas as áreas inundáveis. Este modelo simula o escoamento unidimensional e cria perfis de cota da superfície livre para determinadas condições de escoamento.

3.2.1. Análise das séries de precipitações máximas diárias anuais

Através do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), foi possível recolher os dados pluviométricos de forma a caracterizar a distribuição dos eventos de precipitação ao longo da bacia hidrográfica do rio Tâmega. Foram analisados os resultados inerentes às estações udométricas inerentes à bacia hidrográfica em estudo, e no que se refere às precipitações máximas diárias, apresentadas na secção anterior.

A análise estatística das series de precipitações máximas diárias foi o primeiro passo para o estudo das cheias na bacia hidrográfica em análise. As precipitações obtidas (Tabela 8), para os períodos de retorno considerados, são os principais dados de entrada dos modelos hidrológicos. Estes dados definem o modelo meteorológico da zona em estudo, permitindo obter os respetivos hidrogramas de cheia, considerando as

séries de precipitações máximas diárias das estações selecionadas na bacia hidrográfica do rio Tâmega.

Tabela 8- Parâmetros estatísticos da precipitação máxima diária

Código	Nome	Nº Observações (anos)	Valor Min. (mm)	Valor Max. (mm)	Mediana (mm)	Média (mm)	Desvio-Padrão (mm)
06I/01G	Amarante	77	32	108	60	61	17
03L/03G	Boticas	66	40.8	136.4	69	71	21
04J/06UG	Cabeceiras de Basto	85	18.8	147	71	74	22
04J/04UG	Cavez	67	27.1	130	65	67	20
05I/01UG	Celorico de Basto	67	43.4	180	84	88	27
03M/01G	Chaves	74	21	64	41	42	11
06J/02UG	Candemil	71	30.8	98	65	65	17

Através dos dados de precipitação máxima diária foram determinados os valores extremos de precipitação, num período de 24 horas, recorrendo à Lei de Gumbel, utilizando 10, 20, 50, 100 e 500 anos como períodos de retorno, para cada estação. De acordo com Lencastre e Franco (2006), esta função de distribuição é a mais adequada para a distribuição dos valores de precipitação máxima diária. A adaptabilidade do estudo foi realizada através das estatísticas de qui-quadrado e de Kolmogonov-Smirnov.

Aa funções de distribuição, são funções que descrevem o comportamento de uma variável aleatória discreta ou contínua, correspondendo à probabilidade de um determinado valor não ser excedido.

A Lei de Gumbel é expressa pela equação:

$$x = x_0 - \left[\ln \left(\ln \left(\frac{T(x)+1}{T(x)} \right) \right) \right] / \alpha$$

Onde:

x – Precipitação (mm)

α – parâmetro calculado com base no desvio padrão da série.

x_0 – parâmetro calculado com base na média da série

T(x) - Período de retorno em anos

Vários autores, incluindo Chow (1988), esclarecem que é possível determinar a precipitação máxima diária de uma bacia, através da média ponderada da distribuição da precipitação de cada estação udométrica sobre uma área de incidência criada através do método dos polígonos de Thiessen, para um determinado período de retorno, fazendo a ponderação das precipitações estimadas por posto e sobre o seu polígono, ou área de incidência, sobre a área total da bacia em estudo e considerando um determinado período de retorno. O cálculo é expresso pela equação:

$$PBH = \frac{\sum_i P_i \times A_i}{A_{BH}}$$

Onde:

P_i – Precipitação estimada por posto e por período de retorno (Lei de Gumbel) (mm)

A_i – Área correspondente a cada posto (km²)

A_{BH} – Área da Bacia (km²)

Na Tabela 9 apresentam-se os valores de precipitação máxima diária para os períodos de retornos de 10, 20, 50, 100 e 500 anos para cada uma das estações em estudo.

Tabela 9 - Precipitação máxima diária para um período de retorno de 10, 20, 50 100 e 500 anos

Código	Nome	Período de Retorno				
		10	20	50	100	500
		Precipitação (mm)				
06I/01G	Amarante	83,8	93,5	106,1	115,6	137,4
03L/03G	Boticas	97,0	108,5	123,3	134,4	160,1
04J/06UG	Cabeceiras de Basto	102,7	115,0	130,8	142,6	154,4
04J/04UG	Cavez	92,7	103,8	118,2	129,0	170,0
05I/01UG	Celorico de Basto	122,3	137,9	158,0	173,1	208,0
03M/01G	Chaves	55,8	61,9	69,7	75,6	89,2
06J/02UG	Candemil	86,5	96,1	108,5	117,8	139,4

Os polígonos de Thiessen delimitam-se através da união dos postos, dois a dois, por segmentos de reta, às quais são traçadas normais no ponto médio dos mesmos, formando polígonos. Os polígonos traçados delimitam a área de influência de cada

posto. Cada um dos polígonos apresenta um único posto de observação no seu interior definindo a sua área de influência, e qualquer ponto contido no interior do polígono está mais próximo desse posto do que de qualquer outro.

Recorrendo às ferramentas do ArcGis, foram delimitados os polígonos de Thiessen em ambiente SIG, representados na Figura 11, bem como a determinação das áreas correspondentes a cada estação udográfica selecionada para este estudo.

Com base no método dos polígonos de Thiessen, foi calculada a precipitação máxima diária para a bacia hidrográfica e para os períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 500 anos, sendo os correspondentes valores apresentados na Tabela 10.

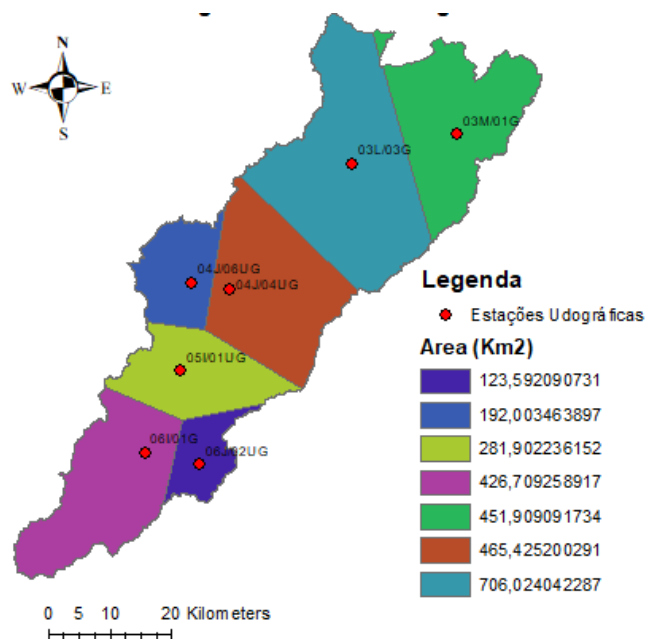


Figura 11- Polígonos de Thiessen na bacia hidrográfica considerada

Tabela 10- Precipitação diária máxima da bacia hidrográfica do Tâmega recorrendo ao método dos Polígonos de Thiessen

Nome	Período de Retorno (anos)				
	10	20	50	100	500
	Prec. Max. Diária (mm)				
BH Tâmega	89.7	100.3	114.0	124.3	149.8

3.2.2. Análise das séries de registos hidrométricos

A análise do regime hidrológico, possibilita a avaliação dos volumes de água escoados, resultante da contribuição de toda a bacia a montante, numa dada secção da

bacia hidrográfica. Lencastre e Franco (2006), definem o caudal como o volume de água escoado ao longo de uma secção, por unidade de tempo, exprimindo-se geralmente em litros por segundo (l/s) ou metros cúbicos por segundo (m³/s).

Como referido anteriormente, foram seleccionadas quatro estações hidrográficas para este caso de estudo. Esta seleção deveu-se à quantidade e qualidade dos dados, nomeadamente o caudal instantâneo máximo e caudal médio diário.

3.2.3. Tempo de concentração

O tempo de concentração de uma bacia hidrográfica é o tempo necessário para que toda a área da bacia hidrográfica contribua, em simultâneo, para o escoamento na secção de referência. Lencastre e Franco (2006), definem este como, “o tempo que uma gota de água caída no ponto hidráulicamente mais afastado da secção de referência demora a chegar até essa secção”, exprimido em minutos, horas ou dias.

Este fator é visto como uma particularidade de uma bacia hidrográfica, independente dos eventos de precipitação. Esta é influenciada por alguns fatores, como por exemplo, o tipo de solo e de ocupação do solo, a área e declive da bacia, comprimento e declive do curso de água principal, entre outros dependendo da expressão utilizada para o seu cálculo. (Martins, 2017).

Existem, na literatura, várias fórmulas para o cálculo deste parâmetro, nomeadamente: Temez, Kirpich e Giandotti.

A fórmula de Temez é expressa pela equação:

$$Tc = 0.3 \times \left(\frac{L}{i_m^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Onde:

Tc - Tempo de concentração (h)

L - Comprimento do curso de água principal (km)

i - Declive médio do curso de água principal (m/m)

A fórmula de Kirpich é expressa pela equação:

$$Tc = 0,0663 \times \left(\frac{L^{0.77}}{i_m^{0.385}} \right)$$

Onde:

Tc - Tempo de concentração (horas);

L - Comprimento do curso de água principal (km);

i - Declive médio do curso de água principal (m/m)

A fórmula de Giandotti é expressa pela equação:

$$Tc = \frac{4\sqrt{A} + 1,5 L}{0.80\sqrt{H}}$$

Onde:

Tc - Tempo de concentração (horas)

A - Área da bacia hidrográfica (km²)

H - Altura média da bacia hidrográfica (m)

L - Comprimento do curso de água principal (km);

Foram aplicadas as três formulas de modo a obter um valor médio dos resultados, adotando o mesmo para os cálculos seguintes, como representado na Tabela 11 - Tempo de concentração (horas)

Tabela 11 - Tempo de concentração (horas)

Nome	Temez	Kirpich	Giandotti	Média
	Tempo de Concentração (h)			
BH Tâmega	48.4	30.1	54.3	44.3

3.2.4. Relação precipitação/escoamento

A transformação de precipitação em escoamento é um processo complexo e difícil de quantificar de forma rigorosa devido a vários fatores como evaporação, infiltração e retenção superficial (Lencastre e Franco 2006).

A grande maioria dos métodos de cálculo de caudal de ponta de cheia é baseada no cálculo da precipitação útil ou efetiva, ou seja, a precipitação que dá origem a escoamento superficial. A água precipitada pode tomar vários percursos, sobre a bacia, até atingir a linha de água, e as características físicas que caracterizam esses percursos envolvem vários fatores difíceis de estimar (Martins, 2000).

Soil Concervation Service (Número de Escoamento)

Segundo Lencastre e Franco (2006), de modo a se quantificar o número de escoamento é necessário recorrer à classificação hidrológica dos solos, o método do *Soil Concervation Service* apresenta uma classificação (Tabela 12), através da qual os solos podem ser divididos em quatro grupos hidrológicos.

Tabela 12- Caracterização dos solos (Adaptado de: Lencastre e Franco 2006)

Tipo de Solo	Características do solo
Tipo A	Solos com elevadas intensidades de infiltração, dando origem a baixos escoamentos diretos. Incluem areias com bastante espessura com pouca argila, e arenitos com bastante espessura e permeabilidade. (Baixo potencial de escoamento superficial.)
Tipo B	Inclui, principalmente, solos arenosos menos espaços que os do tipo A e arenitos menos espessos e menos agregados que os do tipo A. Solos com intensidades de infiltração moderadas quando completamente humedecidos. (Potencial de escoamento superficial abaixo da média.)
Tipo C	Inclui, principalmente solos com camadas impermeáveis subjacentes, solos com textura moderadamente fina intensidades de infiltração baixas quando completamente humedecidos. (Potencial de escoamento superficial acima da média.)
Tipo D	Solos argilosos expansíveis, solos com nível freático permanentemente próximo da superfície, solos pouco espaços. (Elevado potencial de escoamento superficial.)

Lencastre e Franco (2006), apresentam igualmente um mapa com o tipo de solos de Portugal continental classificados consoante os vários grupos hidrológicos (A, B, C, D) , e de igual forma é apresentada uma tabela com os valores de escoamento, para três tipos de humidade relativa, *Antecedent Moisture Conditions* (AMC) para cada tipo de ocupação, em função do grupo hidrológico de solo que este ocupa. De modo a obter um número de escoamento, para a bacia em estudo, mais preciso, foram utilizados os dados da Tabela 13 que define os números de escoamento para condições de humidade relativa do solo II, (AMC-II) para diversas utilizações do solo.

Tabela 13 – Números de escoamento AMC-II (Adaptado de Lencastre e Franco 2006)

Utilização ou cobertura do solo	Grupo Hidrológico do Solo			
	A	B	C	D
Zonas lavradas: Não cultivadas	72	81	88	91
Zonas lavradas: Cultivadas	62	71	78	81
Pastagens: em más condições	68	79	86	89
Pastagens: em boas condições	39	61	74	80
Prados	30	58	71	78
Florestas: Pouco densas	45	66	77	83
Florestas: muito densas	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, etc: em boas condições, relva cobrindo mais de 75% da área	39	61	74	80
Espaços abertos, relvados, etc: em condições razoáveis, relva cobrindo 50 a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais (85% impermeabilidade)	89	92	94	95
Zonas Industriais (72% de impermeabilização)	81	88	91	93
Áreas Residenciais:				
Área média	% média impermeável			
<500 m ²	65%	77	85	90
1000 m ²	38%	61	75	83
1300 m ²	30%	57	72	81
2000 m ²	25%	54	70	80
4000 m ²	20%	51	68	79
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.	98	98	98	98
Ruas, estradas: asfaltadas com drenagem	98	98	98	98
Ruas, estradas: Gravelha	76	85	89	91
Ruas, estradas: terra	72	82	87	89

De acordo com Lencastre e Franco (2006), para o cálculo e determinação de caudais de ponta de cheia considera-se, de um modo geral, o solo bem humedecido,

utilizando assim os valores de CN para AMC-III, a Tabela 14 apresenta os valores de Numero de escoamento (CN) para as situações de AMC-I e AMC-III em função do valor de AMC-II, Tabela 14

Tabela 14- Valores de CN para AMC-I e AMC-III em função de AMC-II

AMC			AMC			AMC			AMC		
II	I	III	II	I	III	II	I	III	II	I	III
	100	100	81	64	92	62	42	79	43	25	63
99	97	100	80	63	91	61	41	78	42	24	62
98	94	99	79	62	91	60	40	78	41	23	61
97	91	99	78	60	90	59	39	77	40	22	60
96	89	99	77	59	89	58	38	76	39	21	59
95	87	98	76	58	89	57	37	75	38	21	58
94	85	98	75	57	88	56	36	75	37	20	57
93	83	98	74	55	88	55	35	74	36	19	56
92	81	98	73	54	87	54	34	73	35	18	55
91	80	97	72	53	86	53	33	72	34	18	54
90	78	97	71	52	86	52	32	71	33	17	53
89	76	96	70	51	85	51	31	70	32	16	52
88	75	96	69	50	84	50	31	70	31	16	51
87	73	95	68	48	84	49	30	69	30	15	50
86	72	95	67	47	83	48	29	68	25	12	43
85	70	94	66	46	82	47	28	67	20	9	37
84	68	94	65	45	82	46	27	66	15	6	30
83	67	93	64	44	81	45	26	65	10	4	22
82	66	92	63	43	80	44	25	64	5	2	13

O número de escoamento a considerar para a bacia hidrográfica será igual à média ponderada dos números de escoamento das várias zonas da bacia, dado que o tipo hidrológico do solo e os usos do mesmo são heterogêneos, utilizando para tal a seguinte equação:

$$CN = \left(\frac{\sum CN_i \times A_{bh}}{\sum A_{bh}} \right)$$

Onde:

CN - Número de escoamento

A_{bh} - Áreas homogêneas em termos de ocupação do solo, pertencentes à bacia hidrográfica (km²)

Curvas de Intensidade- Duração-Frequência IDF

Segundo Brandão (2001), as curvas de intensidade-duração-frequência (IDF) estabelecem a relação entre a intensidade de precipitação, a duração da precipitação e o período de retorno, de acordo com a expressão:

$$\bar{i} = at^b$$

Onde:

$\bar{i}$ – Intensidade de precipitação (mm)

t- Tempo (horas)

Os coeficientes *a* e *b* são função do período de retorno *T* e da área considerada.

Brandão (2001), elaborou um conjunto de curvas IDF para 17 estações udométricas por todo o território nacional, destas curvas destacam-se as referentes à estação 03M/01I Chaves para o estudo em questão.

Os parâmetros característicos das precipitações intensas são:

- A duração correspondente ao tempo considerado para a chuvada, que no caso de cheias fluviais pode ser da ordem de grandeza de horas, ou mesmo dias;
- A intensidade correspondente à relação entre a duração da precipitação caída e a sua altura;
- A frequência corresponde a uma probabilidade de ocorrência, que pode ser convertida num período de retorno.

Curvas de possibilidade udométrica - CPU

Define-se como curva de possibilidade udométrica (CPU) (altura-duração-frequência), a curva que relaciona a altura máxima de precipitação com a duração do

evento de precipitação e com a probabilidade de ocorrência que lhe está associada (Martins, 2000).

De acordo com a seguinte equação:

$$P = at^n$$

Onde:

P – Precipitação (mm)

t- Tempo (horas)

Os parâmetros a e n são obtidos através do método dos mínimos quadrados, dos valores de ajustamento das séries de precipitação, para os períodos de retorno utilizados, tendo em conta a equação:

$$\log h = \log a + n \log t$$

Com base nas curvas de possibilidade udométrica foi possível determinar a altura de precipitação para vários períodos de retorno e durações de precipitação, e a correspondente precipitação ponderada na bacia hidrográfica para vários períodos de retorno. Estes valores serviram como dados de entrada no modelo HEC-HMS.

Método Racional

A fórmula racional é a metodologia para cálculo do caudal de ponta de cheia de maior utilização à escala mundial (Martins, 2000). A mesma é de grande utilidade e garante um grau de confiança elevado, desde que as suas limitações, de ordem hidráulica e hidrológica, se tomem em consideração, os seus parâmetros de base sejam adequados e os procedimentos da sua aplicação estejam corretamente definidos (Martins, 2000).

As limitações da fórmula racional, decorrentes da sua aplicação, estão ligadas às suas simplificações de ordem hidrológica e hidráulica. (Martins, 2000) As simplificações de ordem hidrológica estão associadas em admitir a precipitação como constante ao longo do tempo e do espaço e em pressupor a transformação precipitação-escoamento como uma relação linear representada por um coeficiente de escoamento (Tabela 15). De uma perspetiva hidráulica, a limitação tem por base a consideração da

ocorrência de um caudal de ponta de cheia, apenas quando toda a bacia está a contribuir para o escoamento.

Tabela 15- Coeficiente de escoamento para vários tipos de ocupação do solo. Adaptado de: Keys,, (1988).

Tipo de ocupação	Período de Retorno (anos)						
	2	5	10	25	50	100	500
	Coeficiente c						
Zonas Verdes							
Em más condições							
Inclinação (<2%)	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.58
Inclinação (2-7%)	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Inclinação (>7%)	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
Em condições medianas							
Inclinação (<2%)	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Inclinação (2-7%)	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Inclinação (>7%)	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Em boas condições							
Inclinação (<2%)	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.49
Inclinação (2-7%)	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Inclinação (>7%)	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.58
Zonas Lavradas							
Inclinação (<2%)	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Inclinação (2-7%)	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Inclinação (>7%)	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
Patagens							
Inclinação (<2%)	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Inclinação (2-7%)	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Inclinação (>7%)	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Florestas/Matos							
Inclinação (<2%)	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Inclinação (2-7%)	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Inclinação (>7%)	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58
Ruas e estradas							
De asfalto	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95	1.00
De betão	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97	1.00

De acordo com Lencastre e Franco (2006), em Portugal, a utilização da fórmula racional tem obtido resultados satisfatórios em bacias hidrográficas com áreas inferiores

a 25 km², no entanto, não existe qualquer consenso relativo a uma área de limite máximo para a aplicabilidade da fórmula racional

A fórmula racional é expressa pela seguinte equação:

$$Q_p = c \times i \times A$$

Onde:

A -Área da bacia hidrográfica (m²)

i – Intensidade media de precipitação (m/s)

c – Coeficiente da fórmula racional (adimensional)

É de notar que os coeficientes apresentados na tabela anterior variam, para a mesma ocupação, consoante o declive do solo e o período de retorno. Com base nos dados obtidos, referentes à bacia hidrográfica em estudo, e tendo em atenção que a mesma tem uma inclinação média de 4% foram seleccionados os valores de c referentes à inclinação (2 – 7 %) para os vários tipos de ocupação do solo

3.2.5. Caracterização da bacia hidrográfica do rio Tâmega. (ArcGIS e HEC-HMS)

O HEC-HMS, através do seu SIG incorporado, procedeu com o processamento dos dados a partir do MDT, que permite realizar análises espaciais, visualizar a informação hidrológica espacial, delimitar bacias hidrográficas e redes de drenagem, registar as características referentes a ambas, e ainda permite a produção de dados de entrada para os modelos hidrológicos (USACE, 2022).

As análises hidrológicas são suportadas pela caracterização de linhas de água, bacias hidrográficas e sub-bacias, que é possibilitada por um Modelo Digital de terreno (MDT), dado que este contém informações suficientes para esboçar a rede de drenagem superficial. Foi utilizando o MDT - Modelo digital de terreno com aproximadamente 30 m de resolução espacial obtido pelo *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) e retirado do site U.S. Geological Survey. (U.S. Geological Survey, 2020).

O MDT obtido, não é o mais adequado ao estudo apresentado nesta Dissertação, dado que apresenta uma equidistância das curvas de nível de 30 metros, gerando mapas de inundação pouco representativos da realidade. Deste modo é importante referir que quanto maior a resolução do MDT maior a qualidade e rigor dos dados apresentados,

De forma a caracterizar a rede de drenagem da bacia em estudo, foi utilizado o software HEC-HMS, o MDT adquire um processo de pré-tratamento do terreno, presente no menu “GIS” seguindo alguns processos descritos sumariamente de seguida:

- *Coordinate Sistem*: É definido um sistema de coordenadas referente ao MDT utilizado
- *Terrains Reconditioning*: Procede ao reconhecimento do MDT selecionado.
- *Preprocess Sinks*: Preenche as depressões existentes no MDT, modifica a elevação das células deprimidas para valores semelhantes ao das células vizinhas, cria o mapa *Fill Sinks* (Figura 13);
- *Preprocess Drainage*: Gera o mapa *Flow Direction*, (Figura 14), referente à direção do escoamento, tendo por base o declive mais acentuado de uma célula em relação às células vizinhas seguindo o algoritmo determinístico de oito direções de fluxo (D8), desenvolvido por O’Callaghan & Mark (1984), e o mapa *Flow Accumulation* que utiliza a direção do escoamento, calculando o escoamento acumulado;

- *Identify Streams*: Cria um mapa com a rede de drenagem para cada segmento, utilizando os dados de escoamento acumulado;
- *Break Points Manager*: Cria um mapa que divide a bacia em várias sub-bacias ajustadas a toda a rede de drenagem definida nos processos anteriores;

São consideradas as características topográficas das sub-bacias, incluindo o comprimento das linhas de água e o declive das mesmas, permitindo o cálculo dos parâmetros hidrológicos.

De seguida, recorrendo ao ArcGIS, utilizando as castas de uso e ocupação do solo (COS 2018), são determinadas as percentagens de áreas impermeáveis referente à bacia em estudo.

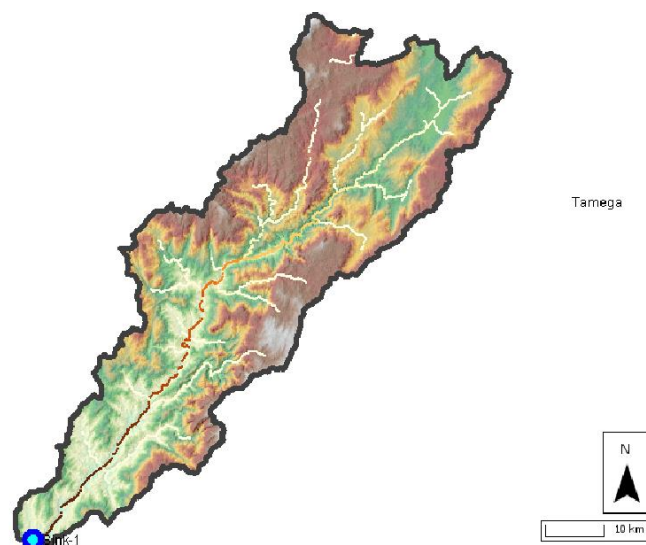


Figura 12 - Modelo Digital de Terreno com o preenchimento de depressões utilizando o comando *Fill Sinks*

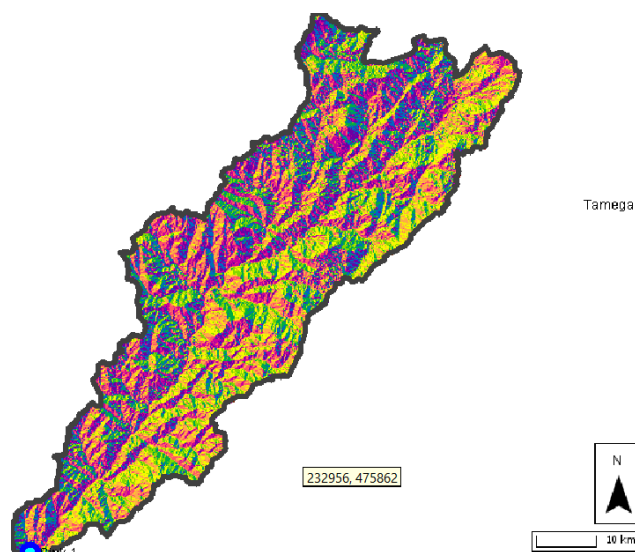


Figura 13 - Direção de escoamento algoritmo determinístico de oito direções de fluxo (D8) (*Flow Direction*)

3.2.6. Simulação hidrológica (HEC-HMS)

O Software HEC-HMS, como referido anteriormente, simula o escoamento superficial proveniente dos eventos de precipitação, é um sistema versátil e de acesso livre, capaz de processar e representar informação relativa a vários processos, nomeadamente a infiltração, o escoamento de superfície e o escoamento de base (USACE, 2022).

No entanto o modelo apenas admite redes dendríticas, ou seja, redes ramificadas em forma de árvore (USACE, 2022).

Para dar início à análise de um sistema hidrológico, é necessário concluir as seguintes etapas:

1. Processar o mapa de terreno;
2. Criar os dados de medição;
3. Inserir os dados no modelo de bacia (*Basin model*);
4. Inserir os dados no modelo de precipitação (*Meteorologic model*);
5. Inserir as especificações de controlo (*Control specifications*);
6. Executar a simulação.

A primeira etapa, relativa ao processamento dos dados de terreno, foi apresentada na secção anterior.

Após a criação das sub-bacias, são obtidos os dados geográficos referentes às mesmas, de modo a obter os tempos de concentração referentes a cada unidade hidrológica.

O **Basin Model**, representa as características físicas da bacia em estudo, de modo a elaborar um esquema hidrológico. Segundo o manual do utilizador HEC-HMS (USACE, 2000), o programa aceita várias equações para o cálculo de diversos métodos, como a perda por precipitação (Loss Method), o escoamento de superfície, a transformação da precipitação em escoamento (Tranform Method) e o escoamento de base (Baseflow Method), as várias equações aceites pelo programa estão especificadas no manual.

Modelo de perdas de precipitação (Loss Method)

Foi aplicado o modelo do SCS, *Soil Concervation Service*, como modelo de perdas de precipitação, que considera o número de escoamento da bacia hidrográfica

(CN), a percentagem de área impermeável e as perdas iniciais (I_a), como parâmetros de calculo. Segundo Chow (1998), este modelo reconhece um evento de precipitação como um todo, assumindo o escoamento direto sempre inferior ou igual à precipitação total. A relação entre os vários parâmetros exprime-se da seguinte forma:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

Onde:

P_e – Excesso de precipitação (mm);

P – Precipitação total (mm);

F_a – Perdas contínuas (mm)

I_a – Perdas Iniciais (mm)

S – Retenção Potencial máxima (mm)

Segundo Chow (1998), o SCS considerou, com base em vários estudos, uma relação empírica para a retenção potencial máxima e as perdas iniciais:

$$I_a = 0.2 S$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Deste modo o escoamento de superfície é calculado pela seguinte fórmula:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

O número de escoamento (CN) é determinado pelo tipo hidrológico do solo e pela sua ocupação, estes dados foram recolhidos através da cartografia apresentada anteriormente. Segundo Lencastre e Franco (2006), para a determinação de caudais de cheia para frequências de ocorrência elevadas, considera-se o solo como bem

humedecido, assim sendo utilizam-se os valores de escoamento para AMC – III (antecedent moisture conditions).

Modelo de transformação de precipitação em escoamento (Transform Method)

Para este modelo foi aplicado o modelo de hidrograma unitário pelo método do SCS, este faz a relação do excesso de precipitação determinando o hidrograma de cheia com referência ao tempo de resposta da bacia hidrográfica. O SCS indica que o tempo de resposta da bacia (T_{lag}) pode estar dependente do tempo de concentração (T_c) tal que:

$$T_{lag} = 0.6 * T_c$$

Segundo Chow (1998), o hidrograma unitário pelo método do SCS é dos mais utilizados em modelação hidrológica, tratando-se de um modelo empírico que estabelece uma relação entre escoamento direto e a precipitação

Modelo de propagação de ondas de cheia (Baseflow Method)

A propagação de ondas de cheia nos canais da rede de drenagem é realizada com base no modelo do tempo de resposta, considerando o comprimento do troço principal e a velocidade média de escoamento no mesmo.

No **Meteorologic Models**, são introduzidos os dados referentes à precipitação, bem como as áreas de incidência. É selecionado o método de distribuição da precipitação, frequências de ocorrência correspondentes aos períodos de retorno e a

informação referente ao intervalo de tempo da precipitação constante e correspondente duração a ser considerada

No **Control Specifications** são definidas as datas de início e fim da simulação, duração e intervalo de tempo de calculo em cada simulação, não existindo, por parte do programa, qualquer limitação ao tempo selecionado.

Finalmente, são simulados os caudais de cheia e obtidos os respetivos hidrogramas de cheia resultantes da informação dos eventos de precipitação inseridos inicialmente.

3.2.7 Simulação hidráulica (HEC-RAS)

O software HEC-RAS, necessita de informação referente à geometria da bacia, nomeadamente: secções transversais, margens do rio, estruturas, entre outras características físicas. Para tal são processados, através da extensão SIG presente no software (RAS Mapper) estas características, sendo registadas cada classe individualmente.

O RAS Mapper é uma funcionalidade SIG do software HEC-RAS, que permite ao utilizador inserir o mapa de terreno e traçar os vários elementos necessários á modelação hidráulica, de acordo com o apresentado em seguida:

River Centerline – Referente às linhas de água da rede hidrográfica em estudo, esta linha é traçada, centralmente, ao longo dos cursos de água.

Bank Lines – Definem os limites das margens dos cursos de água definidos pelas centerlines.

Flow Paths – Definem o sentido de escoamento dos cursos de água definidos pelas linhas anteriores, é importante que estas linhas não intercetem nenhuma das linhas anteriores.

Cross Section Lines - São linhas que intercetam verticalmente todas as linhas anteriores, e que definem as secções dos troços, representando os mesmos graficamente. Estas linhas não se devem cruzar entre si.

Após a delimitação das várias características dos troços de água, são introduzidos os dados referentes aos caudais de ponta de cheia no separador “Steady

Flow Data”. Este separador permite adicionar vários caudais de ponta de cheia para o mesmo conjunto de troços de água.

De seguida, no separador “Steady Flow Analysis”, presente na função “Run” definem-se os troços, valores de escoamento e terreno a utilizar como dados de base para a modelação, igualmente, devido à incorporação do SIG (RAS Mapper) é possível definir a delimitação de mapas de inundação.

4. Resultados e discussão

4.2. Introdução

Utilizando o MDT apresentado anteriormente, assumindo a limitação da sua resolução espacial, equidistância das curvas de nível de 30 metros. Foi possível, através do software HEC-HMS a obtenção de várias características físicas da bacia (Tabela 16). De acordo com as tabelas apresentadas anteriormente, e dado o Grupo Hidrológico do Solo predominante da bacia hidrográfica (B), foi possível obter o número de escoamento médio referente à bacia.

Tabela 16- Características da bacia hidrográfica do rio Tâmega

BH Tâmega	
Área (Km ²)	26407,6
Altitude Máxima (m)	1495
Altitude Mínima (m)	8
Altitude Média (m)	426,7
Comprimento do Rio (Km)	129
Declive Médio do rio (m/m)	0,011527
Número Escoamento (CN) (AMC-II)	66
Número Escoamento (CN) (AMC-III)	82
Tempo de Concentração (h)	44.3

O tempo de concentração de uma bacia, t_c , é o tempo necessário para que toda a sua área contribua para o escoamento superficial na secção de referência. Para se obter o seu valor utilizaram-se três fórmulas cinemáticas, Temez, Kirpich e Giandotti, assumindo-se o valor médio das mesmas como valores de entrada (Tabela 17). Dado que o modelo hidrológico está dividido em unidades hidrológicas, foram calculados os tempos de concentração para cada uma delas.

Tabela 17- Tempo de concentração (t_c) da bacia hidrográfica do rio Tâmega

Nome	Temez	Kirpich	Giandotti	Média
	Tempo de Concentração (h)			
BH Tâmega	48.4	30.1	54.3	44.3

A análise estatística das series de precipitações máximas de curta duração é o primeiro, e mais importante passo, para o estudo de cheias. Através dos dados de precipitação máxima diária foram determinados os valores de precipitação extrema,

num período de 24 horas para cada estação udográfica, recorrendo à Lei de Gumbel. Os resultados estão representados na Tabela 18.

Tabela 18- Precipitação máxima diária para diferentes períodos de retorno recorrendo à Lei de Gumbel para as várias estações udográficas

Código	Nome	Período de Retorno				
		10	20	50	100	500
		Precipitação (mm)				
06I/01G	Amarante	83.8	93.5	106.1	115.6	137.4
03L/03G	Boticas	97.0	108.5	123.3	134.4	160.1
04J/06UG	Cabeceiras de Basto	102.7	115.0	130.8	142.6	154.4
04J/04UG	Cavez	92.7	103.8	118.2	129.0	170.0
05I/01UG	Celorico de Basto	122.3	137.9	158.0	173.1	208.0
03M/01G	Chaves	55.8	61.9	69.7	75.6	89.2
06J/02UG	Candemil	86.5	96.1	108.5	117.8	139.4

Através do Software ArcGis foram delimitados os polígonos de Thiessen para cada estação e determinadas as áreas correspondentes. De seguida, foi realizada uma média ponderada dos valores de precipitação de cada estação pela área correspondente, obtendo valores de precipitação médios para cada período de retorno para o total da bacia, estes encontram-se expressos na Tabela 19.

Tabela 19- Precipitação máxima diária ponderada para a bacia hidrográfica do rio Tâmega

Nome	Período de Retorno (anos)				
	10	20	50	100	500
	Prec. Max. Diária (mm)				
BH Tâmega	89.7	100.3	114.0	124.3	149.8

Com base nos valores apresentados na tabela 19, procedeu-se à elaboração das curvas de possibilidade udométrica (CPU), para os vários períodos de retorno. Posteriormente foram calculados os caudais de ponta de cheia, pelo Método Racional e pelo método do Soil Concervation Service de modo a comparar resultados (Tabela 20).

Tabela 20- Caudal de ponta de cheia para a Bacia Hidrográfica do rio Tâmega.

Nome	Período de Retorno				
	10	20	50	100	500
	Qp (m³/s)				
CPU - MR - BH	650.8	808.5	988.0	1177.3	1690.2
CPU - SCS - BH	721.0	846.3	1012.8	1140.0	1462.4

Ambos os conjuntos de resultados não apresentam diferenças significativas o que garante um certo nível de confiança quanto à seleção dos dados udométricos.

Segundo Brandão (2001), quando a informação hidrométrica não é suficiente para a determinação de caudais de ponta de cheia o conhecimento das precipitações intensas é fundamental para essa determinação.

Como referido anteriormente, ao longo do rio Tâmega, existem apenas quatro estações com informação relativa ao caudal instantâneo máximo anual e ao caudal médio diário.

Recorrendo à função de distribuição de Gumbel foram determinados os caudais de ponta para os períodos de retorno de 10, 20, 100, e 500 anos, de acordo com os resultados calculados e posterior teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, para um nível de significância de 10%, rejeitou-se a série de valores da estação de Ponte Canavezes (06I/02H).

A estação de Parada Monteiros possuía curta série de registos, impossibilitando uma análise fiável, assim sendo, foram apenas estimados os caudais de ponta de cheia com base nas estações de Ponte Caves e Fridão, apenas para fins comparativos, sendo os correspondentes resultados apresentados na Tabela 21.

Tabela 21- Caudal de ponta para diferentes períodos de retorno recorrendo à Lei de Gumbel para as várias estações udográficas

Código	Nome	Período de Retorno				
		10	20	50	100	500
		Qp (m ³ /s)				
06I/03H	Fridão	1160.5	1378.4	1660.5	1871.9	2360.3
04J/05H	Ponte Cavez	914.6	1087.8	1311.9	1479.9	1868.0

Os dados de caudal instantâneo máximo anual desmobilizados pelo SNIRH, demonstram para a estação de Ponte Cavez um caudal de 1318 m³/s referente à cheia de 2001. Pelos resultados obtidos este valor é apenas atingido e ultrapassado num

período de retorno de 50 anos, correspondente com as precipitações máximas analisadas anteriormente.

4.3. Comparação curvas CPU e Curvas IDF

No início da dissertação, foram estudadas as curvas propostas por Brandão (2001), definidas para a estação de Chaves, de modo a servirem como termo de comparação para as curvas de capacidade precipitação udométrica (CPU), calculadas com base nos valores médios das precipitações captadas pelas sete estações selecionadas para o estudo da bacia hidrográfica em análise.

Através do método do *Soil Concervation Service* e do Método Racional, foram calculados os caudais de ponta de cheia para a bacia em estudo, recorrendo a ambas as curvas. No entanto, os valores de ambas as curvas tiveram diferenças muito significativas de acordo com o apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - Caudal de ponta de cheia pelo método racional e pelo método do Soil Concervation Service, para ambas as curvas

Nome	Período de Retorno				
	10	20	50	100	500
	Qp (m³/s)				
CPU - MR - BH	650.8	808.5	988.0	1177.3	1690.2
CPU - SCS - BH	721.0	846.3	1012.8	1140.0	1462.4
IDF - MR - BH	383.8	476.9	587.1	701.4	999.0
IDF - SCS - BH	330.2	396.4	490.6	561.7	730.0

Analisando os resultados da Tabela 22, é possível destacar que os valores, obtidos por ambos os métodos, utilizando as curvas propostas por Brandão (2001) estão muito abaixo dos valores obtidos pelas curvas geradas na presente dissertação. As curvas propostas por Brandão (2001) utilizadas neste trabalho, são pertencentes à estação udográfica 03M/01G Chaves, sendo a única estação em comum com o presente trabalho.

Esta diferença é devida aos valores de entrada de cada curva, comparando os valores da estação 03M/01G Chaves da Tabela 18, com os valores médios da Tabela 19, apresentadas anteriormente, é possível observar que, os valores de precipitação máxima diária para o total da bacia atingem valores de cerca do dobro, face aos valores calculados para a estação de Chaves.

Deste modo, as curvas desenvolvidas na presente dissertação são geradas com uma altura de precipitação de cerca do dobro da altura de precipitação das curvas propostas por Brandão (2001) para a estação de 03M/01G Chaves.

De modo a comparar as curvas propostas por Brandão, C. (2001), foram elaboradas curvas CPU para a área de influência da estação de Chaves, e calculado o caudal de ponta de cheia pelo método do *Soil Conservation Service*, como demonstra a Tabela 23.

Tabela 23- Caudal de ponta de cheia para a área de influência da estação de Chaves, pelo método do Soil Conservation Service.

Código	Nome	Período de Retorno				
		10	20	50	100	500
		Qp (m³/s)				
03M/01G	CPU - Chaves	176.1	195.2	220.0	238.5	281.3
03M/01G	IDF - Chaves	158.2	175.1	198.2	215.1	254.1

A diferença de resultados justifica-se pelos valores de precipitação utilizados como dados de entrada, para ambas as curvas. Os dados de precipitação referentes à área de influência da estação de Chaves, utilizados por Brandão (2001), estão compreendidos entre 1932 e 1971, enquanto os utilizados no presente trabalho estão compreendidos entre 1932 e 2020.

4.3. Modelação hidrológica

Como explicado anteriormente, o Software HEC.HMS, criou um esquema hidrológico (Figura 14) através da análise do MDT, abrangendo toda a rede hidrológica da bacia, dividindo a mesma em 50 unidades hidrológicas. Igualmente foi considerada uma única unidade hidrológica da bacia (esquema simplificado), criando uma única unidade hidrológica para o total da bacia (Figura 15). Este último modelo foi criado com o intuito de obter dados geográficos para a comparação de resultados obtidos por outras origens, bem como permitir a comparação de resultados entre diferentes formas de cálculo.

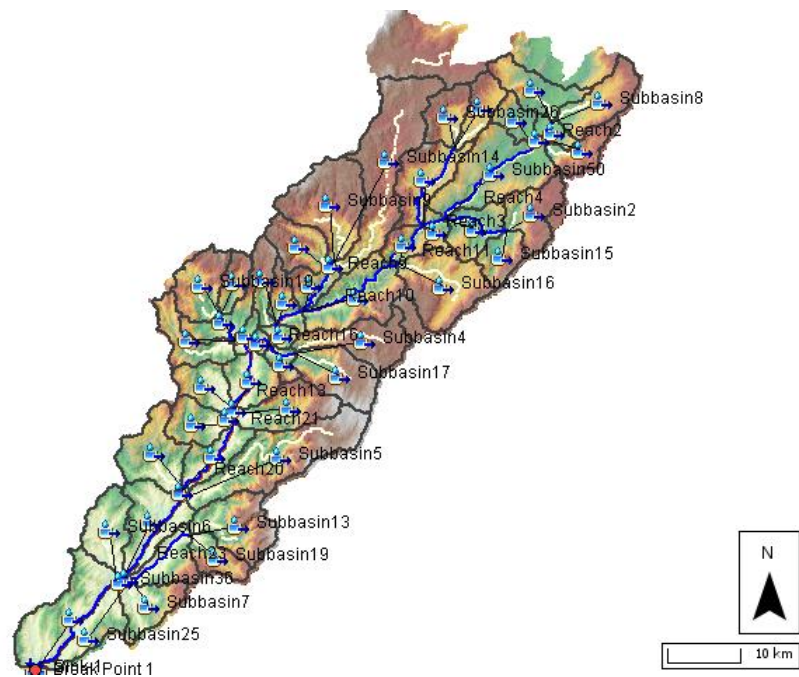


Figura 14- Esquema hidrológico da bacia hidrográfica do rio Tâmega, gerado pelo HEC-HMS

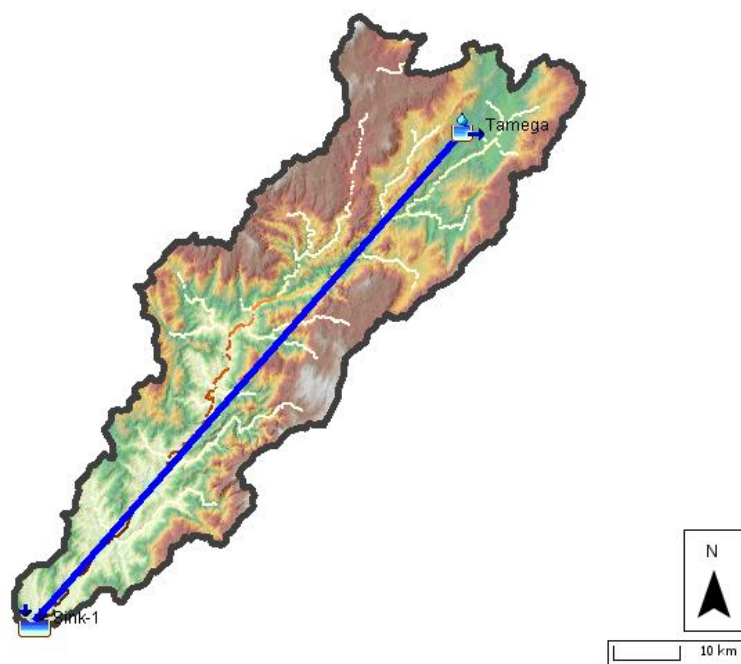


Figura 15 - Esquema hidrológico da bacia hidrográfica do rio Tâmega, simplificado.

Foram utilizadas as curvas CPU obtidas através dos dados de precipitação analisados na presente dissertação, como dados de entrada para o modelo hidrológico. De modo a comparar resultados, foi calculado o caudal de ponta de cheia para os vários períodos de retorno, pelo método racional e pelo método do *Soil Conservation Service*.

Na Tabela 24 estão representados os resultados de caudal de ponta de cheia resultantes das simulações hidrológicas dos modelos hidrológicos, calculados pelo software HEC-HMS, e dos outros cálculos realizados.

Tabela 24 - Caudal de ponta de cheia para os períodos de retorno de 10, 20, 50, 100, 500 anos para a bacia hidrográfica do rio Tâmega

Nome	Período de Retorno				
	10	20	50	100	500
	Qp (m³/s)				
CPU MR - BH	650.8	808.5	988.0	1177.3	1690.2
CPU SCS - BH	721.0	846.3	1012.8	1140.0	1462.4
HEC-HMS BH Simplificado	769.5	886.9	1040.4	1156.2	1445.3
HEC-HMS BH	747.2	880.3	1102.3	1226.2	1615.2

Analisando os dados apresentados, é de notar a proximidade dos valores obtidos pelo programa HEC-HMS e analiticamente. A diferença entre os valores obtidos pelo método do *Soil Conservation Service* através das diferentes curvas de possibilidade udométrica assume alguma relevância.

O modelo meteorológico, tem como *input* situações de precipitação extrema, que neste caso de estudo tiveram a duração de cada unidade hidrológica, esta distribuição da precipitação não reflete a realidade, tornando-se uma limitação da aplicação do modelo. No entanto pretendeu-se com a simulação, calcular cenários críticos.

As Figura 16 Figura 17 Figura 18 Figura 19 e Figura 20 representam o hidrograma de cheia durante as 24h de precipitação para os períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 500 anos respetivamente, para o esquema hidrológico gerado pelo software HEC-HMS.

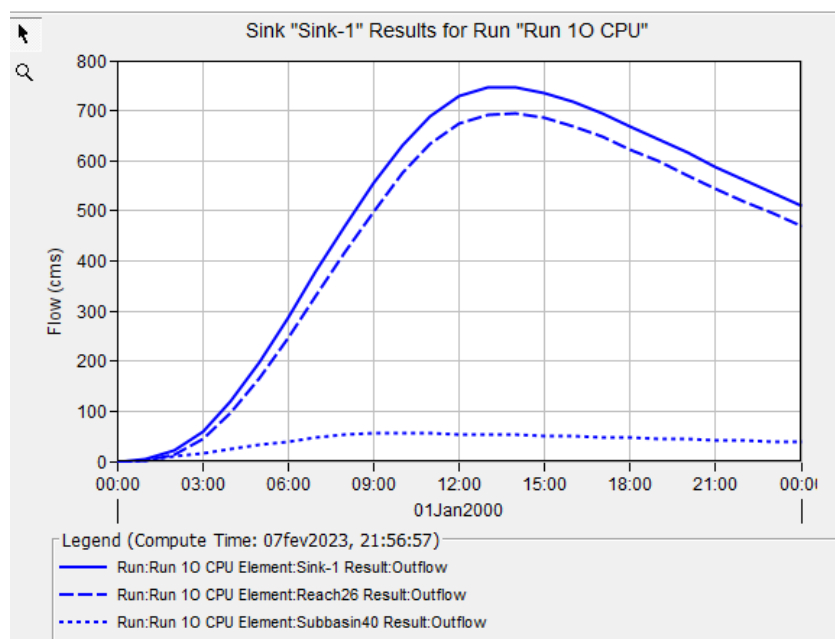


Figura 16 – Hidrograma de cheia para o período de retorno de 10 anos

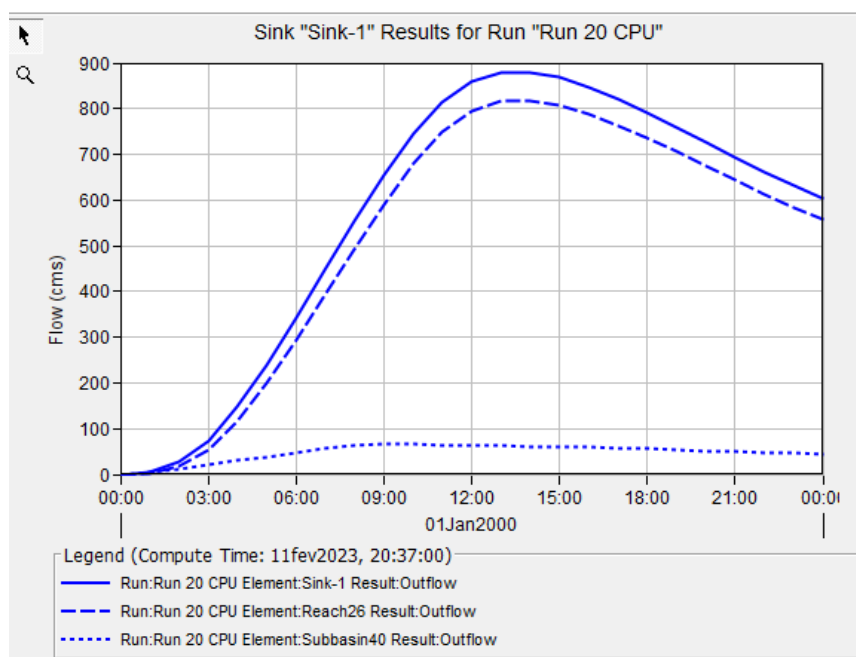


Figura 17- Hidrograma de cheia para o período de retorno de 20 anos.

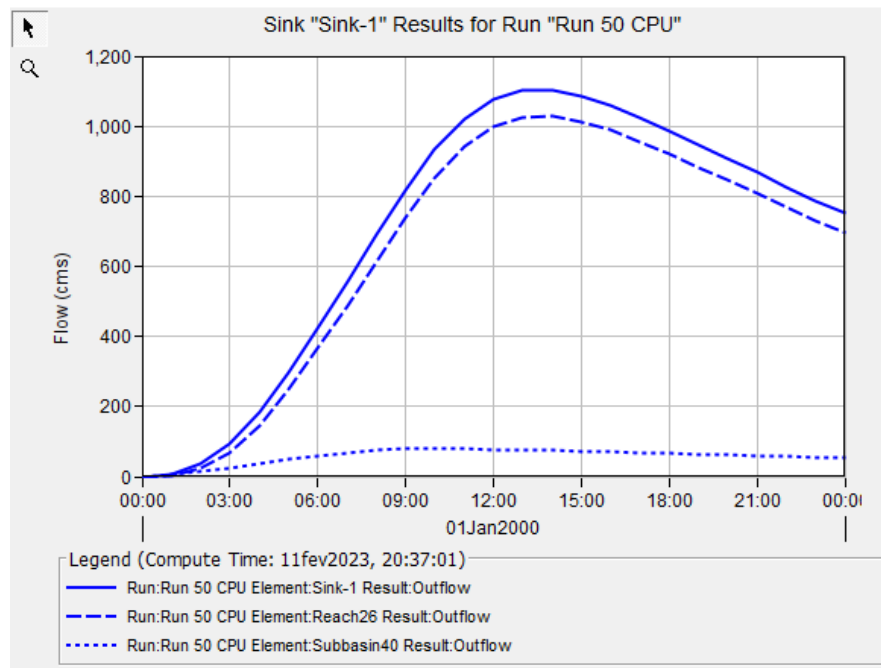


Figura 18 - Hidrograma de cheia para o período de retorno de 50 anos

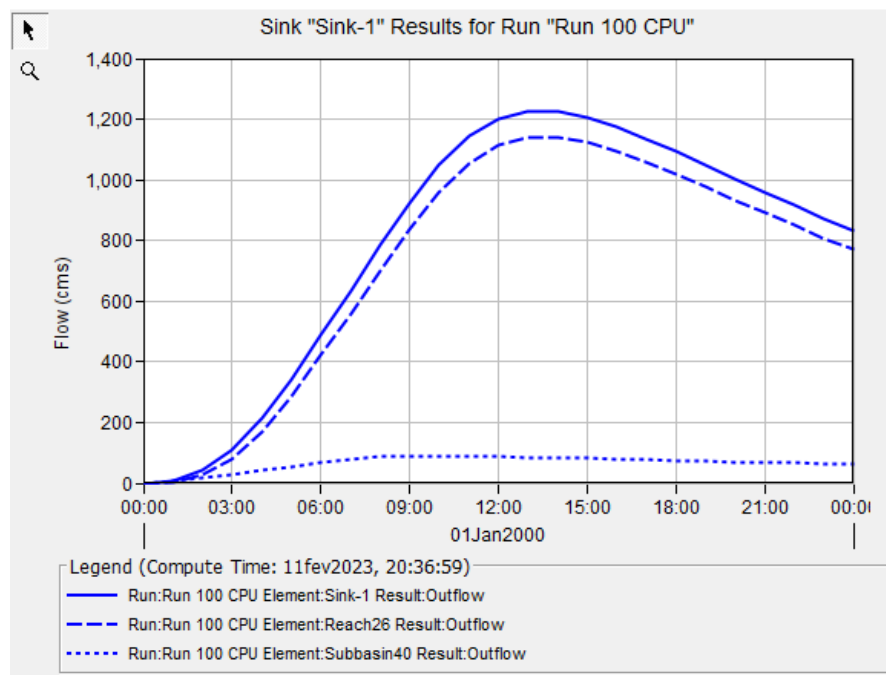


Figura 19 - Hidrograma de cheia para o período de retorno de 100 anos

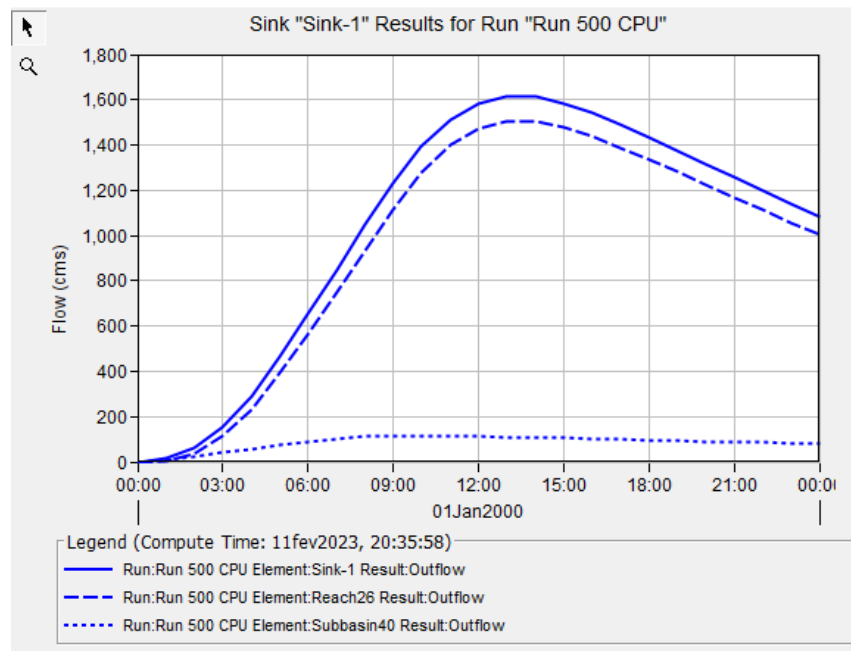


Figura 20 - Hidrograma de cheia para o período de retorno de 500 anos

4.4. Modelação hidráulica

Através da metodologia apresentada, foi possível elaborar cartas de zonas inundáveis para o caso de estudo, para os vários períodos de retorno analisados anteriormente. Para a elaboração das cartas foi necessário recorrer ao software HEC-RAS.

Como tal, o mapeamento das planícies de inundação através de um SIG consiste na relação entre o Modelo Digital de Terreno (MDT) da área em estudo e dos perfis com o nível de água dos eventos de cheia, para diferentes probabilidades de excedência. Uma vez mais, importa referir que o MDT utilizado no presente estudo não possui uma resolução espacial capaz de produzir mapas de inundação com a precisão desejada.

Foi seleccionado um troço do rio Tâmega, mais concretamente o troço que atravessa a cidade de Amarante com 4,8 km de extensão (Figura 21). A geometria do mesmo foi elaborada através da extensão RAS Mapper, tal como explicado na

metodologia, e com recurso á carta de uso e ocupação do Solo (CAO) de modo a obter uma geometria mais precisa do troço em estudo, representada na Figura 22.

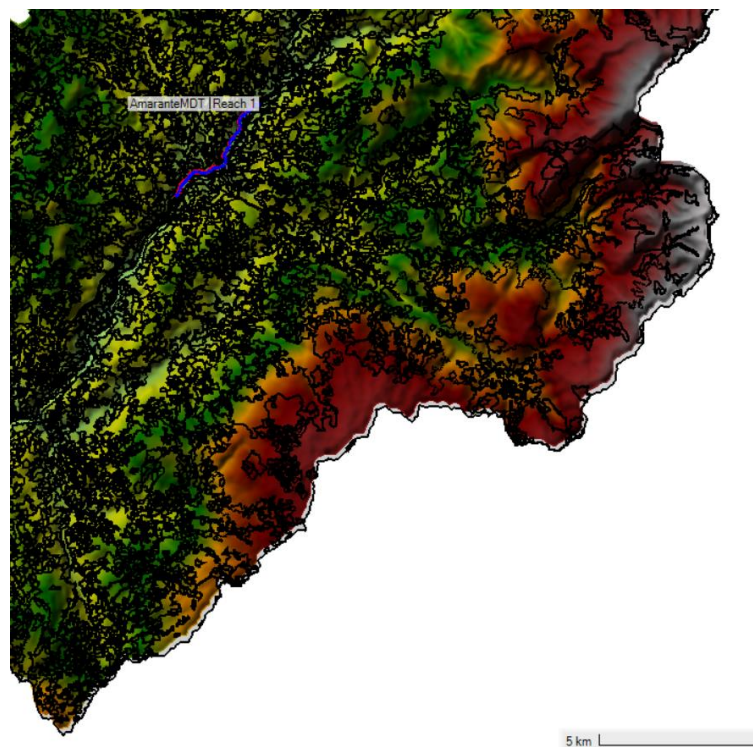


Figura 21- Troço do rio Tâmega selecionado para análise hidráulica, HEC-RAS

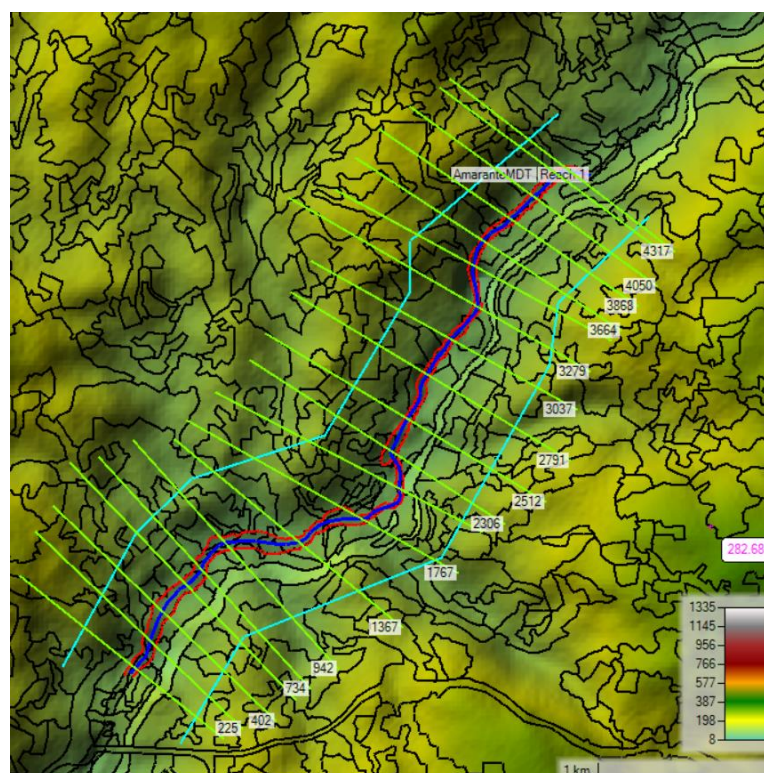


Figura 22- Geometria do troço selecionado, HEC-RAS

Uma correta geometria do troço em estudo é de extrema importância para a simulação. Dentro das etapas da mesma, a definição dos perfis transversais é a mais importante.

No anexo A1 são apresentados todos os perfis transversais do troço, indicando o nível da superfície livre, altura crítica e linha de energia para os períodos de retorno analisados.

Apos a simulação, foram obtidos os mapas de inundação para a área em estudo, Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26 e Figura 27 para os períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 500 anos, respectivamente.

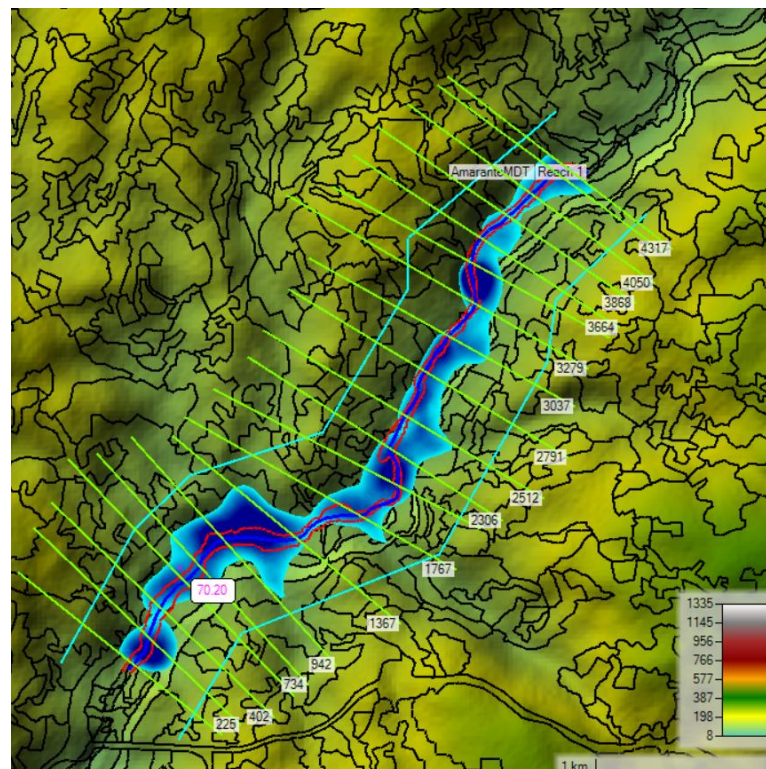


Figura 23 - Área inundada para um período de retorno de 10 anos.

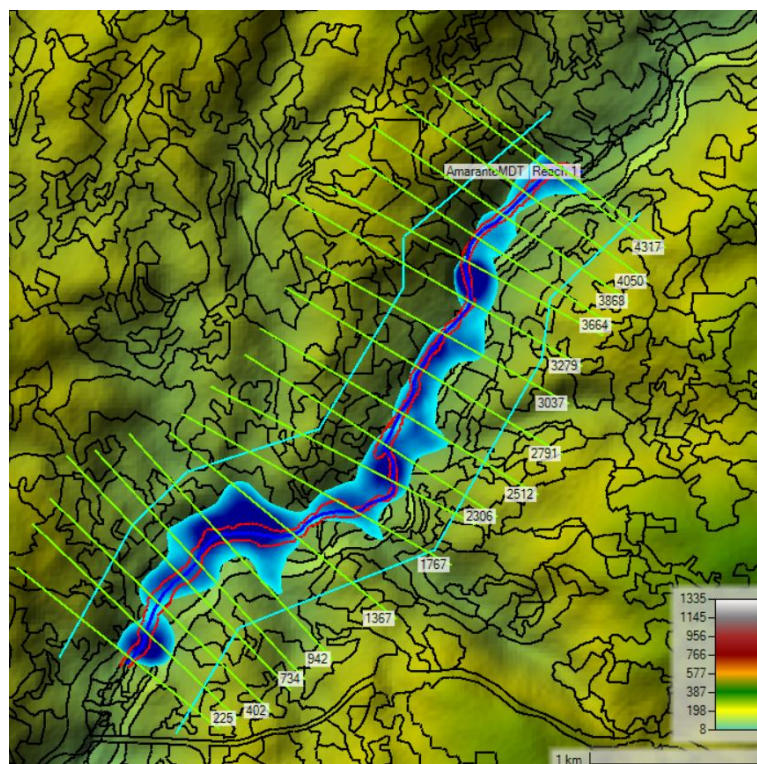


Figura 24 - Área inundada para um período de retorno de 20 anos.

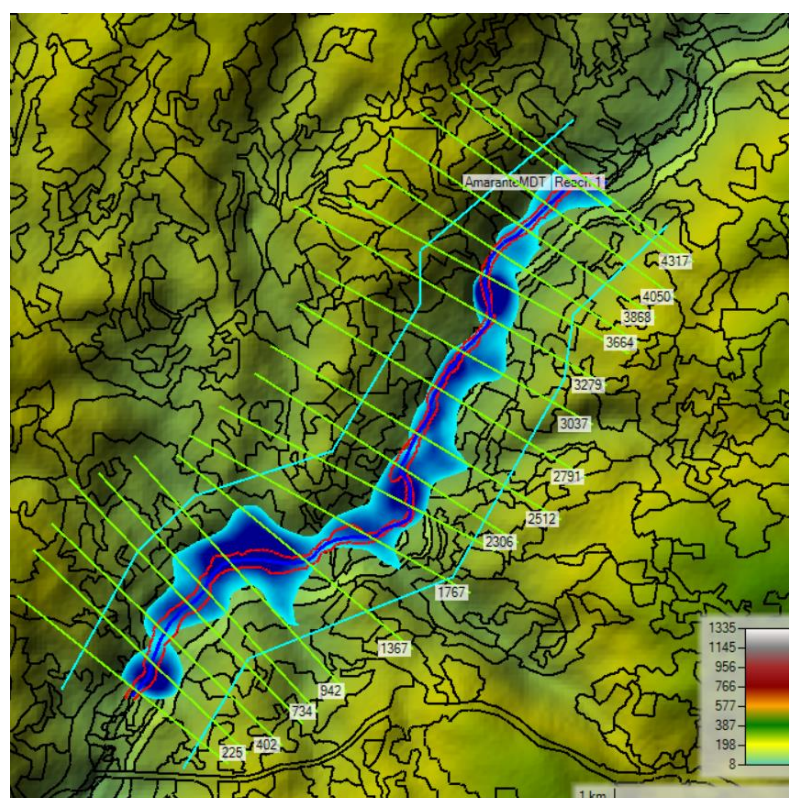


Figura 25 - Área inundada para um período de retorno de 50 anos.

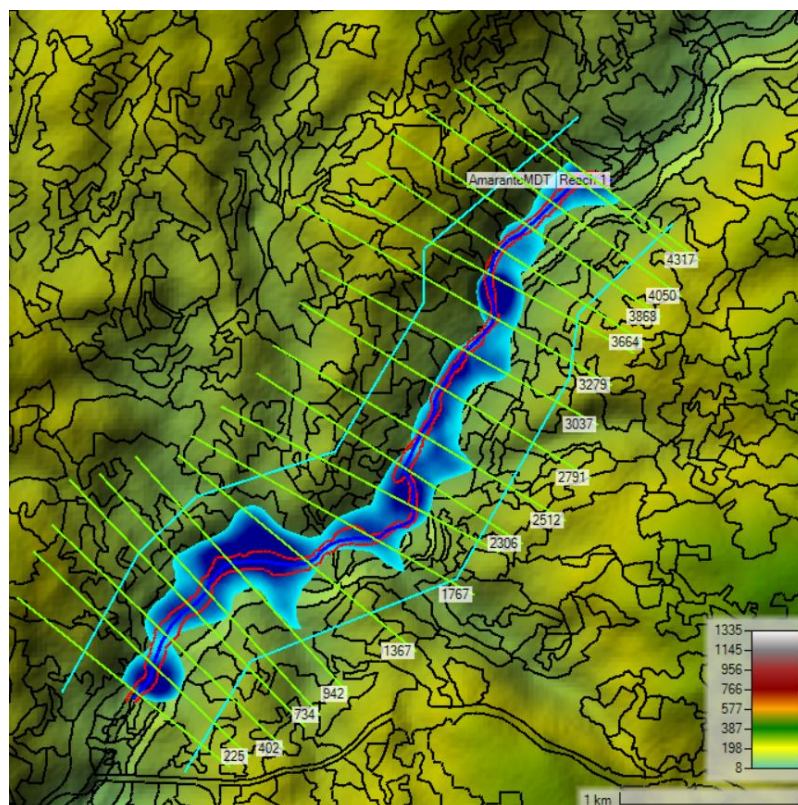


Figura 26 - Área inundada para um período de retorno de 100 anos.

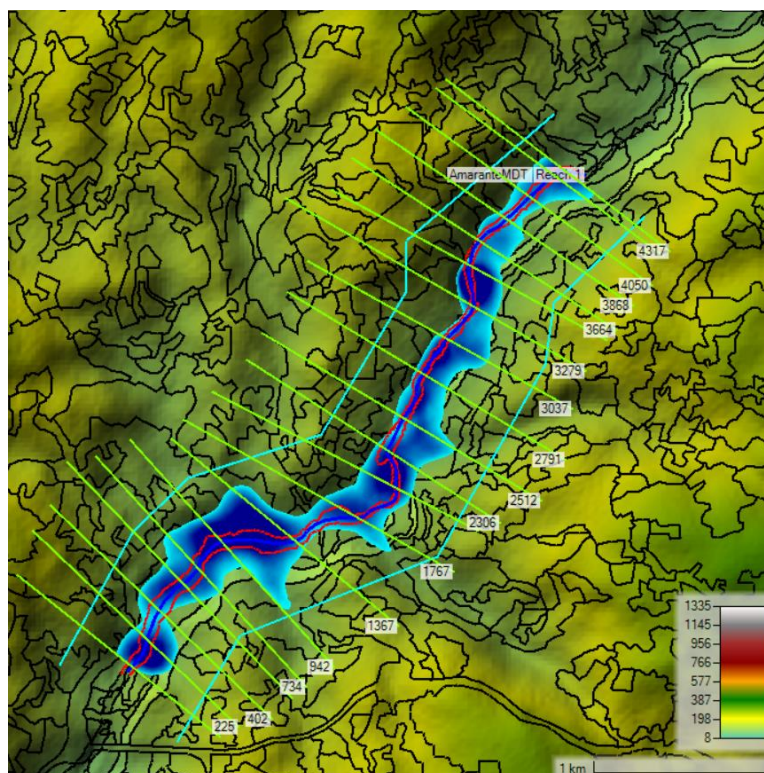


Figura 27 - Área inundada para um período de retorno de 500 anos.

Analisando as áreas de inundação para os vários períodos de retorno, observam-se diferenças pouco significativas, estes erros associados estão totalmente relacionados com o Modelo Digital de Terreno (MDT) selecionado para este estudo, a resolução de 30 metros do mesmo origina alterações não significativas nas áreas inundáveis geradas pelo software HEC-RAS para os variados valores de entrada aplicados a cada período de retorno

O traçado geométrico do troço em estudo, determinou algumas limitações no que toca à georreferenciação da Carta de Uso e Ocupação do Solo, dado que a mesma não se encontrava totalmente sobreposta ao MDT, mas sim apenas a áreas correspondentes às massas de água, representadas a cinza no RAS mapper.

De modo a obter mapas de inundação calibrados na sua totalidade, foram exportadas as *layers* obtidas pela simulação hidráulica, em formato *raster*, para o software ArcGIS, permitindo, através da extensão ArcView, gerar os mapas de zonas inundáveis para o troço em estudo. A Figura 28 ilustra o mapa de inundação obtido para o período de retorno de 10 anos.

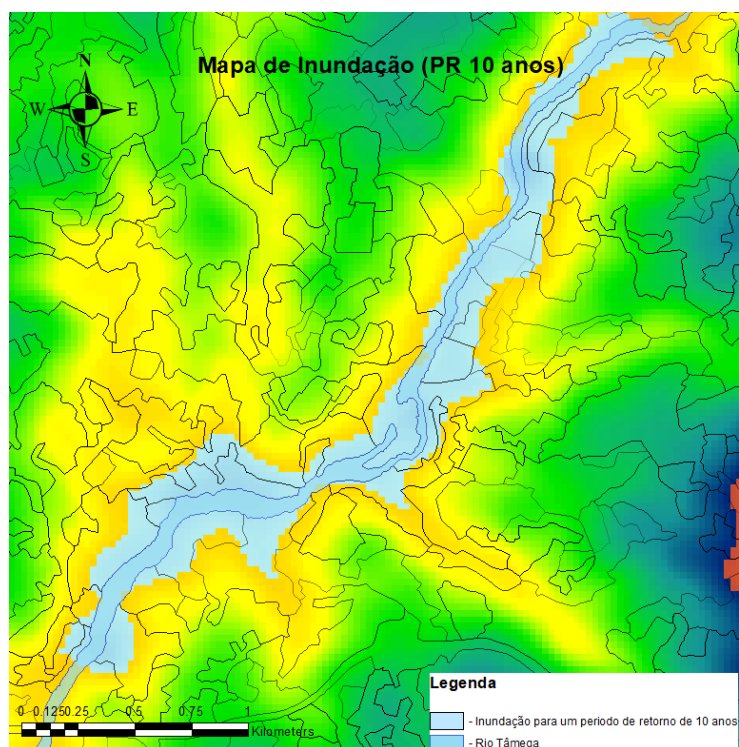


Figura 28 – Carta de zonas inundáveis para um período de retorno de 10 anos.

No anexo A2 estão representados os mapas de cheia para os diferentes períodos de retorno em estudo. É necessário referir que os ficheiros *raster*, são ficheiros

que armazenam informação em forma de matriz de pontos, assim sendo não representam os leitos de cheia com grande resolução.

5. Conclusões

Os eventos de precipitação extrema estão na origem de eventos de cheia, estes podem gerar prejuízos elevados, principalmente quando ocorrem em zonas urbanas podendo levar à perda de vidas humanas.

Assim sendo, é importante prevenir e mitigar estes efeitos, para tal, o mapeamento de áreas de risco de inundação constitui uma importante ferramenta para suporte à decisão no controlo de eventos de cheia.

O Decreto-Lei 115/2010 de 22 de Outubro, que transpõe a Diretiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de outubro de 2007, referente à gestão e avaliação dos riscos de eventos de cheia, indica a imprescindibilidade da elaboração de cartas de zonas inundáveis e cartas de risco de inundação.

O presente trabalho procurou estabelecer uma metodologia para a elaboração de mapas de inundação (e mapas de risco) utilizando como exemplo um troço do rio Tâmega, mais especificamente o troço que atravessa a cidade de Amarante

A metodologia para a elaboração dos mapas de inundação (e de risco) consistiu nas seguintes etapas: recolha de dados hidrométricos, modelação hidrológica pelo software HEC-HMS, modelação hidráulica pelo software HEC-RAS e elaboração dos mapas de zonas inundadas (mapas de risco de inundação).

A principal limitação da mesma, foi, como referido anteriormente, o Modelo Digital de Terreno (MDT) utilizado. De facto, a definição dos mapas de inundação é dependente da pormenorização topográfica disponível. A impossibilidade de utilizar um MDT com uma resolução mais detalhada, não invalida o processo metodológico, embora condicione, de forma significativa, a validade dos seus resultados.

Utilizando o software HEC-HMS, é gerada, o mais pormenorizadamente possível e face aos dados disponíveis, a rede hidrográfica, possibilitando a obtenção dos caudais de ponta de cheia para os períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 500 anos.

Recorrendo ao Software HEC-RAS, e após a caracterização do troço em análise, são obtidos os resultados da simulação dos leitos de cheia para os períodos de retorno definidos. Estes resultados, em forma de *layer*, foram posteriormente inseridos no Software ArcGIS de modo a obter as cartas de zonas inundáveis, apesar das limitações reconhecidas, em resultado da resolução do MDT utilizado.

A metodologia aplicada mostrou-se suficiente para a elaboração de um estudo hidrológico e hidráulico de uma bacia hidrográfica, com base na informação disponível,

pretendendo-se que a mesma constitua um elemento de suporte à avaliação do risco de inundação.

Ao longo do trabalho realizado, conclui-se igualmente que as inundações de origem fluvial de carácter natural, não são apenas consequência de eventos de precipitação extrema, mas também por um conjunto de outros fatores. As características geomorfológicas da bacia e influência antropogénica são alguns desses fatores que condicionam estes eventos extremos.

6. Referências bibliográficas

APA. Elaboração de cartografia específica sobre o risco de inundação para Portugal continental. Relatório Final – Vol. 1. Agência Portuguesa do Ambiente. 2014

APA. Plano Nacional da Água. Caracterização dos recursos hídricos e suas utilizações, enquadramento legal dos planos e balanço do 1º ciclo. Agência Portuguesa do Ambiente. 2015

APA. Plano de Gestão dos Riscos de Inundações. Região Hidrográfica 3 – Douro. Agência Portuguesa do Ambiente. 2015

APA. Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Douro: Relatório de Base, Parte 2 - Caracterização e diagnóstico da região hidrográfica. Agência Portuguesa do Ambiente. 2016

Brandão, C. Análise de precipitações intensas. Tese de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 1995

Brandão, C., R. Rodrigues, e J. da Costa. Análise de fenómenos extremos de precipitações intensas em Portugal Continental. Direção dos Serviços de Recursos Hídricos. Instituto da Água, I.P. 2021

Barredo, J. Major flood disasters in Europe: 1950–2005. Nat. Hazards, Vol.42, pp 125-148. 2007

Brunner, G. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. USACE, 2010

Chambel-Leitão, P., Oliveira, A. R., Galvão, P., Leitão, J. Sistema operacional de previsão de caudais para apoio à gestão hidroelétrica, 13º Congresso da água. 2016

Chow, V. T., D. Maidment, e L. Mays, - Applied Hydrology. McGraw-Hill International Editions. Civil Engineering series. 1988

Chow, V. T. Hydrologic Studies of Floods in the United States. Internat. Assoc. Sci. Hydrol., Vol. 42, 134-170. 1956

Corrêa, M. Contribuição para avaliação e gestão de riscos de inundações. Caso de estudo: bacia hidrográfica do rio Nabão. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa 2013

Costa, F. S. A importância dos processos morfogenéticos no ordenamento urbano - O caso de Amarante. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Letras da Universidade do Porto. 1998

Costa, F. S. As cheias urbanas em Amarante – o caso da cheia do rio Tâmega em 2001. Actas do 7º congresso da Água, pp. 1-24, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 2004

Douben, K. J. Characteristics of river floods and flooding: a global overview, 1985–2003. Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage, 55 (S1), S9-S21. 2006

Di Baldassarre, G. Floods in a Changing Climate: Inundation Modelling. Cambridge University Press, pp. 105, 2012

EM-DAT. The International Disaster Database. 2022. <http://www.emdat.be/> (acedido em maio de 2022)

EEA. Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe an overview of the last decade. European Environment Agency, 2010.

EEA. European Environment Agency. 2012b. <http://www.eea.europa.eu/dataXandXmaps/figures/naturalXdisastersXinXeeaXmemberX1> (Acedido em maio de 2022).

EEA. European Waters status and future challenges a synthesis. European Environment Agency, 2012a.

EEA. Floods vulnerability, risks and management. Technical Paper, European Environment Agency, 2012c.

HEC. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual. Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers. 2002

Julião, R P, Nery, F. Ribeiro J. Castelo, m. Zêzere, J. Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal. Autoridade Nacional de Proteção Civil, 2009

Kron, W. Flood Risk = Hazard x Values x Vulnerability. Water International, Vol. 30 pp. 58-68. 2005

Leal, M. Cheias e inundações urbanas: tipos, características e danos materiais. Água e Território: um tributo a Catarina Ramos. 2019

Martins, F. J. P. Dimensionamento hidrológico e hidráulico de passagens inferiores rodoviárias para águas pluviais. Dissertação de Mestrado. Instituto Politécnico de Viseu. 2000

Pedrosa, A. S. e Costa, F. S. As cheias do Rio Tâmega. O caso da área urbana de Amarante. Territorium 6. pp. 78-249. 1999

Perry, C. A. Significant floods in the United States during the 20th Century - USGS measures a century of floods. U.S. Geological Survey. 2000

Ramos, C. Condições geomorfológicas e climáticas das cheias da Ribeira de Tera e do Rio Maior (bacia hidrográfica do Tejo). Tese de doutoramento, Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa. 1994

Ramos, C. Os recursos hídricos. In C. A. Medeiros (Ed.), Geografia de Portugal (Vol. II, pp. 495). 2005

Ramos, C. Programa de Hidrogeografia. Lisboa: Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa. 2005b)

Ramos, C. Dinâmica Fluvial e Ordenamento do Território (Programa de unidade curricular do 2º Ciclo), Dinâmicas, mudanças ambientais e ordenamento do território: Centro de Estudos Geográficos/Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa. 2009

Ramos, C., e Reis, E. As cheias no sul de Portugal em diferentes tipos de bacias hidrográficas. Finisterra, XXXVI (71), pp 61-82. 2001

Ramos, C. Perigos naturais devidos a causas meteorológicas: o caso das cheias e inundações. e-LP Engineering and Technology Journal. Vol 4 2013

Rodrigues, R. Brandão, C. Pinto da Costa, J. As Cheias no Douro ontem, hoje e amanhã, congresso da Água, 43-44. INAG. Lisboa. 2003

Rodrigues, C. M. M. Avaliação da Qualidade Ecológica do Rio Ferreira Nos Concelhos de Valongo e Gondomar. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. 2010

Schanze, J. Flood risk management - A basic framework. In J. Schanze, E. Zeman, & J. Marsalek (Eds.), Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures. Vol. 67, pp. 1-20. Springer Netherlands. 2006

SCS. Drainage of Agricultural Land: A Practical Handbook for the Planning, Design, Construction, and Maintenance of Agricultural Drainage Systems. Water Information Center, Soil Conservation Service US Department of Agriculture, and United States. Soil Conservation Service. Cartographic Division, 1973.

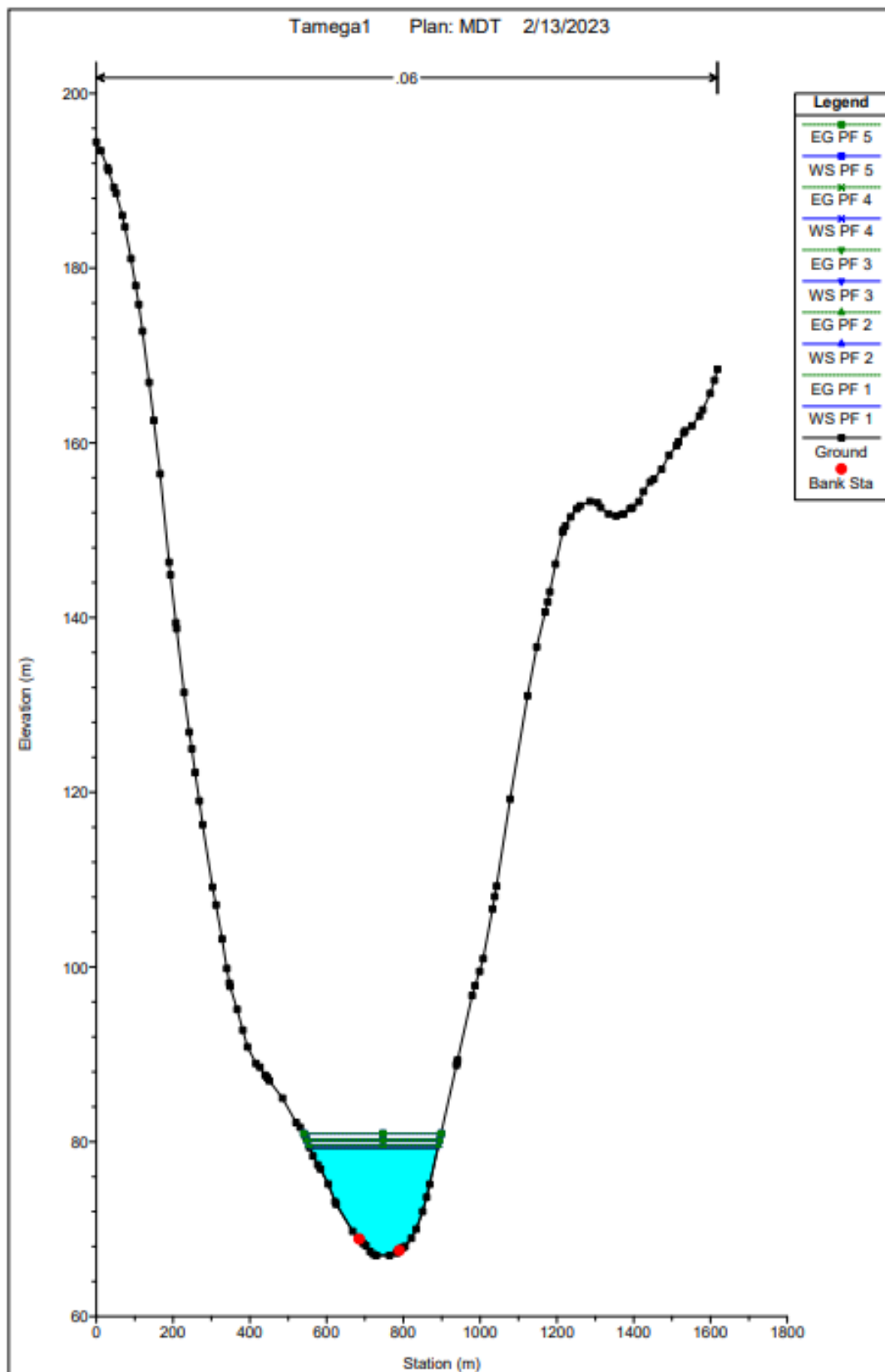
Wilson, W. E. Moore, J. E. Glossary of hydrology. Amer Geological Institute, 1998.

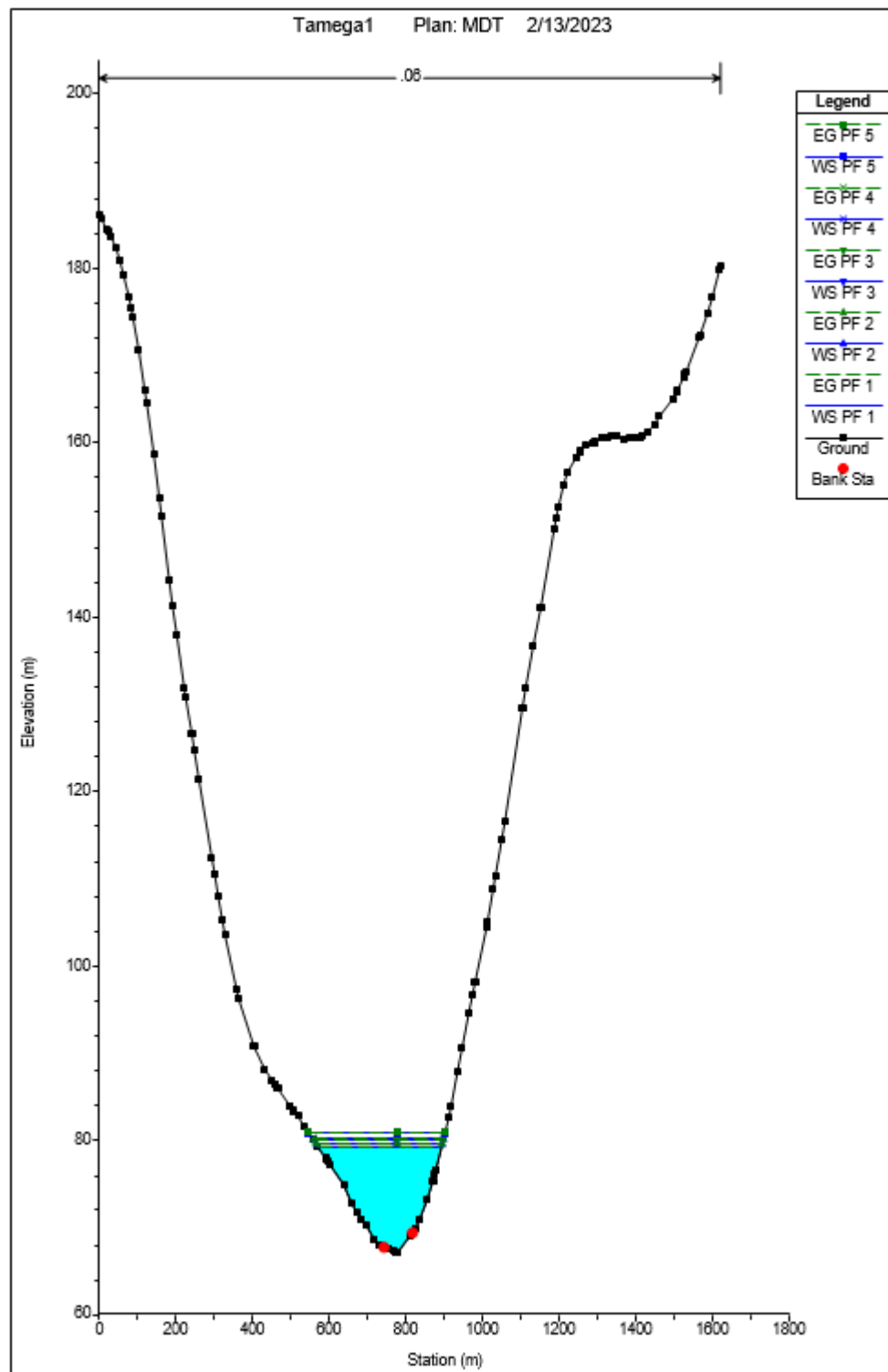
Viseu, T. Segurança dos vales a jusante de barragens – metodologias de apoio à gestão dos riscos. Tese de doutoramento – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2006

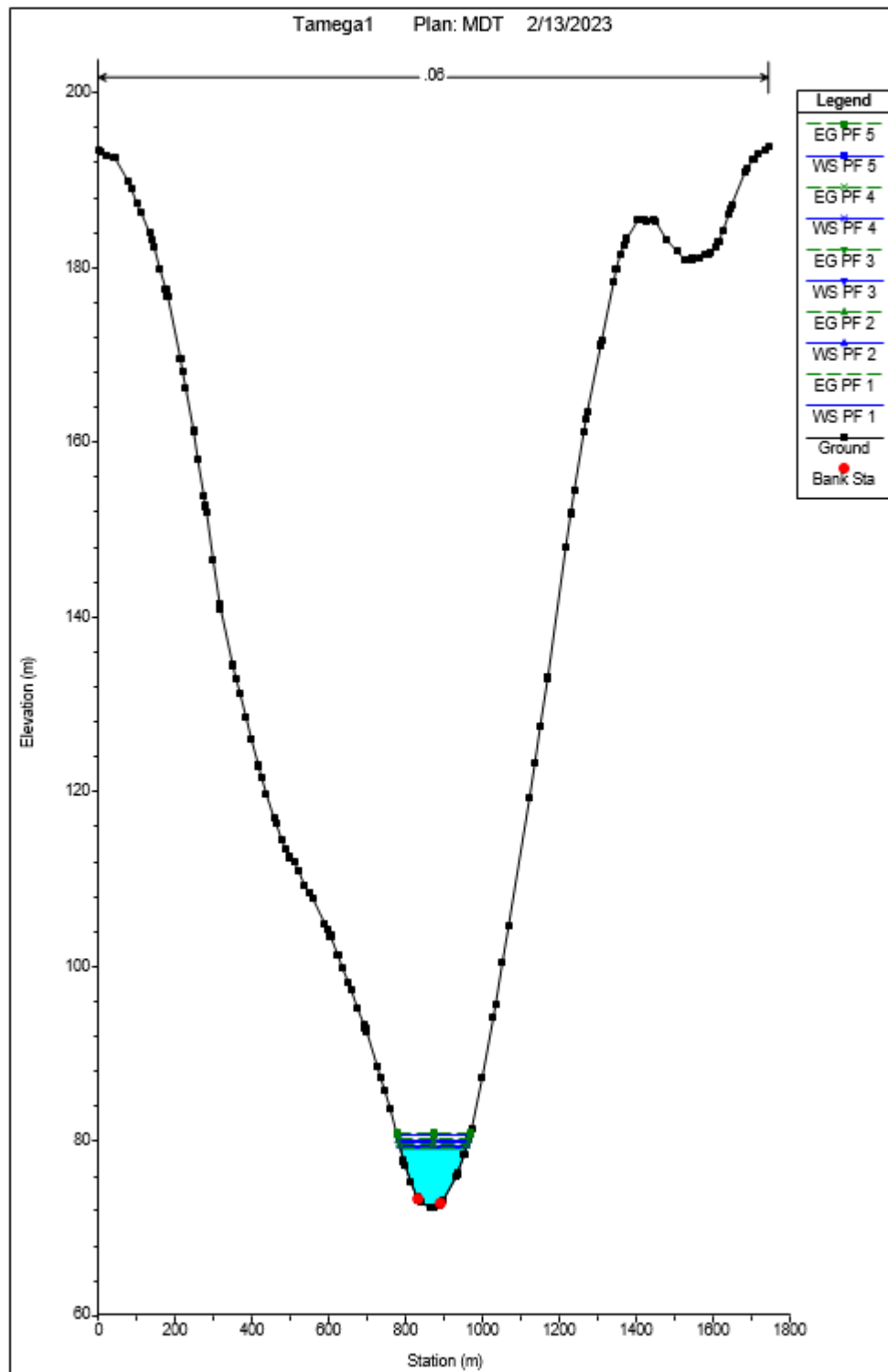
Zêzere, J., Pereira A. e Morgado, P. Perigos Naturais e Tecnológicos no Território de Portugal Continental. Centro de Estudos Geográficos, Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa. 2006

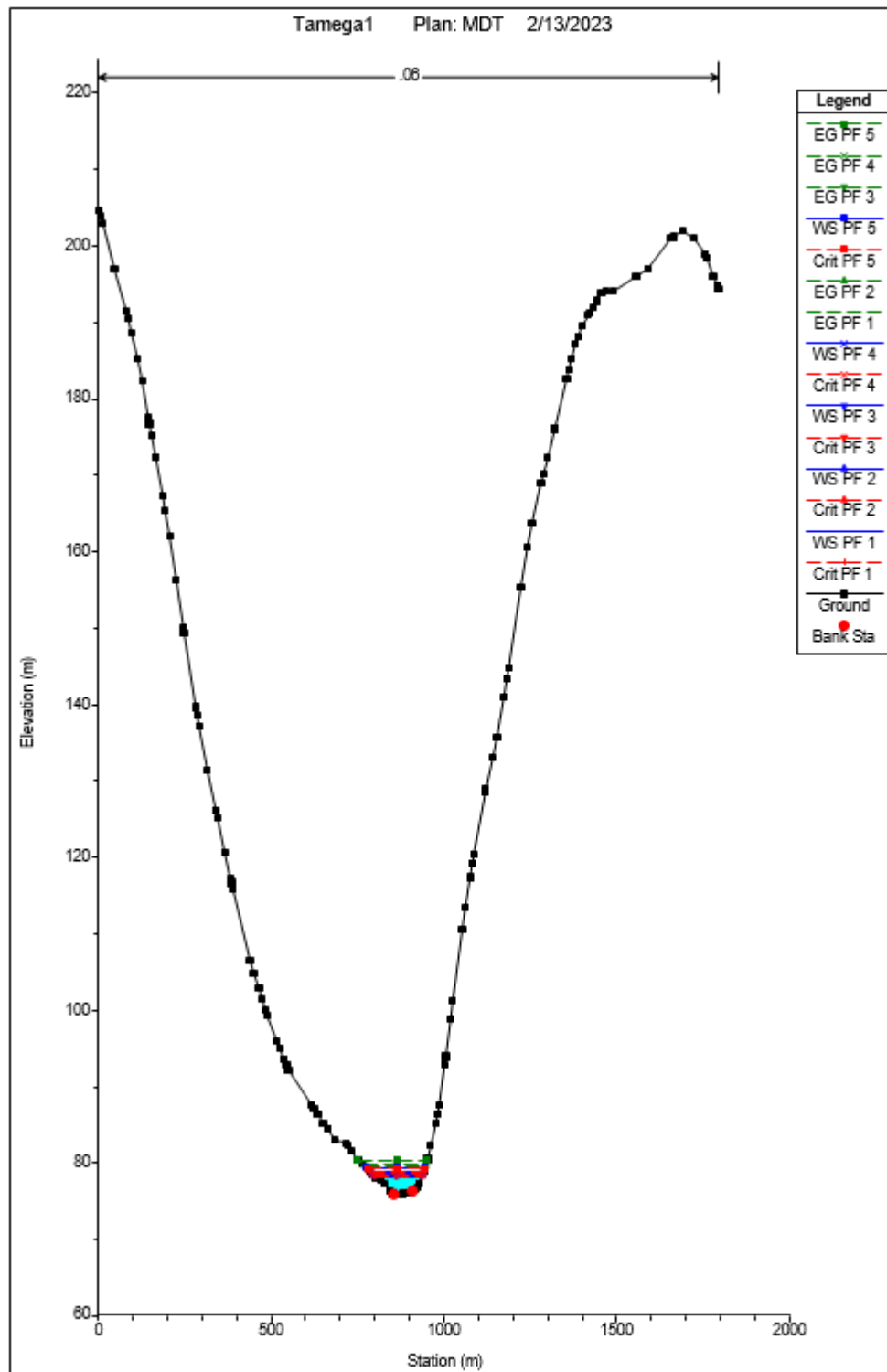
A1

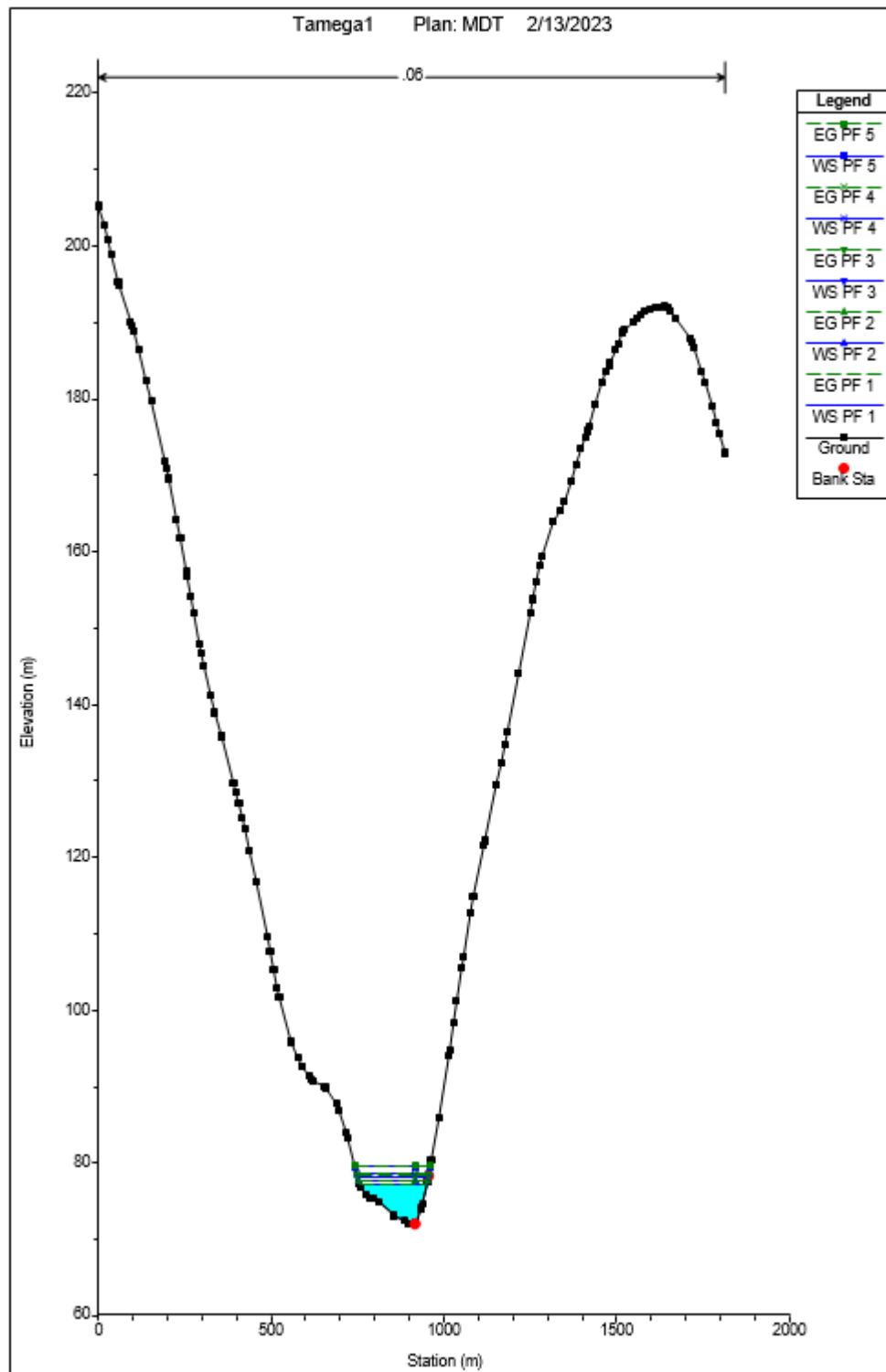
PERFIS TRANSVERSAIS DO ESCOAMENTO

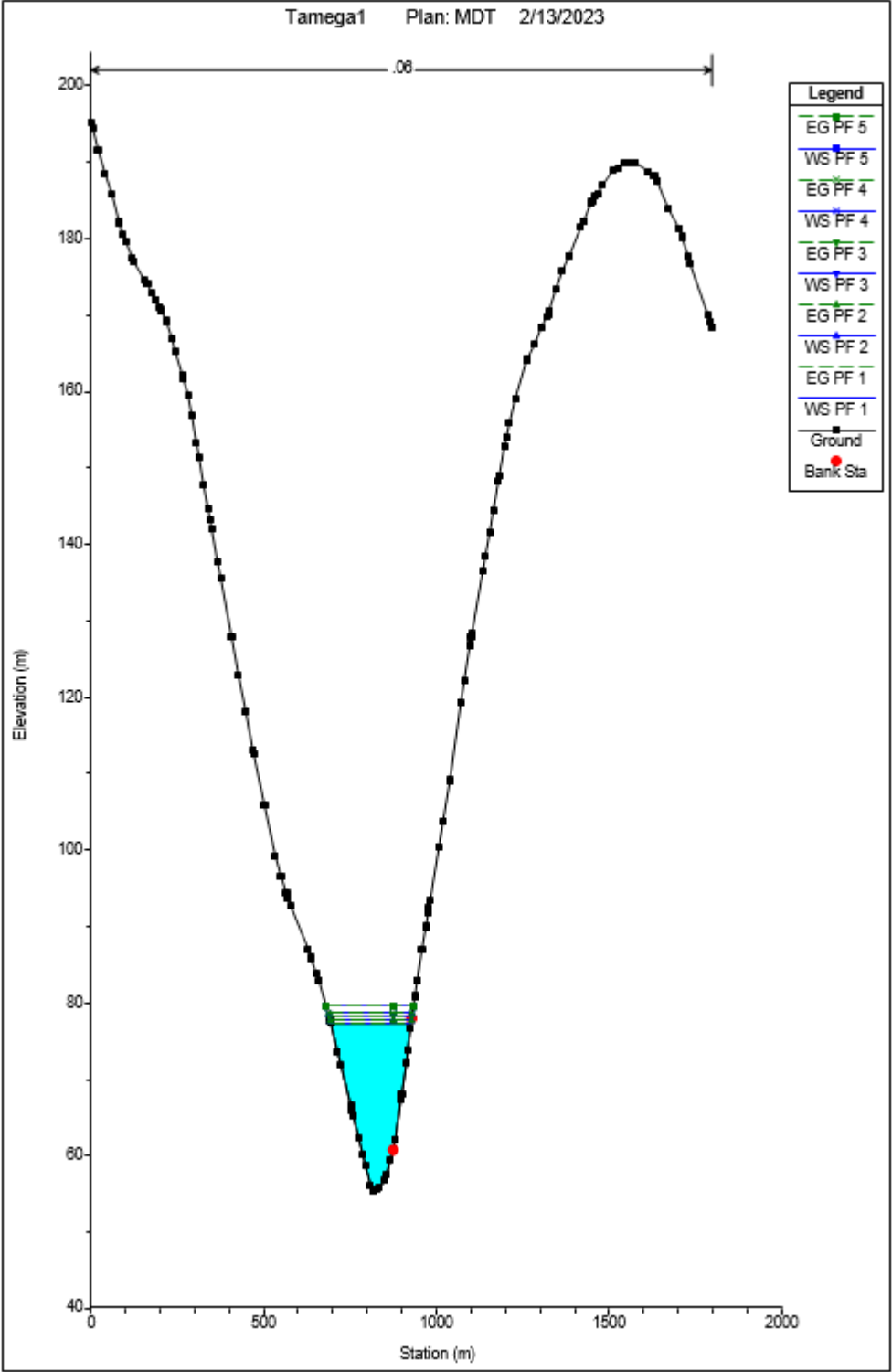


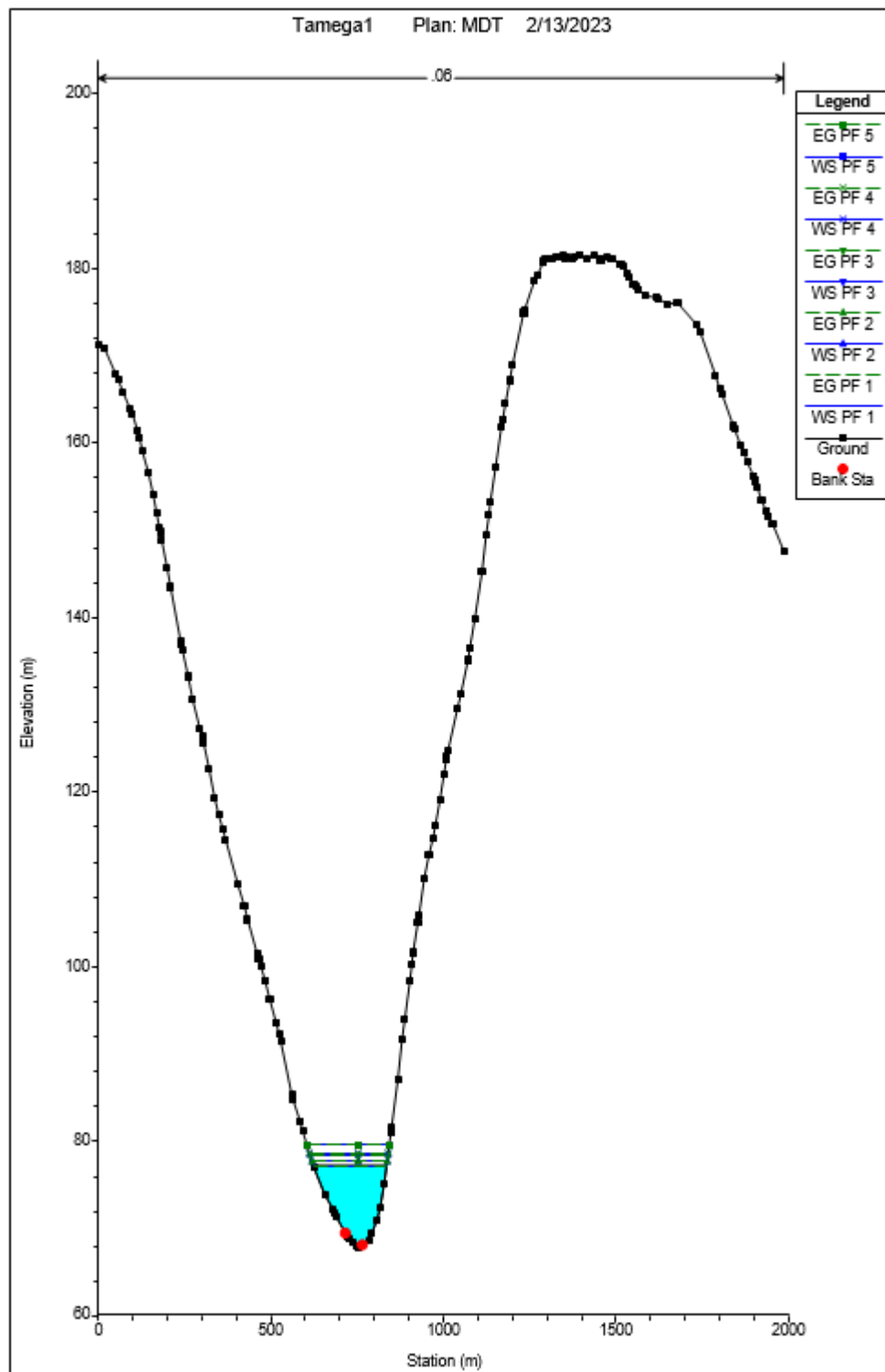


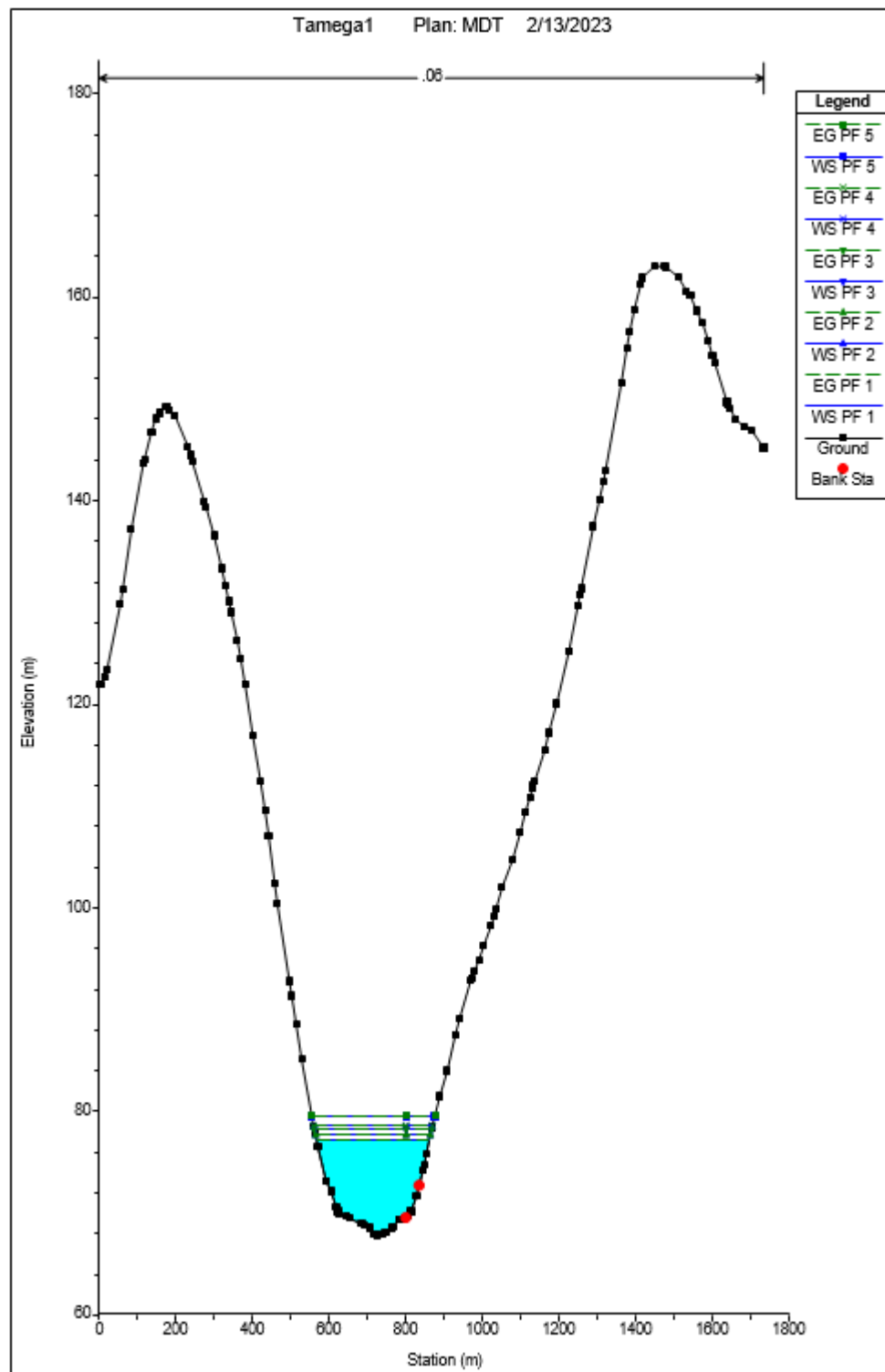


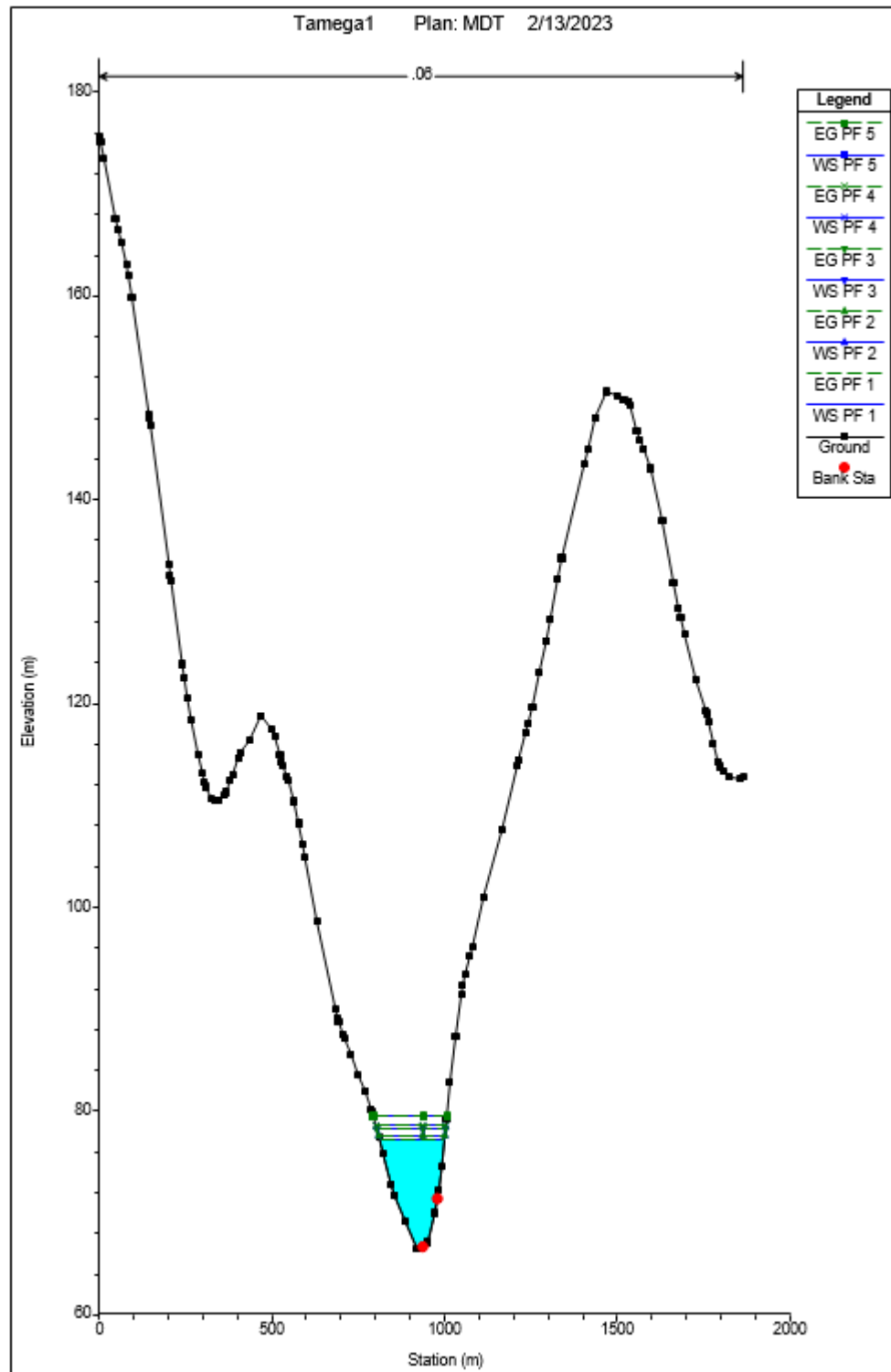


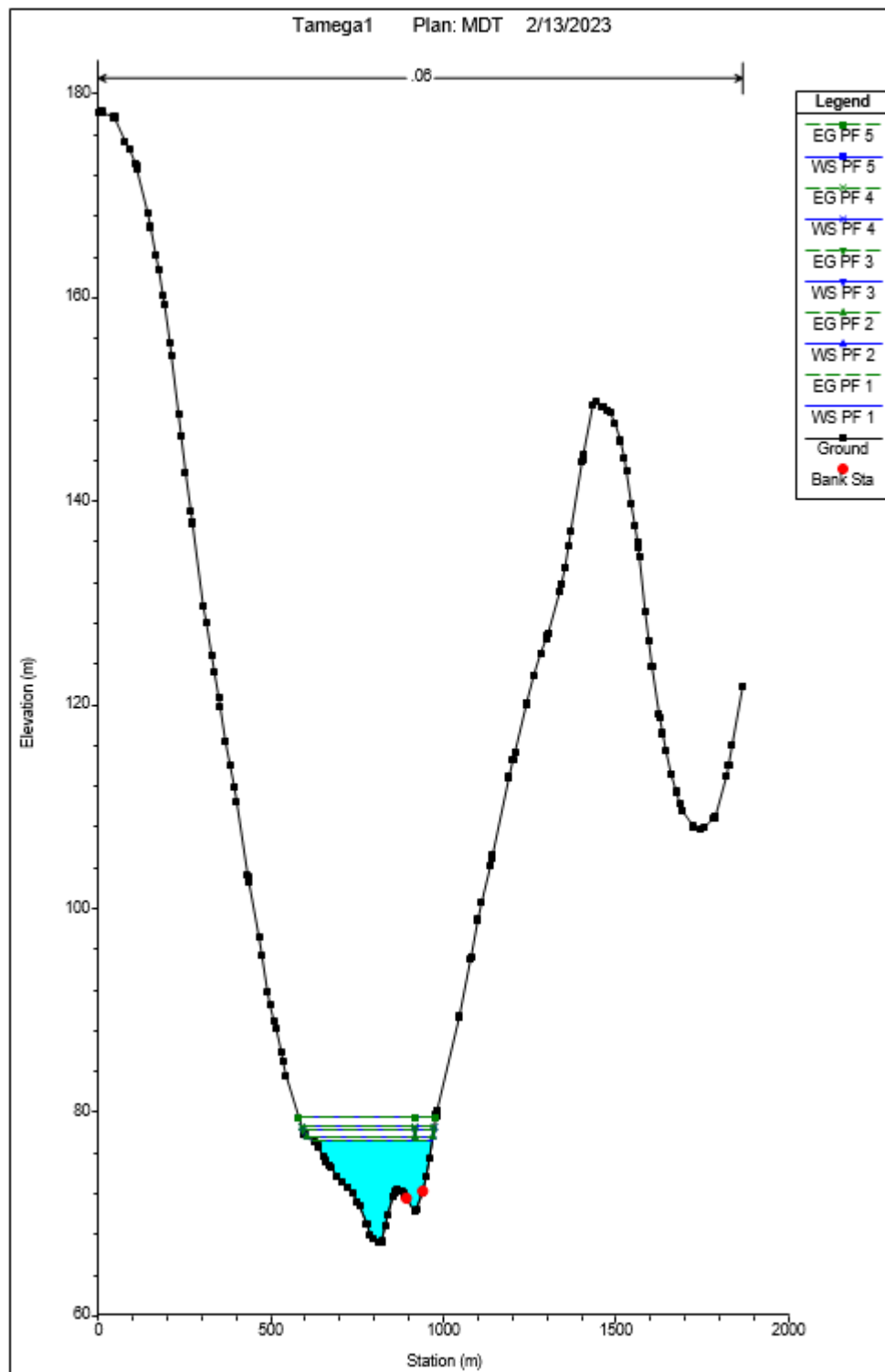


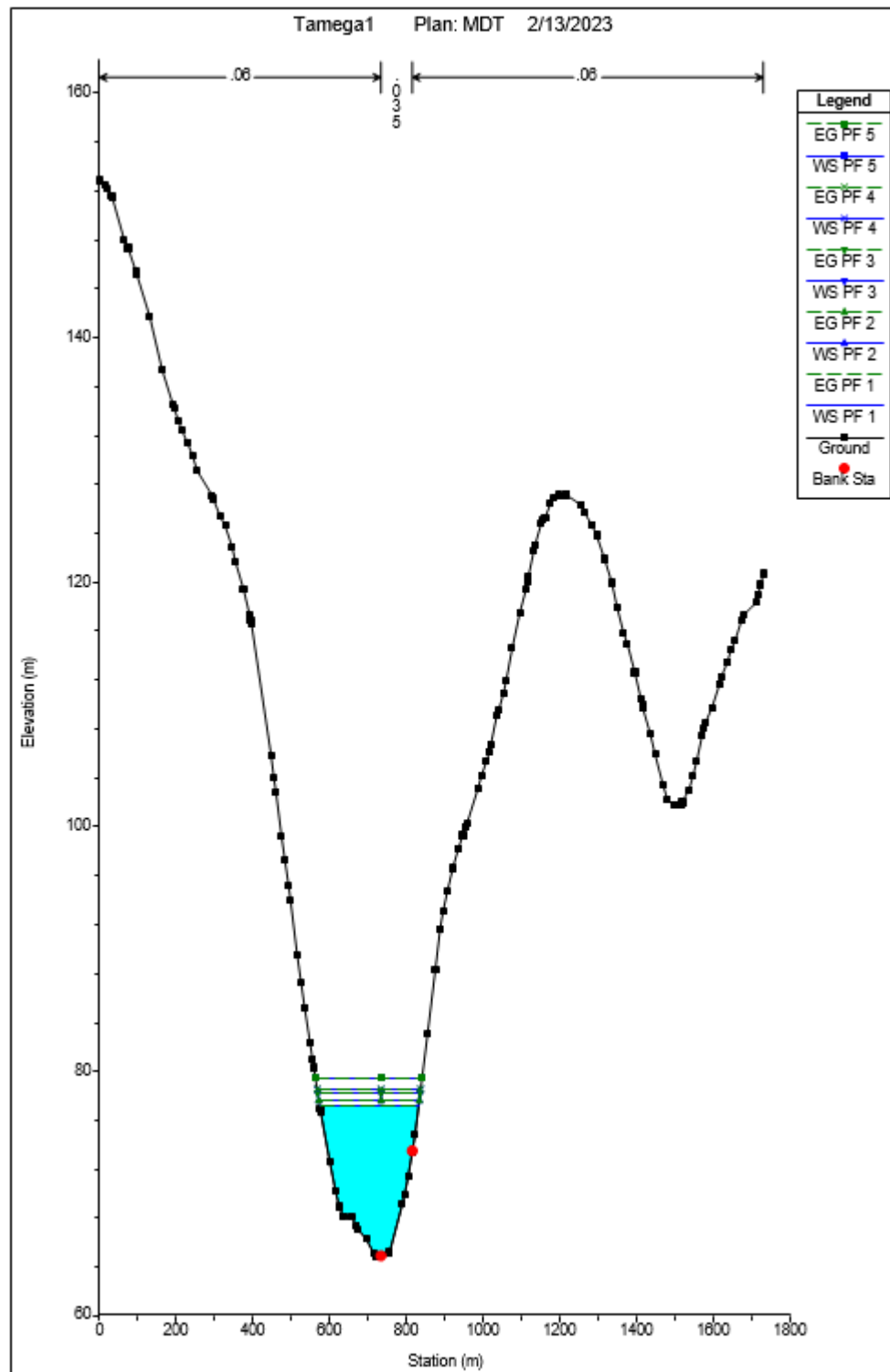


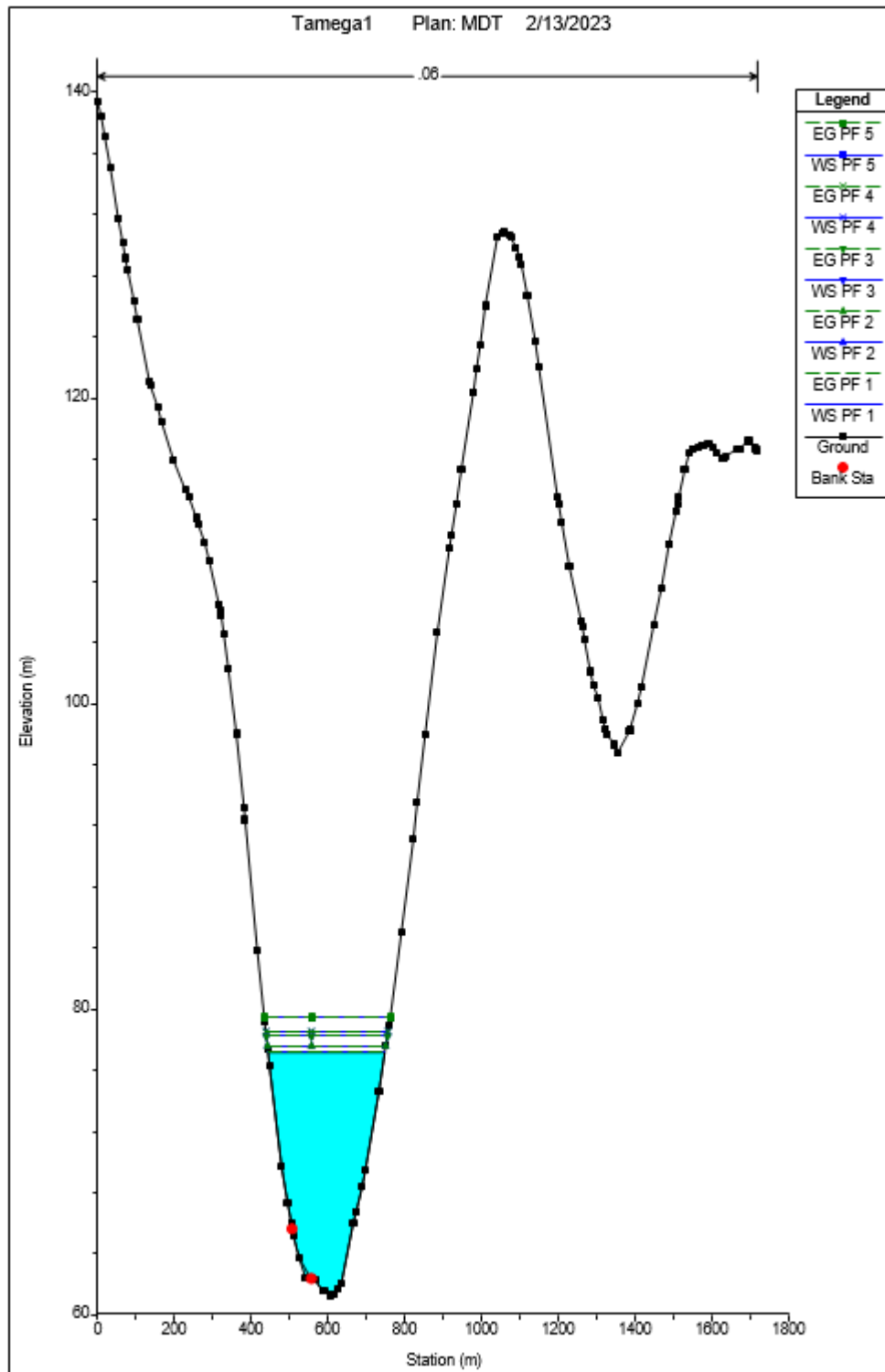


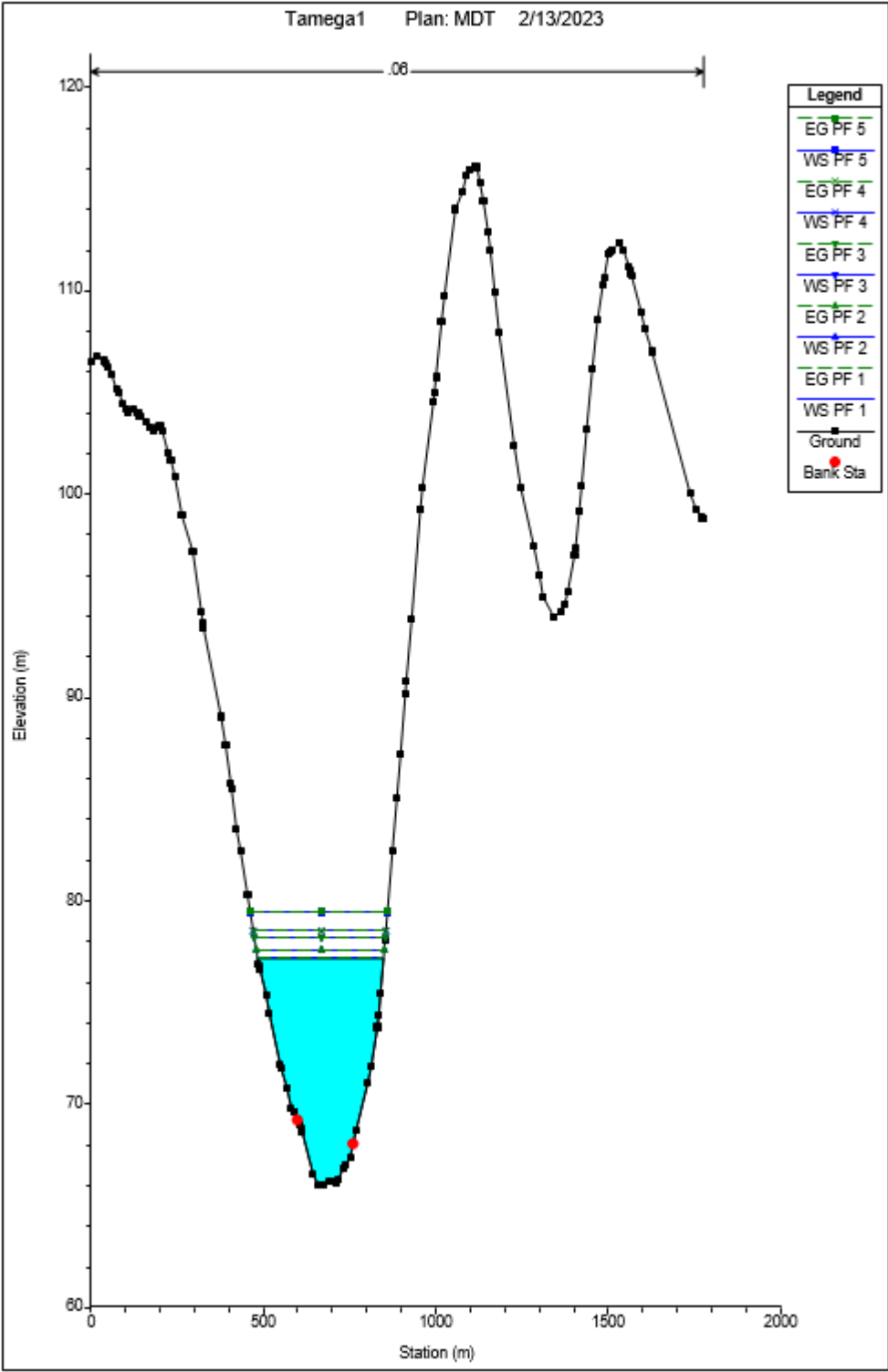


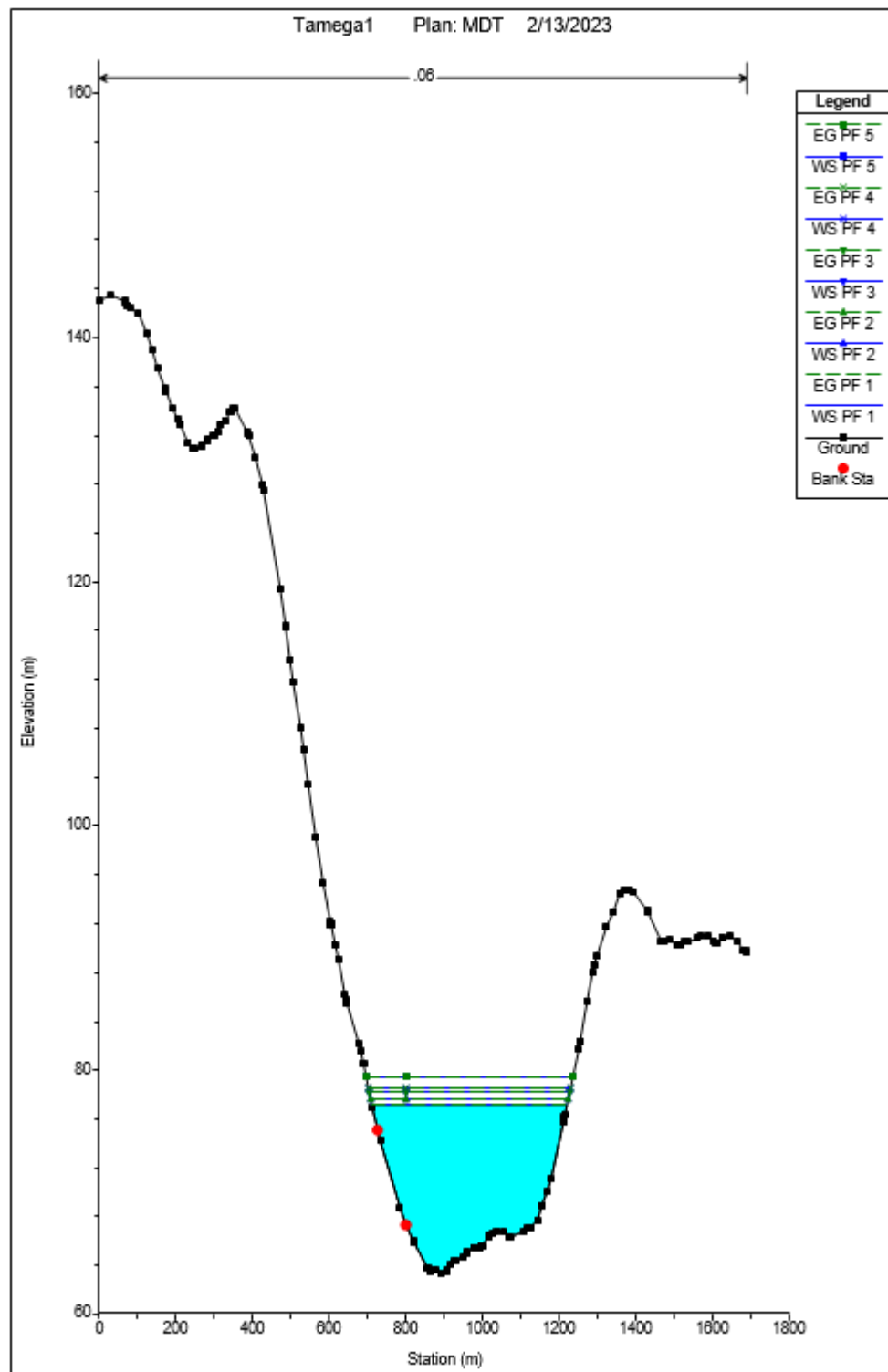


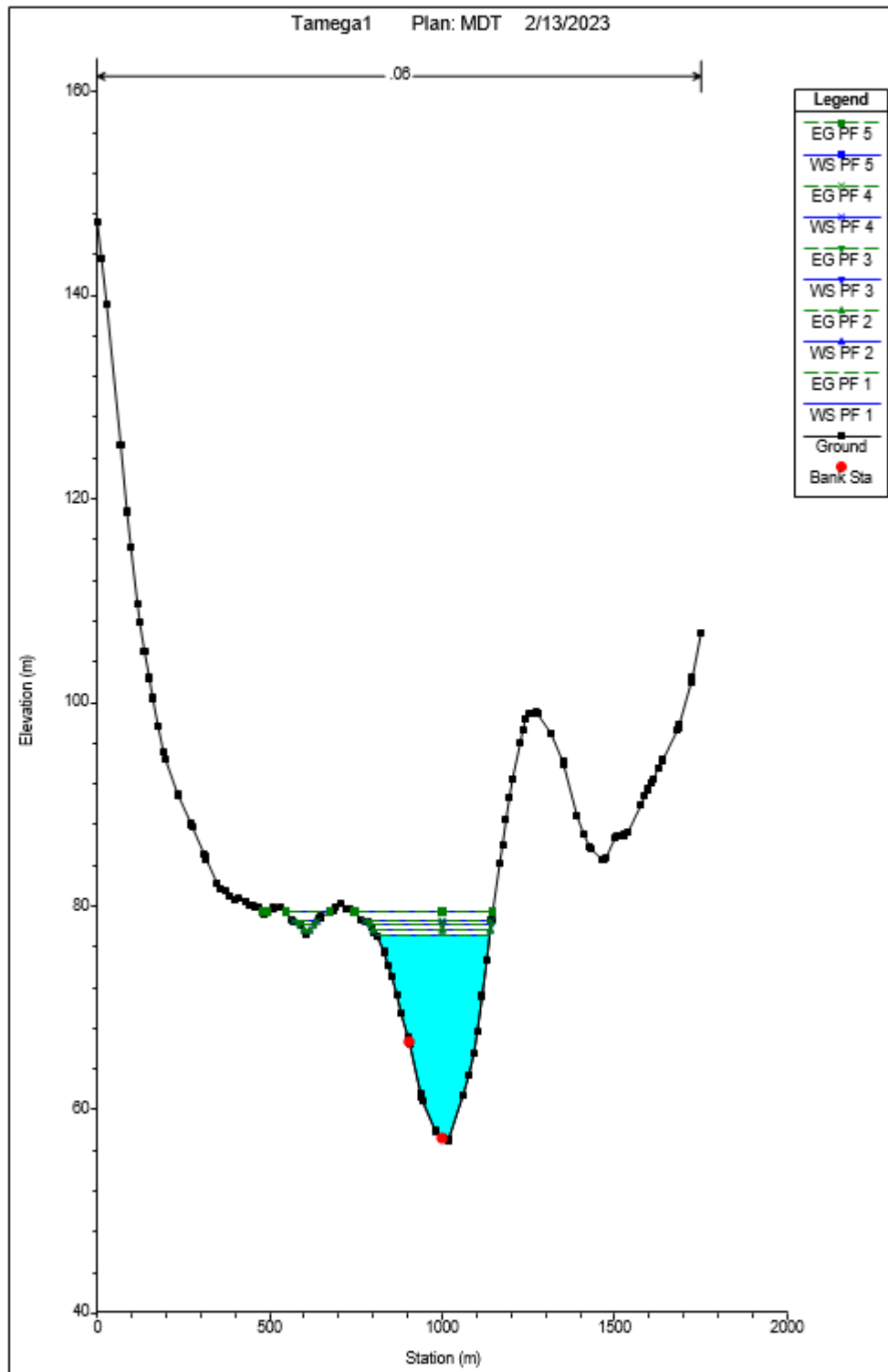


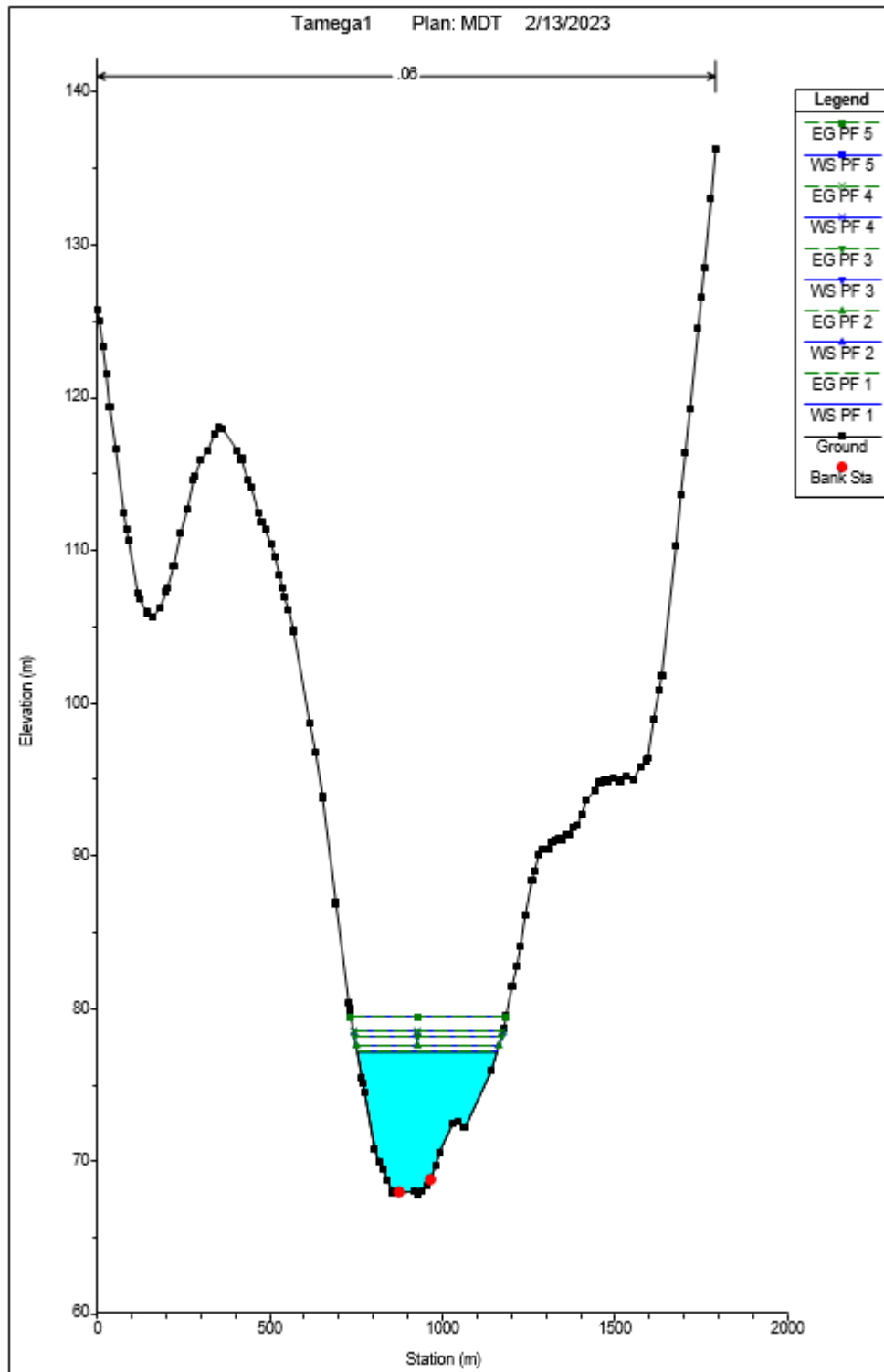


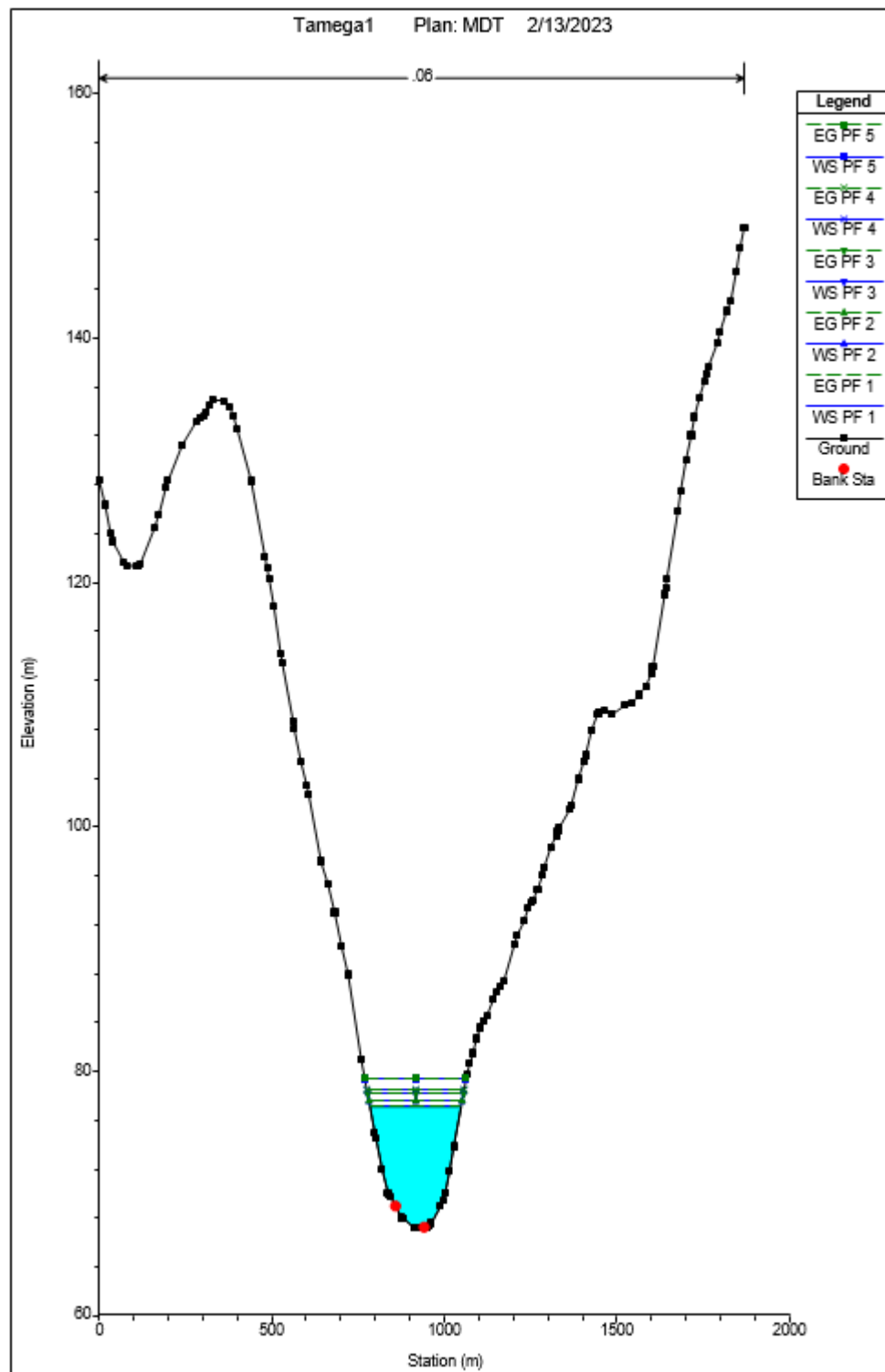


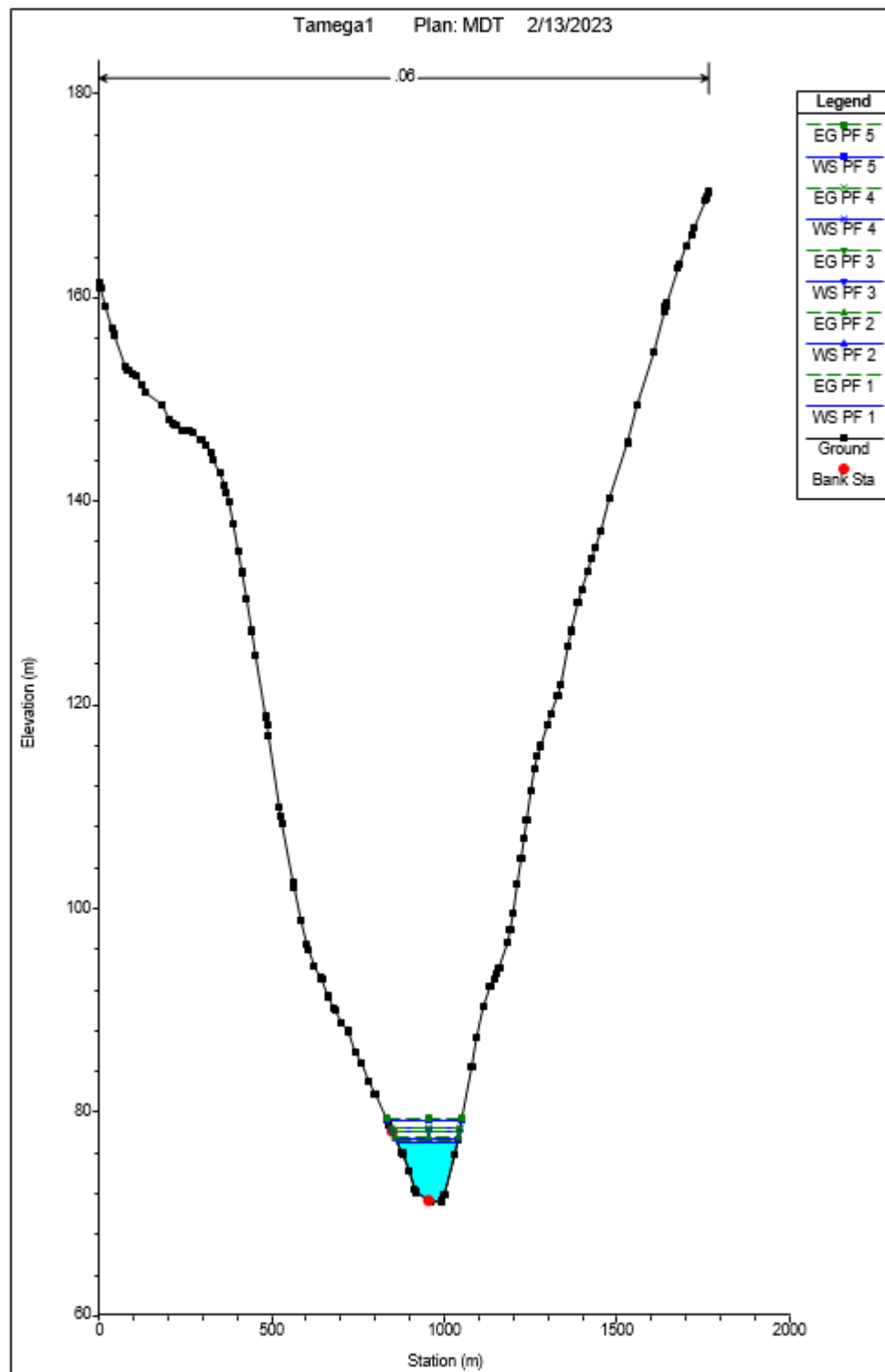


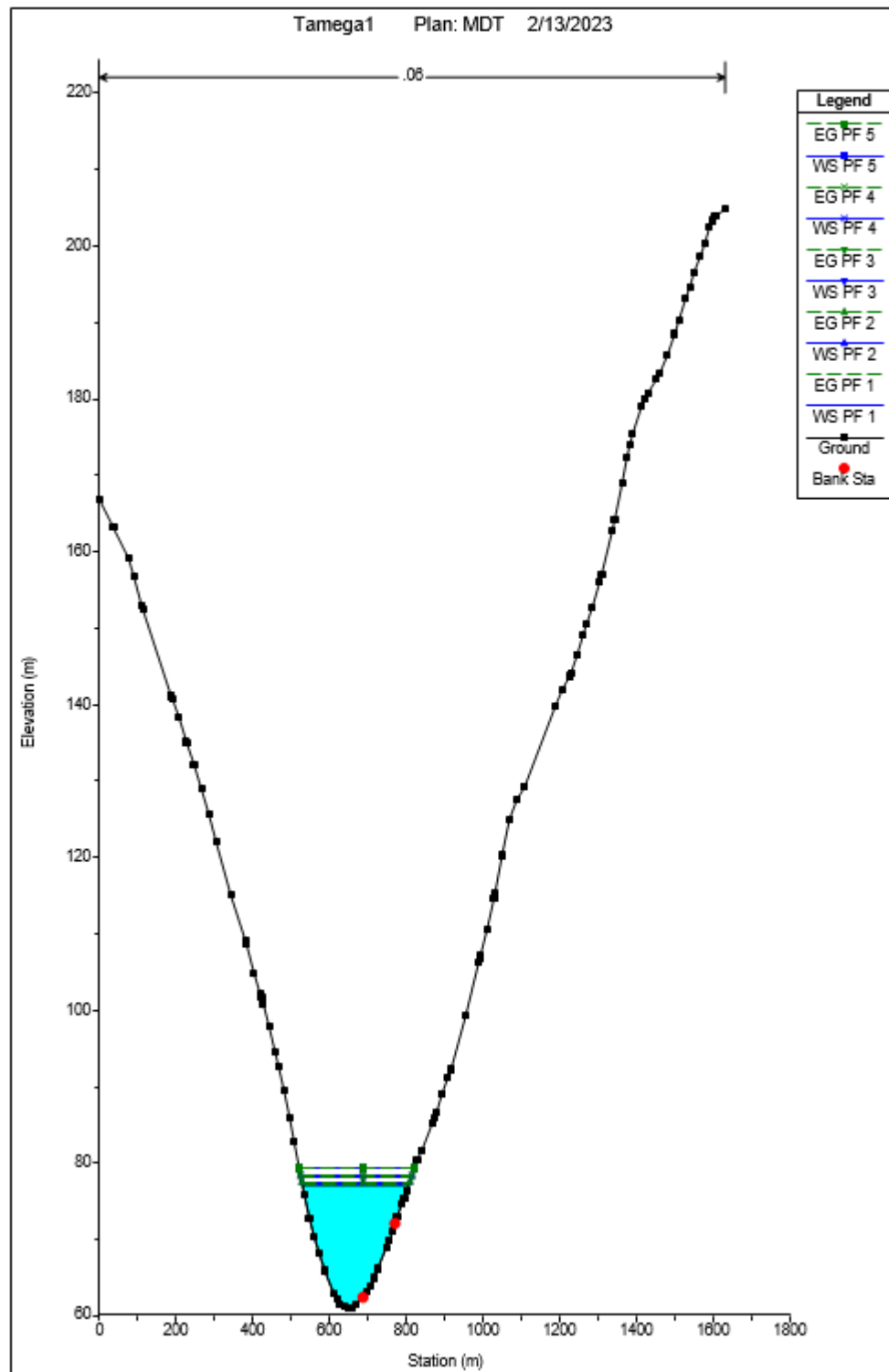


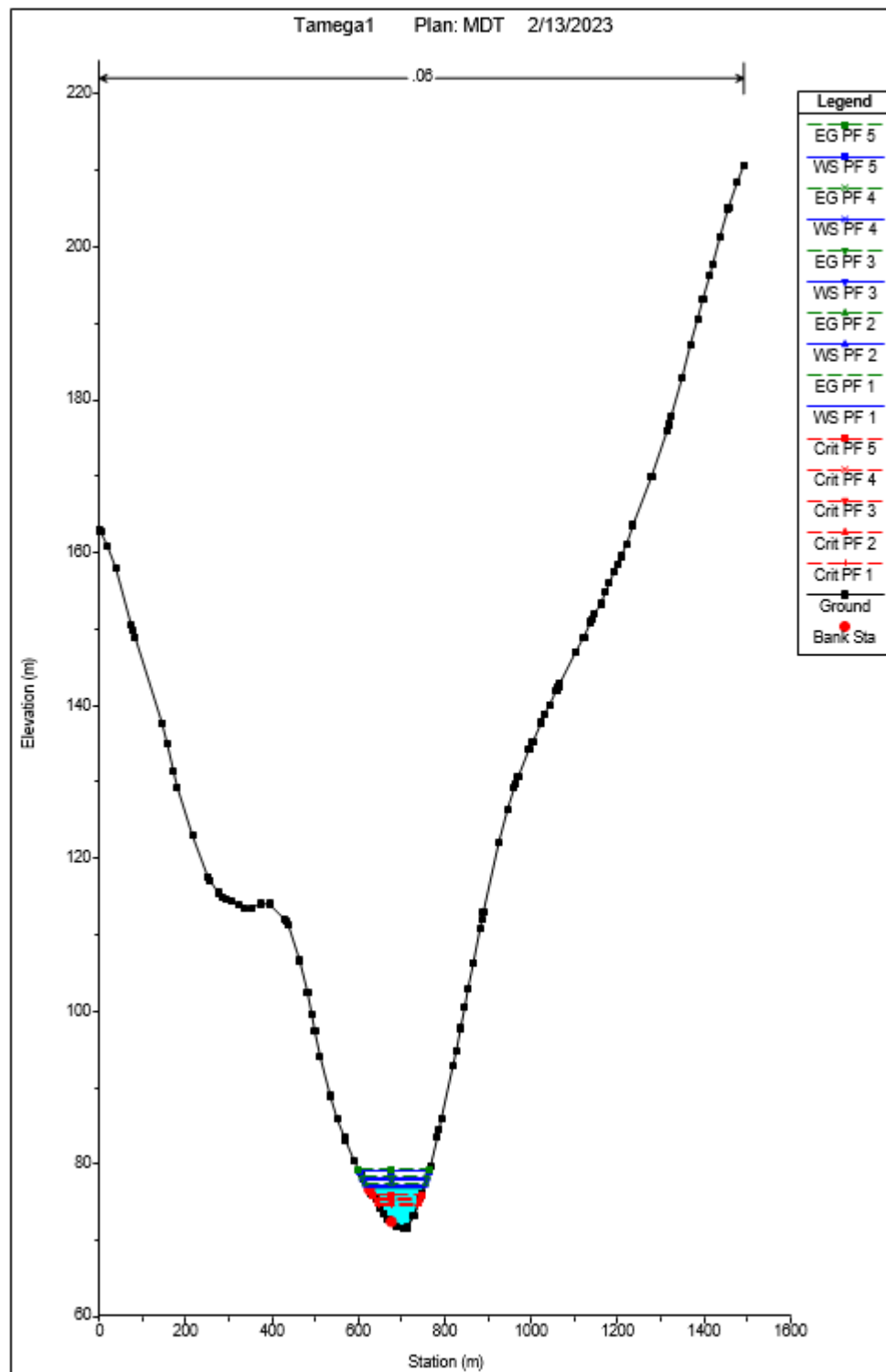












A2

Mapas de zonas inundáveis

