



www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 20, n° 1 (2019)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i1.1407>



DELIMITAÇÃO DE ÁREAS INUNDÁVEIS NO CENTRO URBANO DE AMARANTE, NORTE DE PORTUGAL, UTILIZANDO O SOFTWARE IBER

DELIMITATION OF FLOOD-PRONE AREAS IN THE URBAN CENTER OF AMARANTE, NORTH OF PORTUGAL, USING THE IBER SOFTWARE

Márcia Matilde Castro Martins

CEGOT, Faculdade de Letras, Universidade do Porto
Via Panorâmica, s/n, Porto. CEP: 4150-564. Portugal
E-mail: marciam_castro@hotmail.com

António Alberto Teixeira Gomes

CEGOT, Faculdade de Letras, Universidade do Porto
Via Panorâmica, s/n, Porto. CEP: 4150-564. Portugal
E-mail: atgomes@letras.up.pt

Pedro Pinto Santos

Centro de Estudos Geográficos, IGOT, Universidade de Lisboa
Rua Branca Edmée Marques, Cidade Universitária, Lisboa. CEP: 1600-276. Portugal
E-mail: pmpsantos@campus.ul.pt

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
05/03/2018
Aceito (Accepted):
16/11/2018

Palavras-chave:

Cheias/Inundações; Modelação Hidráulica; *Software Iber*.

Keywords:

Floods; Hydraulic Modeling; Iber Software.

Resumo:

A análise das cheias e inundações, processos hidrogeomorfológicos extremos e potencialmente devastadores, é importante sobretudo em territórios frequentemente afetados, como é o caso do território português, onde estes desastres naturais provocam avultadas perdas e danos, afetando pessoas, bens e serviços em várias regiões do país. Neste sentido, procedemos à análise das cheias no centro urbano da cidade de Amarante (Norte de Portugal), tendo como principal objetivo a delimitação de áreas inundáveis, bem como a determinação de outros parâmetros descritivos da inundação: profundidade da água e velocidade do fluxo. Assim, recorremos à modelação hidráulica utilizando o *software Iber* que usa um modelo matemático bidimensional para a simulação do fluxo da água em rios e estuários (BLADÉ *et al.*, 2012). Os resultados obtidos mostram as áreas mais críticas à ocorrência destes eventos extremos sendo que, no caso da cidade de Amarante, se destacam dois arruamentos da margem esquerda do rio Tâmega (Rua 31 de Janeiro e Largo Conselheiro António Cândido). Estas ruas concentram muitas atividades e serviços o que faz com que sejam bastante movimentadas podendo, em caso de cheia, provocar elevados prejuízos e danos materiais nos vários estabelecimentos comerciais. Para além disso, através dos resultados percebemos a grande influência que a ponte existente no setor em estudo (ponte histórica de São Gonçalo) tem no agravamento destes processos, visto que funciona como estrangulamento do vale e barreira à livre circulação

da corrente. A aplicação da modelação hidráulica no estudo das cheias e inundações revela-se uma mais-valia, pois é um processo que gera resultados fiáveis que permitem avaliar as áreas críticas à ocorrência destes eventos, através da elaboração de cartografia que se assume como um importante instrumento de suporte a um adequado ordenamento do território. Contudo, é necessário salientar que a modelação hidráulica está muito dependente dos dados de base, nomeadamente, de um modelo digital de superfície (MDS) pormenorizado.

Abstract:

The analysis of floods, considered extreme and potentially devastating processes, is important for territories that are frequently affected, such as the Portuguese territory, where, annually, these natural disasters cause losses and damages, affecting people, goods and services in several places along the country. In this sense, we analyze the floods on the urban center of Amarante city (northern region of Portugal) whose main purpose is the delimitation of flood-prone areas, and also the determination of other descriptive parameters of the flood, such as depth and water velocity. Therefore, the Iber software was used which considers a two-dimensional mathematical model for the simulation of water flow in rivers and estuaries (BLADÉ *et al.*, 2012). The obtained results show the most critical areas to the occurrence of these extreme events, and in the case of the city of Amarante, two streets on the left bank of the Tâmega river (Rua 31 de Janeiro and Largo Conselheiro António Cândido) stand out. These streets concentrate a lot of activities and services which make them very busy places and, in case of flood, entail many direct and indirect losses and material damages in several commercial establishments. In addition, with the results, we can understand the big influence that the existing bridge in the studied sector (historical São Gonçalo bridge) has in the aggravation of these processes, once it act as a barrier to the water circulation. The application of hydraulic modeling in the study of floods is an asset, since the process generates reliable results, allowing the definition of critical areas for the occurrence of these events, through the elaboration of cartography that shows itself as an important instrument, to support an appropriate spatial planning. However, it is important to highlight that hydraulic modeling is very dependent of the input data, in particular, on a detailed digital surface model (DSM).

1. Introdução

Os eventos hidrológicos extremos, especialmente as cheias/inundações fluviais são considerados um dos desastres de origem natural mais frequentes e importantes em território europeu, em termos de prejuízos económicos (EEA, 2017; MOEL *et al.*, 2009). Vários autores defendem que em diversas regiões da Europa, nos deparamos com um aumento da frequência e intensidade destes eventos (MILLS, 2005; KUNDZEWICZ *et al.*, 2007; EEA, 2017). Estes eventos implicam elevados prejuízos para as populações, bens e meio ambiente, daí a necessidade de se adotarem medidas que reduzam os seus impactos, evitando a exposição de novos elementos e atenuando a vulnerabilidade daqueles que já se encontram expostos. Para além disso, os danos e perdas provocados pelas cheias têm aumentado nos últimos anos, o que pode ser explicado pela implantação de novos elementos expostos nas áreas mais propensas a cheias e inundações (EEA, 2010). Com efeito, a par deste aumento de

peçoas e bens em áreas suscetíveis a estes processos, assiste-se a uma crescente consciencialização daquilo que o risco de cheias representa para as populações, a economia e o ambiente, bem como a importância que um planeamento e ordenamento do território eficazes podem ter na redução destes desastres (SÁ *et al.*, 2016).

Neste contexto, foi implementada a Diretiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, que obriga os Estados-Membros a desenvolver estratégias que mitiguem os impactos negativos das cheias, através de uma avaliação preliminar dos riscos de cheias, da elaboração de cartas de zonas inundáveis e cartas de risco de inundações que, posteriormente, auxiliam na definição dos Planos de Gestão dos Riscos de Inundações (UE, 2007). Em Portugal, o projeto de investigação DISASTER¹ trouxe novos dados sobre o tema, mediante criação de uma base de dados sobre desastres hidrológicos e geomorfológicos, ocorridos em Portugal continental, entre 1865 e 2010. Esta base de dados assume uma grande

¹ <http://riskam.ul.pt/disaster/>

importância na avaliação e gestão do risco, dado que analisa a distribuição espacial destes desastres e avalia a suscetibilidade dos territórios e vulnerabilidade dos elementos em risco (SANTOS *et al.*, 2012). Em Portugal, as cheias e inundações ocorrem com elevada frequência, provocando inúmeros prejuízos em várias regiões do país, sendo Amarante um desses locais, onde a ocorrência de cheias e inundações remonta a tempos muito recuados (TEDIM *et al.*, 2010) e, sempre que o rio transborda as margens do leito normal (muito artificializado), são numerosos os prejuízos que afetam a faixa ribeirinha (GOMES e COSTA, 2004), dada a grande concentração de atividades, serviços e locais de interesse turístico.

Assim, o objetivo principal deste trabalho prende-se com a delimitação de áreas inundáveis para um período de retorno de 100 anos recorrendo à modelação hidráulica, bem como a determinação de outros parâmetros descritivos da inundação, tais como a profundidade da água e a velocidade do fluxo. Foi elaborado um mapa de perigosidade para um período de retorno de 100 anos, a partir do qual se destacam os locais mais críticos em termos de perigosidade a cheias, sinalizando-se alguns dos principais elementos expostos nessa área. A modelação hidráulica é cada vez mais usada para o estudo das cheias e inundações (DI BALDASSARRE, 2012), assim como, para a gestão das áreas inundáveis e mitigação dos riscos associados a estes processos.

1.1. Área de Estudo

A cidade de Amarante localiza-se no norte de Portugal e desenvolve-se em ambas as margens do rio Tâmega, um dos principais afluentes da margem direita do rio Douro, com um comprimento de aproximadamente 187,59 km (Figura 1A). Assim, a área de estudo integra-se na bacia hidrográfica do rio Tâmega, que apresenta uma área de cerca de 3314,77 km², pertencendo 80% (2645 km²) a Portugal e apenas 20% (669,77 km²) a Espanha, abrangendo 18 concelhos portugueses, entre os quais destacamos: Amarante (totalmente incluído na bacia hidrográfica do rio Tâmega), Boticas, Cabeceiras de Basto, Chaves, Mondim de Basto, entre outros (APA, 2012). Esta bacia hidrográfica desenvolve-se, predominantemente, segundo uma orientação NE - SW, encaixando-se entre as serras do Alvão (1283 metros)

e Marão (1416 metros), na parte oriental, as serras da Cabreira (1262 metros) e do Barroso (1279 metros), na parte ocidental (COSTA, 1998). Em relação ao clima, o vale do Tâmega localiza-se numa área de transição que varia consoante a distribuição das massas montanhosas que o delimitam, constituindo um espaço onde ainda penetram as massas de ar marítimo, embora já de forma indireta, dado que os períodos atlânticos alternam com os de matriz continental (RIBEIRO *et al.*, 1988).

Em relação à precipitação, sendo uma das variáveis climáticas que mais contribui para a compreensão da génese das cheias, é importante salientar que a bacia hidrográfica do rio Tâmega, situada no Noroeste português, apresenta valores anuais relativamente elevados, com valores médios de 1438 mm (período de 1931 - 1960, dado que para a estação meteorológica de Amarante não existem normais climatológicas mais recentes) (Figura 1C). Em termos de altitude, a bacia hidrográfica do rio Tâmega desenvolve-se entre os 15 e os 1523 metros, verificando-se um aumento da altitude à medida que nos afastamos do vale do Tâmega, em direção aos conjuntos montanhosos que a delimitam (Figura 1B).

Analisando o perfil longitudinal do rio Tâmega (Figura 1D) percebemos que este nasce por volta dos 950 metros de altitude sofrendo, em menos de 10 km, uma descida abrupta para cotas próximas dos 500 metros de altitude. No restante percurso, o rio apresenta uma descida gradual do declive até à desembocadura. A figura 1D coloca ainda em evidência a possível influência que a barragem do Torrão (concluída em 1988, a jusante de Amarante) tem na ocorrência das cheias em Amarante, visto que uma maior retenção das águas pode provocar um aumento da coluna de água a montante. Estes empreendimentos hidroelétricos deveriam ter um impacto positivo na regularização dos caudais mais elevados e, conseqüentemente, na frequência e magnitude das cheias. No entanto, verifica-se, por vezes, uma descoordenação e pouco eficiente gestão dos caudais por parte das autoridades responsáveis, como aconteceu, por exemplo, nos rios Tejo (1978 e 1979) e Mondego (2000/2001 e 2016), onde as descargas contínuas das barragens provocaram cheias e inundações em várias regiões do centro do país, colocando em causa a infalibilidade técnica destas obras hidráulicas (RAMOS e REIS, 2001; CUNHA, 2002; PAIVA, 2005/06; ORDEM DOS ENGENHEIROS, 2016).

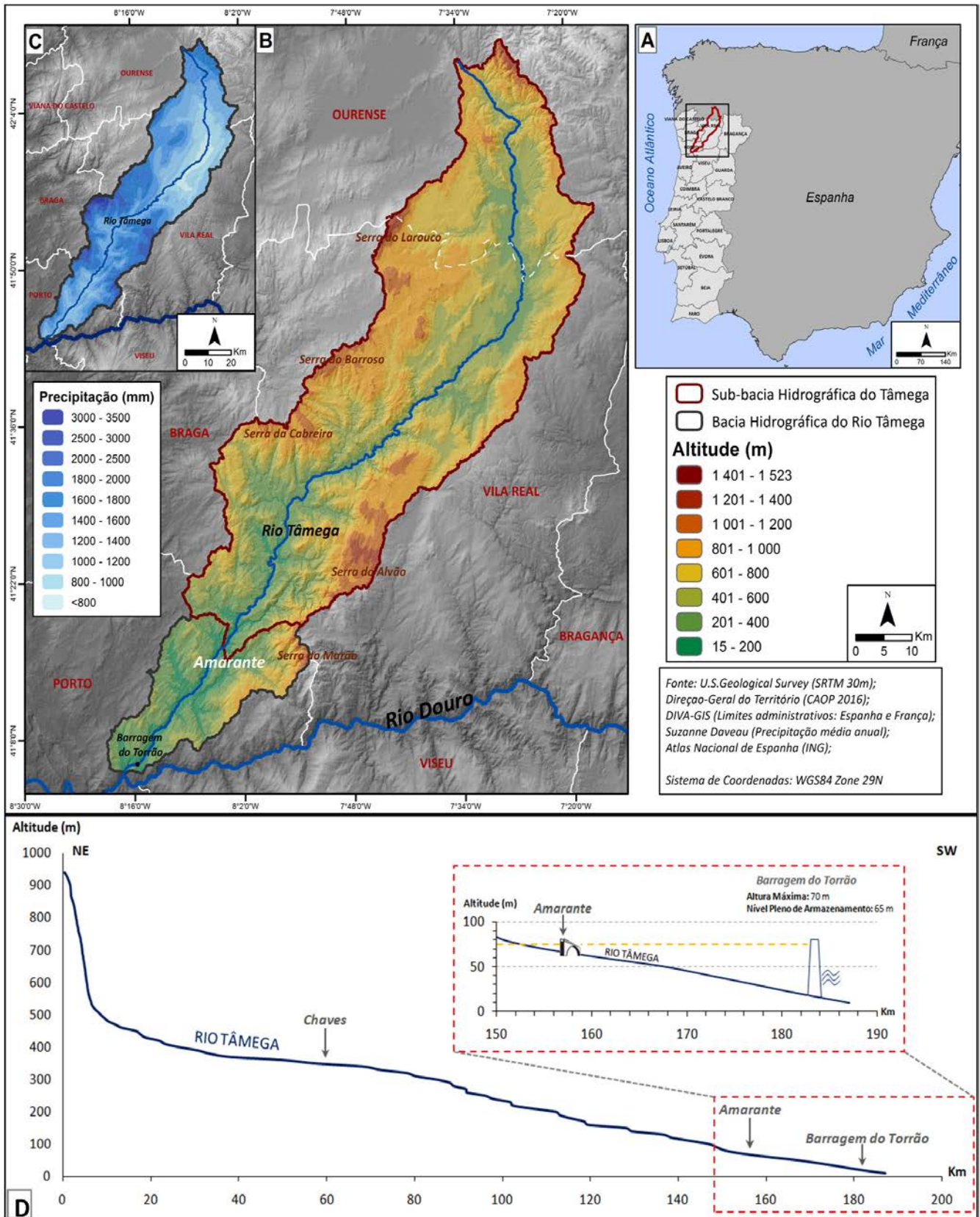


Figura 1 - (A) Enquadramento geográfico de área de estudo; (B) Hipsometria da bacia hidrográfica do rio Tâmega; (C) Precipitação média anual na bacia hidrográfica do rio Tâmega; (D) Perfil longitudinal do rio Tâmega.

1.2. Cheias em Amarante

O centro histórico e urbano da cidade de Amarante é frequentemente afetado por cheias e inundações (Figura 2), existindo registos destes eventos desde o século XVII em que, segundo relatos da época, ocorreu uma cheia importante (TEDIM *et al.*, 2010). Já no século XVIII, sabe-se que na sequência de uma cheia, em 1763, se deu o desmoronamento da primitiva ponte onde, atualmente, se encontra a ponte de São Gonçalo classificada como monumento nacional desde 1910 (DELGADO, 2014).

Perante esta realidade, surgiu o interesse pelo estudo destes processos potencialmente devastadores, os quais já foram abordados por diversos autores (PEDROSA e COSTA, 1999; TEDIM *et al.*, 2010), mas que a nível nacional em termos da Diretiva 2007/60/CE, ainda não é devidamente considerado, verificando-se algumas lacunas ao nível da gestão do risco, uma vez que a área ribeirinha da cidade não é reconhecida como uma zona crítica nos Planos de Gestão dos Riscos de Inundações.

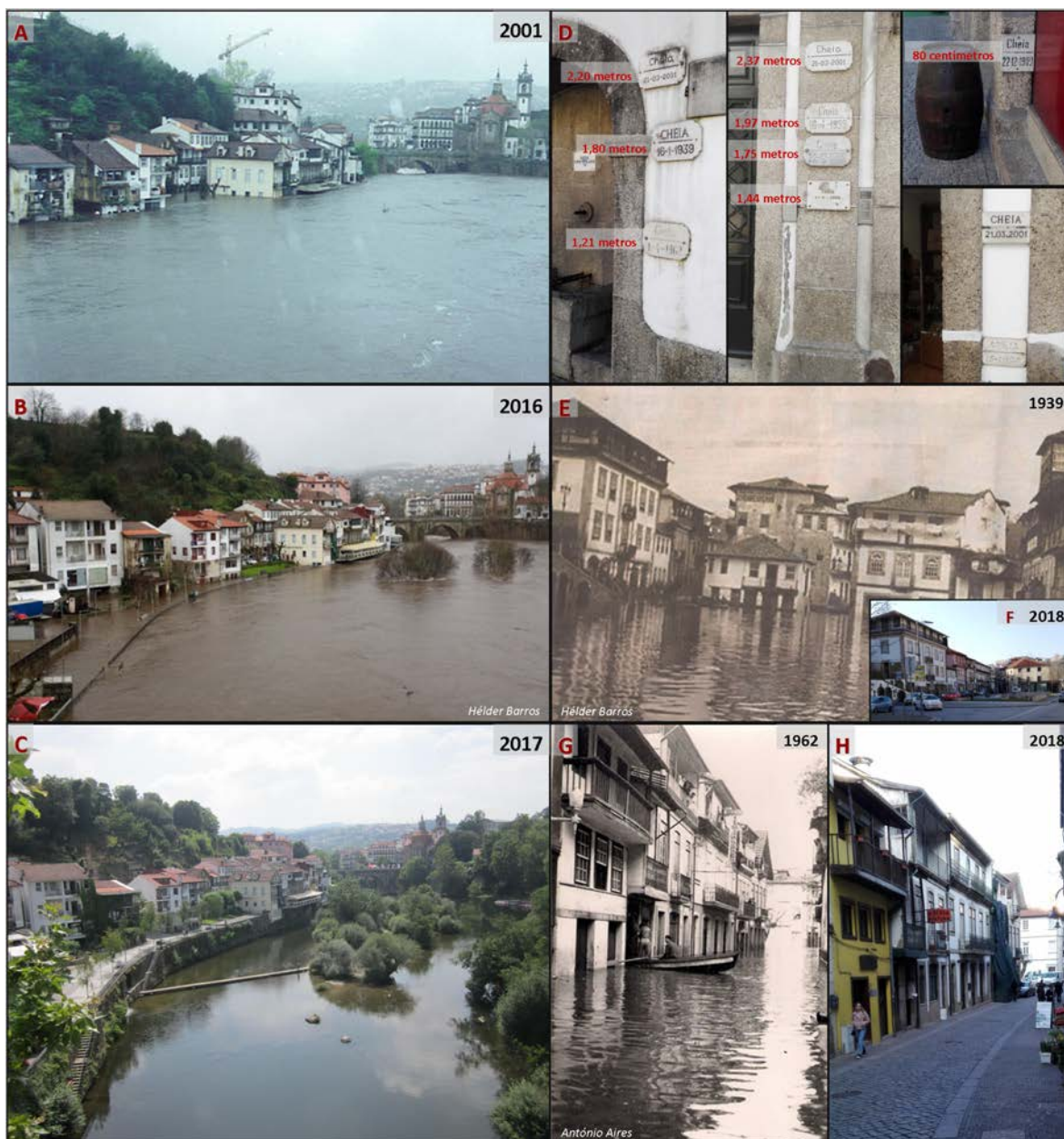


Figura 2 - (A) Cheia de março de 2001 (vista a montante da ponte de São Gonçalo); (B) Cheia de janeiro de 2016 (vista a montante da ponte de São Gonçalo); (C) Perspetiva a montante da ponte de São Gonçalo com caudal aprox. do leito normal; (D) Marcas das principais cheias ocorridas na cidade de Amarante; (E) Cheia de janeiro de 1939 (vista do Largo Conselheiro António Cândido); (F) Perspetiva do Largo Conselheiro António Cândido na atualidade; (G) Cheia de abril de 1962 (vista da Rua 31 de Janeiro); (H) Perspetiva da Rua 31 de Janeiro na atualidade.

2. Materiais e Métodos

Para a realização deste trabalho, inicialmente, foi necessário efetuarmos a recolha e tratamento dos dados de base, *i.e.*, dados altimétricos, meteorológicos e hidrológicos (Tabela 1), que auxiliaram na execução da modelação hidráulica.

Assim, numa primeira fase, escolheu-se a área a modelar que corresponde a um pequeno troço do rio Tâmega (*ca.* de 580 metros) na sua passagem pelo centro urbano de Amarante e, posteriormente, procedemos à geração do modelo digital de superfície (MDS). Esta etapa é extremamente importante, uma vez que as cheias são muito condicionadas pelas características da superfície, daí ser necessária uma adequada representação da mesma. Neste sentido, fez-se o tratamento da informação altimétrica de base (escala 1:10 000), cedida pela Câmara Municipal de Amarante à Faculdade de Letras da Universidade do Porto. Durante este processo, os dados de base, nomeadamente, curvas de nível e pontos cotados (em média, distanciados *ca.* de 10m na horizontal), que se encontravam num formato nativo do *AutoCAD* (.*dwg*) foram convertidos para ficheiros em formato *shapefile* (.*shp*) sendo depois a partir destes, gerado o modelo digital de terreno (MDT) de base que não apresentava o rigor necessário para a realização da modelação hidráulica (Figura 3A). Por esta razão, procedeu-se a uma atualização e tratamento da cartografia original, incluindo-se novos elementos tais como edifícios, muros/margens, pontes, passeios e ruas (Figura 3B). Este processo de correção do MDT de modo a obter-se um MDS (Figura 3C) exigiu um detalhado trabalho de campo para adquirir as medidas necessárias à incorporação destes novos elementos, recorrendo-se para o efeito a diversas ferramentas como,

por exemplo, fita métrica, fio de prumo e uma aplicação para *smartphone*, designada por “*SmartMeasure*”². Assim, partindo das cotas fornecidas pela cartografia de base, às quais foram acrescentadas as medidas dos novos elementos obtidas a partir do trabalho de campo, após o tratamento e processamento no *software* ArcGis, foi possível a criação de um MDS mais detalhado. Este processo de correção do MDT revelou-se imprescindível para a obtenção de um modelo adequado à realização da modelação hidráulica, sendo notórias as alterações efetuadas, sobretudo nas margens que se apresentavam bastante indefinidas e imprecisas no MDT de base.

Apesar de na secção escolhida para efetuar a modelação se verificar a existência de duas pontes, neste estudo, optou-se por incluir no modelo apenas uma, a ponte de São Gonçalo, pois dada a dimensão e volume dos seus pilares, esta atua como um entrave à livre circulação das águas. O formato da ponte em três arcos corresponde a um estreitamento do vale e do canal do rio Tâmega, o que agrava a situação de enchente a montante (Figura 4A/B). Assim, para incluir a ponte ou pelo menos, reproduzir o seu efeito no modelo, foi determinado o caudal aproximado que cada arco poderia escoar, utilizando-se, para o efeito, a Equação Fundamental da Hidrodinâmica expressa pela equação $Q = S \times V$, em que Q é o caudal em m^3/s , S corresponde à secção em m^2 e V à velocidade da água em m/s (CABEZAS, 1983). Para determinar a secção, calculou-se a área dos arcos, partindo do pressuposto que o arco do meio correspondia a meia circunferência e, os arcos das extremidades, à junção de duas peças, nomeadamente, um retângulo e meia circunferência. Relativamente à velocidade atingida na secção transversal da ponte, os dados foram obtidos previamente através do *software* Iber, que apresentou o valor de 5 m/s .

Tabela 1: Síntese dos principais dados utilizados para a realização da modelação hidráulica.

Dados	Descrição	Fonte
Altimetria	Informação altimétrica de base (curvas de nível e pontos cotados). Escala 1:10 000.	Câmara Municipal de Amarante
COS 2010	Carta de Ocupação do Solo (COS) de Portugal Continental referente ao ano de 2010. Escala 1: 25 000.	DGT (Direção-Geral do Território)
Precipitação diária máxima anual	Série de dados da precipitação diária máxima anual (1964 a 1994), para a estação udográfica de Celorico de Basto.	SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos)

² https://play.google.com/store/apps/details?id=kr.sira.measure&hl=pt_PT

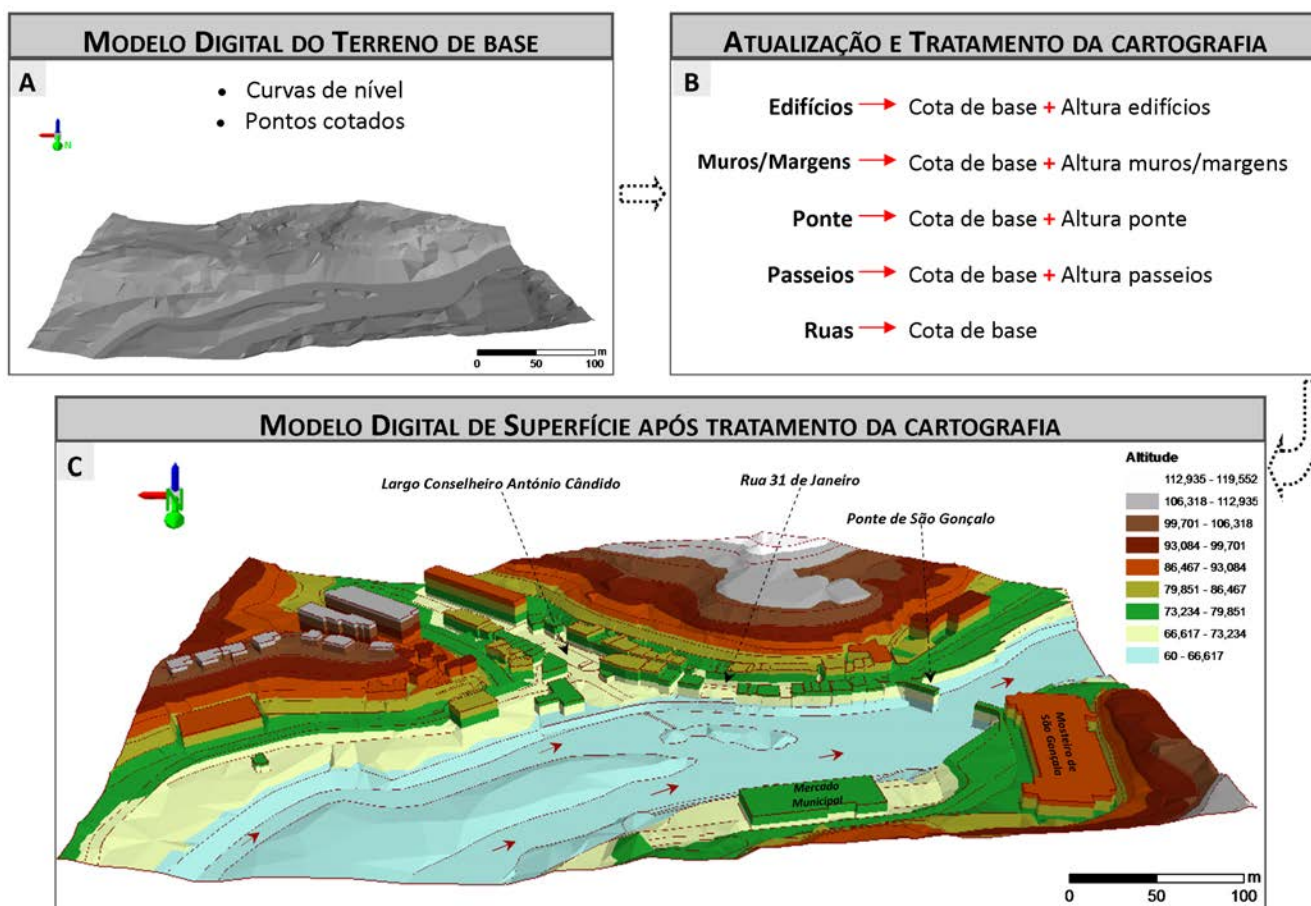


Figura 3 - (A) Modelo digital do terreno de base; (B) Atualização e tratamento da cartografia de base; (C) Modelo Digital de Superfície (MDS) corrigido.

Após estes cálculos, foram obtidos os resultados apresentados no quadro da figura 4C, sendo, posteriormente, utilizado o valor da quantidade de água total escoada pelos três arcos da ponte (2412 m³/s) para se definir uma única secção, estreitando as margens até se atingir esse valor (Figura 4C).

Na etapa seguinte foi necessário determinar o caudal máximo de cheia para um período de retorno de 100 anos, crucial para realização da modelação hidráulica, possibilitando a delimitação do perímetro de inundação de um evento com esta probabilidade de recorrência. Para isso, efetuou-se a modelação hidrológica com base na fórmula de *Giandotti*, através da qual foi possível determinar para um período de retorno de 100 anos, um caudal de aproximadamente 2283,7 m³/s (SNIRH, 2017), valor que posteriormente foi introduzido na modelação hidráulica como condição de entrada.

Após a determinação do caudal máximo seguiu-se a atribuição dos valores de rugosidade, através do

coeficiente de *Manning*, para cada tipo de uso do solo, baseando-se na cartografia de uso e ocupação do solo (COS 2010, escala 1:25.000), disponibilizada pela Direção-Geral do Território (DGT, 2017), para o setor onde se pretende realizar a modelação. Os valores representativos do coeficiente de *Manning* dependem essencialmente da rugosidade da superfície, da quantidade de vegetação e da irregularidade do canal, por isso, quanto maior for o seu valor, mais elevada será a resistência oferecida ao fluxo (CHAUDHRY, 2007).

Terminada a preparação dos dados de base, efetuamos a modelação hidráulica com recurso ao *software Iber* que é de uso livre, podendo ser descarregado gratuitamente. Este *software* surgiu em 2010 e desenvolveu-se diretamente a partir da administração pública espanhola, em colaboração com vários grupos e universidades, destacando-se, dentro dos seus diversos campos de aplicação, a determinação e avaliação das áreas inundáveis (BLADÉ *et al.*, 2012).

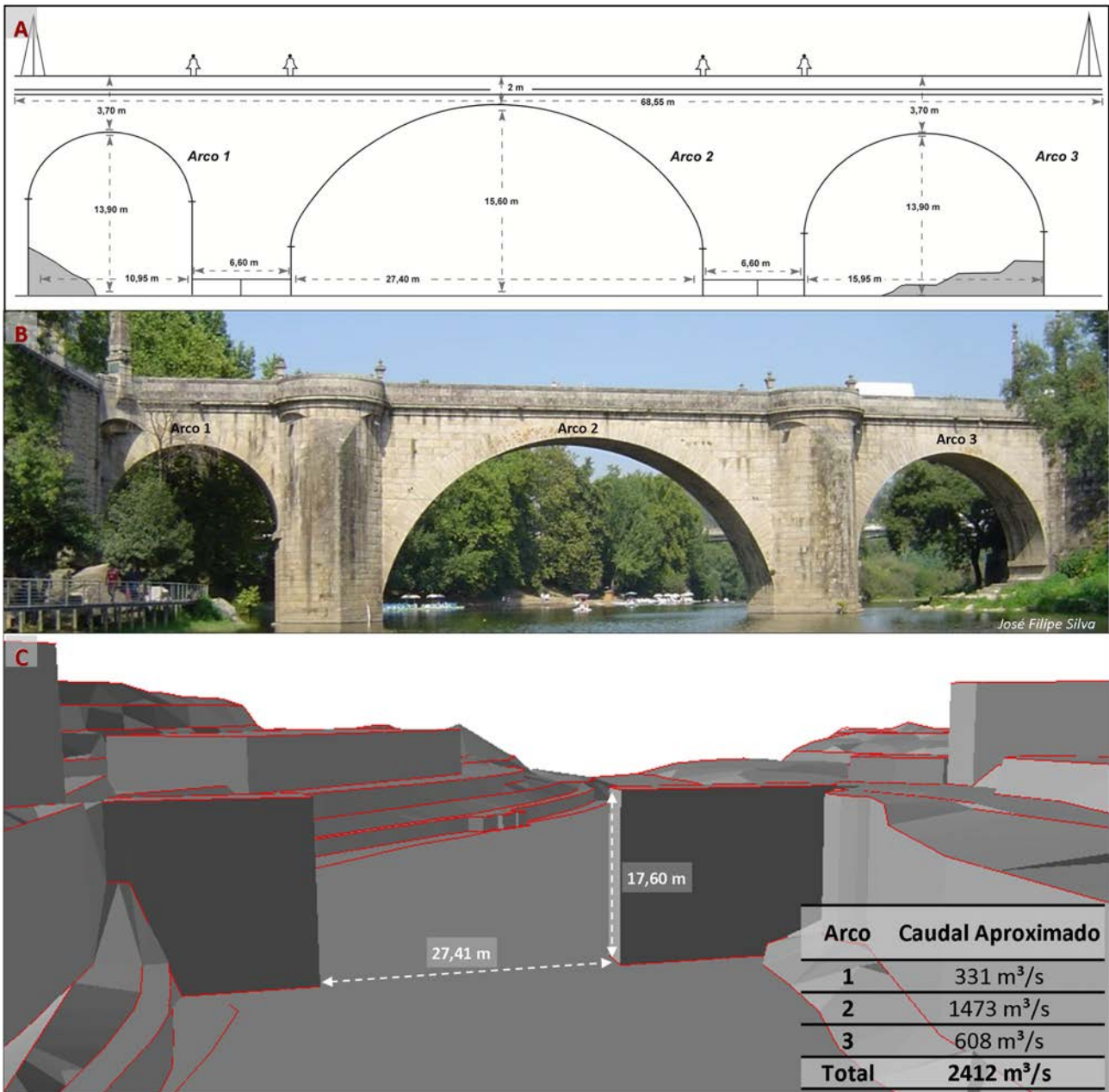


Figura 4 - (A) Medidas da ponte de São Gonçalo, em Amarante (fonte: Direção Geral do Património Cultural); (B) Fotografia da Ponte de São Gonçalo, em Amarante (vista de jusante com caudal aprox. do leito normal); (C) Incorporação do efeito da ponte de São Gonçalo no modelo hidráulico.

O modelo Iber apresenta diferentes módulos de cálculo, tais como, o módulo hidrodinâmico para determinar a profundidade e velocidade da água, e dispõe também de um módulo de turbulência e um módulo de transporte de sedimentos que lhe confere capacidades adicionais (IBER, 2012; MUÑOZ, 2012). O módulo hidrodinâmico, que é a base de todos os processos incluídos nesta ferramenta, resolve as equações bidimensionais de *Saint Venant*, também

conhecidas como *2D Shallow Water Equations*, incorporando os efeitos provocados pela turbulência e fricção superficial do vento (BLADÉ *et al.*, 2012). O *software* Iber encontra-se estruturado em três etapas principais, sendo elas o pré-processo, processo e pós-processo. Na primeira etapa (pré-processo), procede-se à definição ou importação da geometria, determinação das condições do problema, atribuição dos valores de rugosidade do solo, criação da malha de cálculo,

entre outros procedimentos adicionais. Nesta etapa, procedemos à importação da geometria a partir do MDS, optando-se pela utilização da metodologia RTIN (*Right-Triangulated Irregular Network*) que consiste em dividir a superfície do terreno em triângulos retângulos de vários tamanhos. Porém, quanto maior for o número de triângulos, mais aproximada será a geometria às características reais do terreno, mas também mais elevado será o tempo de simulação (IBER, 2012). Ainda na primeira etapa, é gerada a malha de cálculo que possui o triplo dos elementos existentes na geometria para se representar com o maior rigor as zonas inundáveis, constituindo um elemento fundamental para a obtenção de bons resultados. Na segunda etapa (processo) é lançado o cálculo e, na terceira (pós-processo), visualizam-se os resultados obtidos. Assim, para a concretização das várias etapas são necessários dados de base, tais como, um aceitável modelo digital de superfície (MDS), os valores dos caudais de ponta de cheia para a definição das condições de entrada do fluxo

e a atribuição dos valores do coeficiente de *Manning* para cada tipo de uso do solo.

3. Resultados

As ferramentas de modelação como por exemplo, o Iber, têm entre as suas diversas aplicações o cálculo e avaliação de áreas propensas a cheias e inundações, considerando vários parâmetros como o alcance máximo da inundação, a altura da coluna de água e a velocidade do fluxo, que ajudam a entender estes processos (MOEL *et al.*, 2009). Assim, a modelação hidráulica permitiu a delimitação da área inundável para um período de retorno de 100 anos, bem como a análise da altura da coluna de água e da velocidade do escoamento. Tal como defende MOEL *et al.* (2009), os mapas que representam a extensão máxima de uma cheia/inundação para um evento específico, são os mais comuns entre os mapas de perigo de cheias, podendo caracterizar um episódio histórico ou um determinado evento com um período de retorno específico.

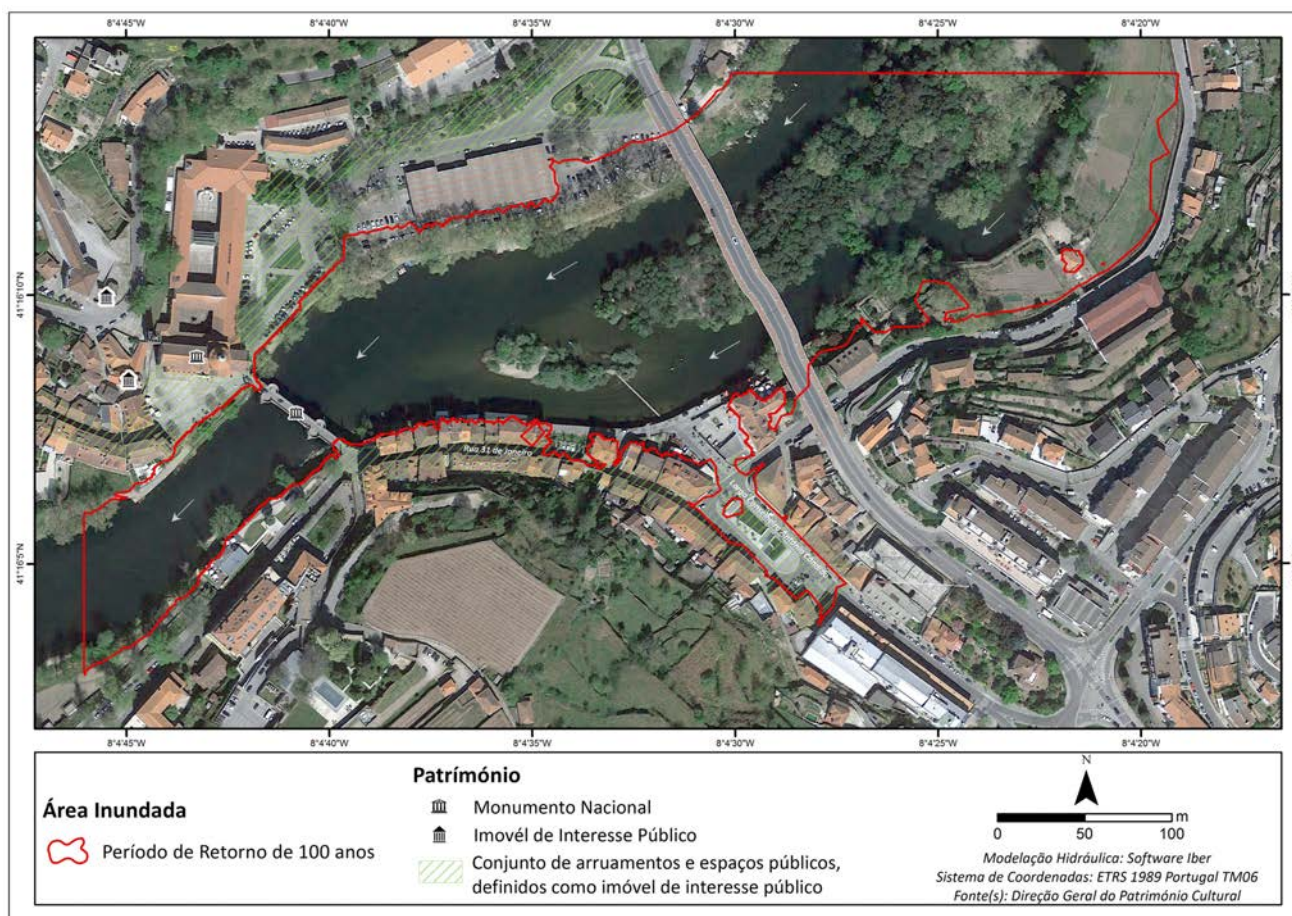


Figura 5 - Área inundada para um evento de cheia como um período de retorno de 100 anos, comportando um caudal de 2283m³/s.

Na figura 5 está representada a área inundada para um potencial evento de cheia com uma probabilidade de recorrência de 100 anos, cuja extensão máxima alcançada no setor modelado, é de 84 232,5 m². Ainda na figura 5, percebe-se que na área afetada existem elementos classificados como Monumento Nacional ou Imóvel de Interesse Público (MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, COMÉRCIO E INDÚSTRIA, 1910; MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA,

1974) que são particularmente atingidos em episódios de cheia extraordinários, condicionando as atividades e movimentos em parte dos arruamentos e espaços públicos classificados, dos quais fazem parte a Rua 31 de Janeiro e o Largo Conselheiro António Cândido.

Como já foi referido, outro dos resultados obtidos com a modelação hidráulica é a altura da coluna de água, representada na figura 6, para um evento de cheia com um período de retorno de 100 anos.

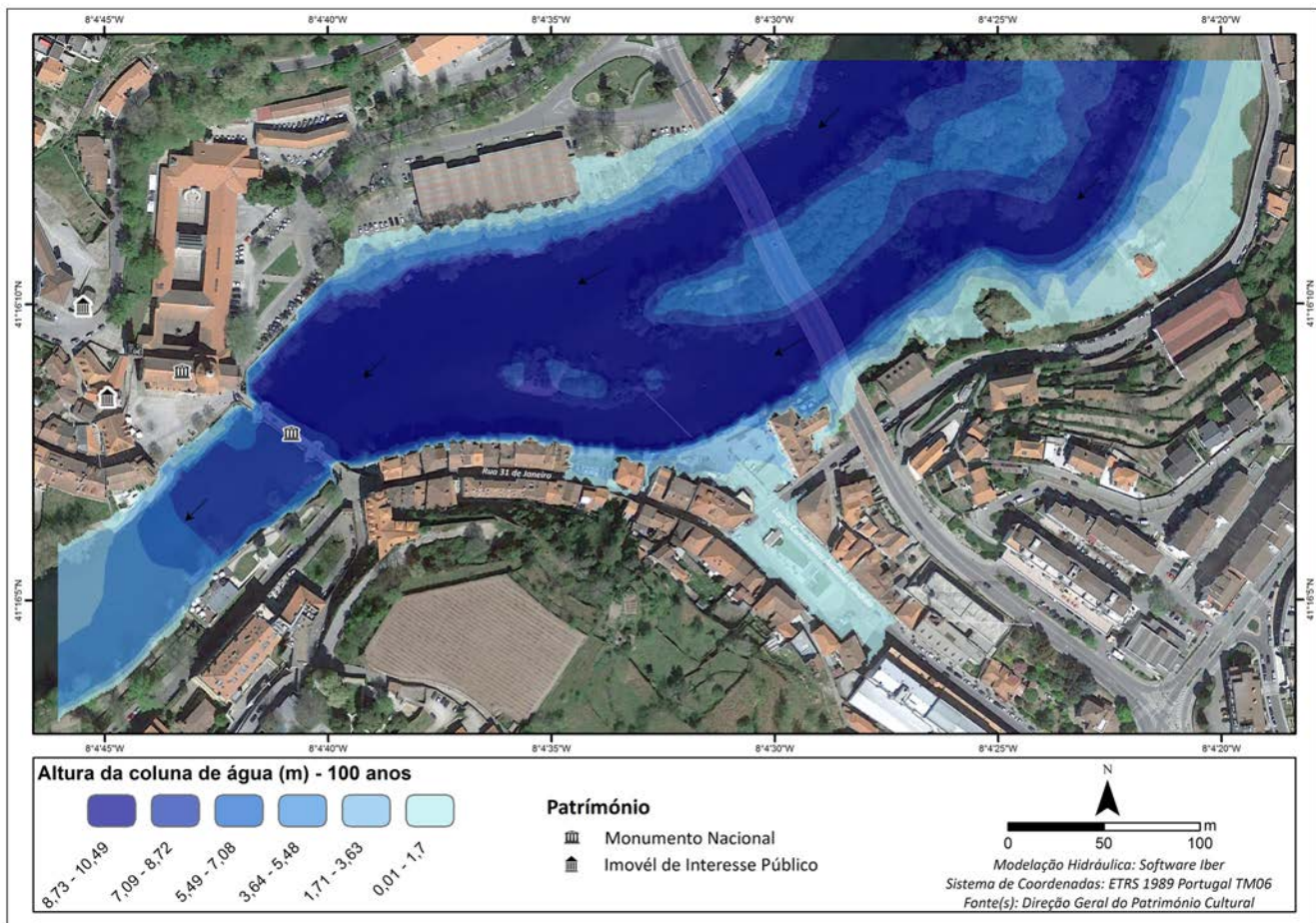


Figura 6 - Altura da coluna de água para uma cheia com um período de retorno de 100 anos.

Pela figura 6 percebe-se que os níveis de profundidade mais elevados se registam ao longo do canal do rio Tâmega, especialmente a montante da ponte de São Gonçalo, rondando valores entre 8,73m e 10,49m, tendo como referência o leito de estiagem. Nos locais onde o rio extravasa a margem esquerda, a altura da coluna de água pode atingir os 3,63 m, provocando danos nas caves, anexos ou arrecadações dos edifícios que aí se situam (Figura 2), podendo mesmo subir até ao nível de algumas varandas. Quando atinge o Largo Conselheiro António Cândido são vários os constrangimentos que

impedem a circulação pedonal e rodoviária nesta área. Na margem direita, uma cheia desta magnitude, atinge o Mercado Municipal e impede a circulação no caminho pedonal que aí existe.

Para além da altura a coluna de água, a velocidade do fluxo é outro resultado da modelação hidráulica, encontrando-se representada na figura 7 para o período de retorno de 100 anos. Assim, a velocidade da corrente aumenta progressivamente a jusante da ponte de São Gonçalo, alcançando um valor máximo de 11,05 m/s. Este aumento da velocidade acarreta danos e prejuízos,

tanto económicos como ambientais, uma vez que a ilha existente neste sector fica completamente degradada e, além disso, os caminhos que a rodeiam exercem maior

impacto sobre as margens, particularmente sobre a margem esquerda, dado a força da corrente aliada com o transporte de detritos pode causar sérios danos.

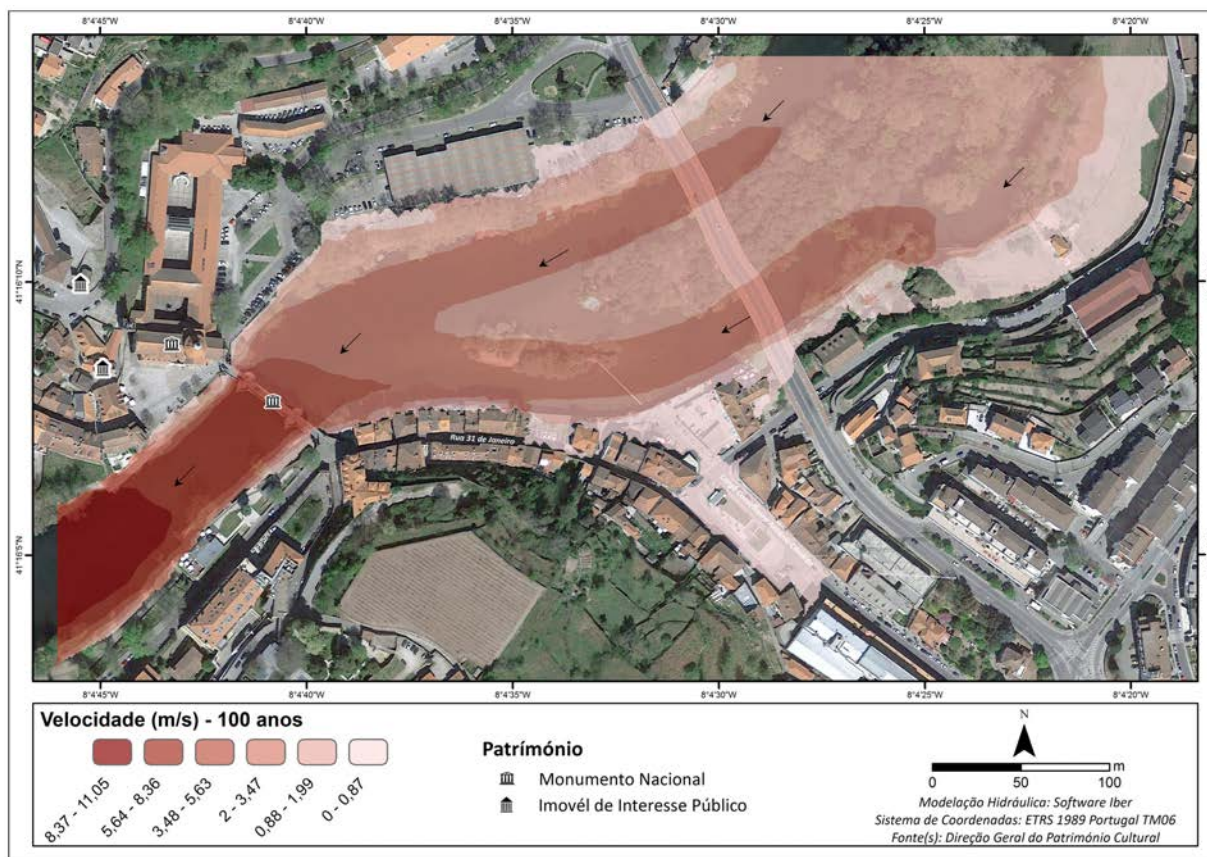


Figura 7 - Velocidade do fluxo para uma cheia com um período de retorno de 100 anos.

Contudo, apesar dos resultados obtidos através da modelação serem aceitáveis face aos relatos dos locais e marcas de cheias conhecidas, persistem duas lacunas nos cenários simulados (Figura 8), mesmo após diversas tentativas para corrigir o resultado. Na figura 8, os setores delimitados a vermelho, constituem pequenos troços da Rua 31 de Janeiro que deveriam inundar sobretudo em cheias de carácter excepcional, pois existem marcas indicativas da altura da água nesse local, mas que a modelação não abrange. Neste sentido, importa reforçar que a modelação matemática é uma aproximação à realidade estando, por isso, sujeita a falhas e representações menos precisas (MERWADE *et al.*, 2008; ALEMSEGED e RIENTJES, 2007).

Além disso, estes problemas podem estar relacionados com imprecisões existentes no MDS, dado que as medições efetuadas no terreno não foram sistemáticas (metro a metro, *p. ex.*), nem obtidas através de métodos que proporcionam resultados de elevada precisão, como é o caso da estação total ou de um GPS de alta precisão. Em relação a isto, pode-se também referir a ação da drenagem pluvial que leva à concentração de escoamento em

áreas deprimidas da cidade, e que o modelo hidráulico não capta na totalidade. Outro aspeto que é necessário salientar, e que pode contribuir para que o modelo não se ajuste totalmente à realidade, está relacionado com o facto de Amarante, para além de ser afetada por cheias fluviais, sofrer também os impactos das inundações urbanas que não se consideram na modelação. Na figura 9C/D faz-se referência a este processo das inundações urbanas, que no caso de Amarante são provocadas pela existência de uma linha de água encanada, designada como ribeira de Padronelo (Figura 9A). Quando o caudal do rio Tâmega sobe, este produz um efeito de tamponamento que impede o escoamento natural desse curso de água. Esta situação leva a que no Largo Conselheiro António Cândido, a água comece a emergir pelas tampas da rede de saneamento, mesmo antes do rio Tâmega transbordar as margens. A figura 9B mostra a ponte medieval, denominada de ponte do Arquinho, que ligava ambas as margens da ribeira de Padronelo, e que foi descoberta durante o arranjo urbanístico do Largo Conselheiro António Cândido (FERNANDES *et al.*, 2010).

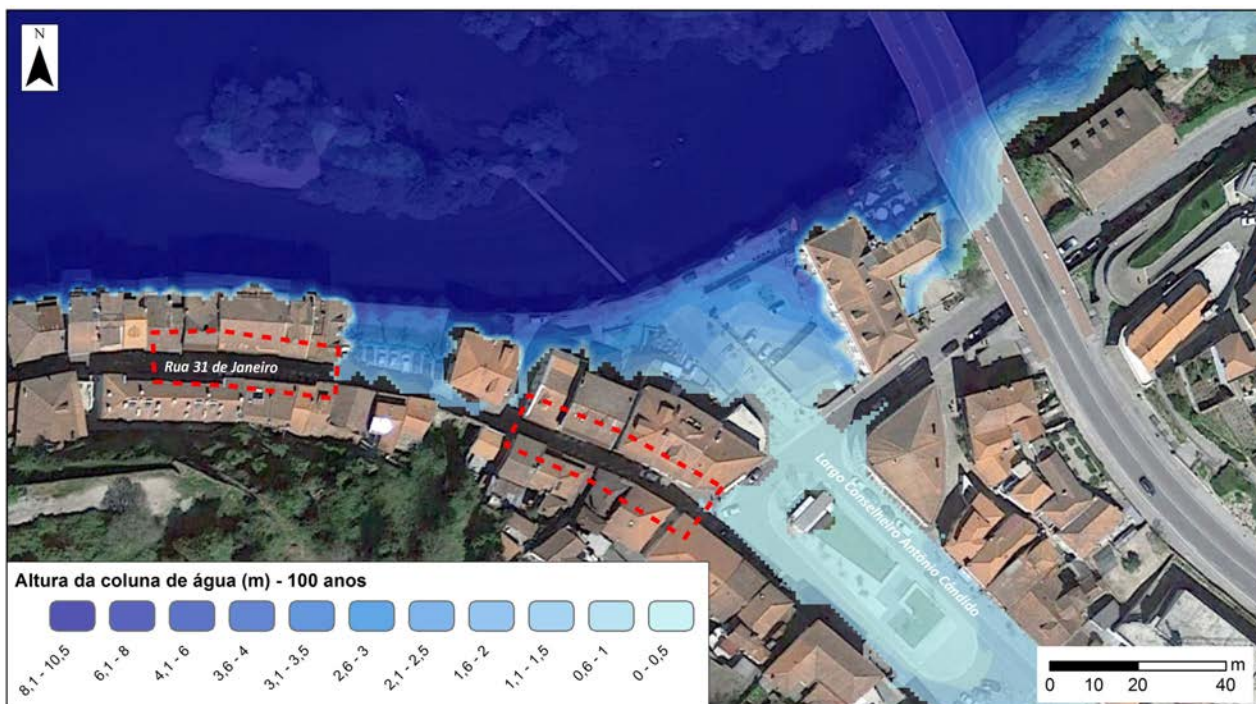


Figura 8 - Lacuna nos resultados da modelação hidráulica.



Figura 9 - (A) Local onde a ribeira de Padronelo desagua no rio Tâmega; (B) Trabalhos efetuados na ponte medieval que ligava as duas margens da ribeira de Padronelo, situada no centro do Largo Conselheiro António Cândido (fonte: FERNANDES et al., 2010); (C) Cheias de janeiro de 2016 no Largo Conselheiro António Cândido; (D) Jornal Flor do Tâmega, 10 de dezembro de 1992 (fonte: COSTA, 2009).

Para além dos resultados até agora apresentados, foi também elaborado um mapa de perigosidade a cheias (Figura 10), baseando-se na metodologia preconizada pela Comissão Nacional da Gestão de Riscos de Inundação (CNGRI). Segundo esta metodologia, a

perigosidade é calculada em função da profundidade e velocidade do escoamento, podendo ser expressa através da equação $P_i = d * (v + 0.5)$, em que d corresponde à profundidade (m), e v à velocidade da corrente (m/s) (APA, 2015).

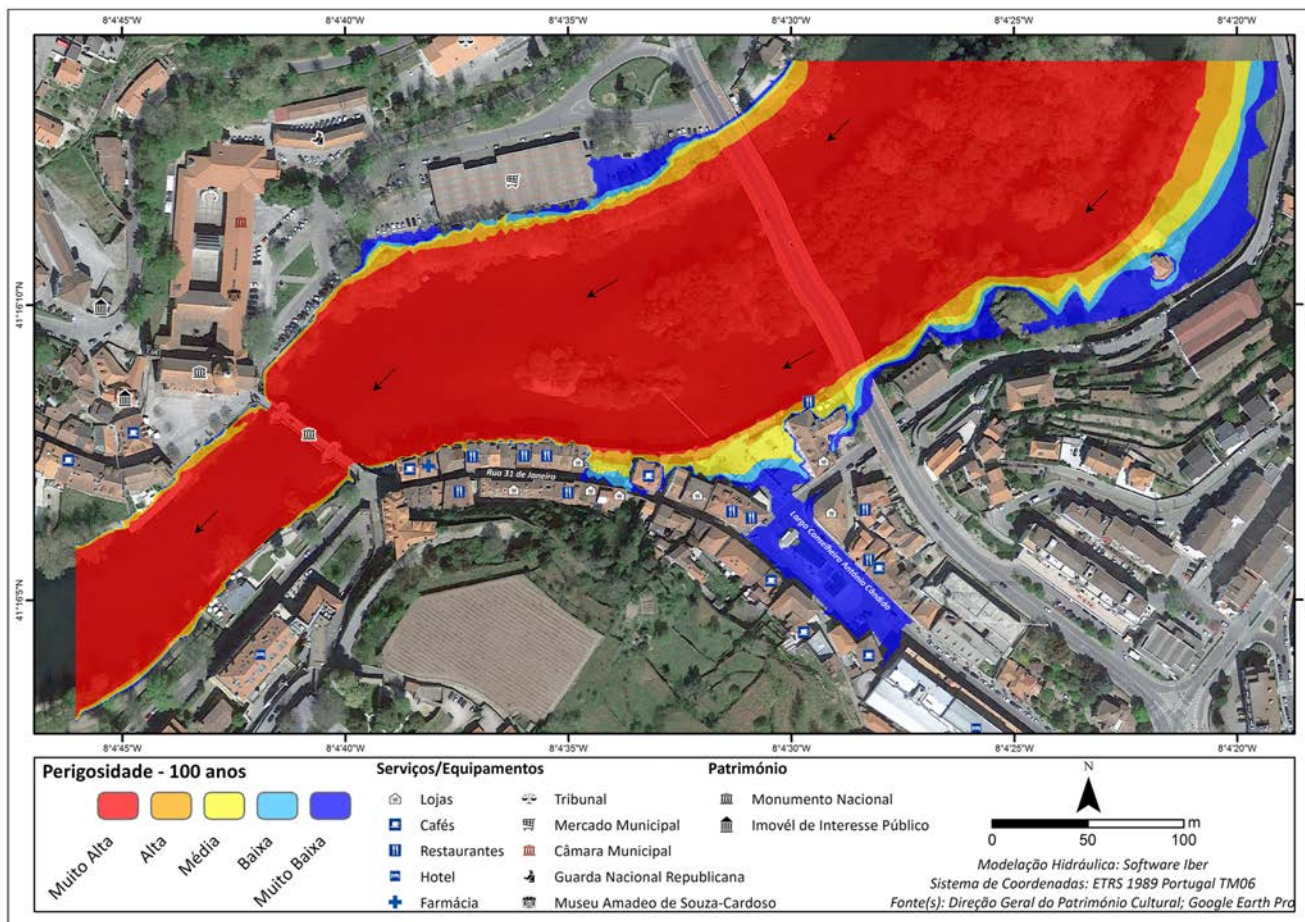


Figura 10 - Perigosidade a cheias segundo a metodologia da CNGRI.

Assim, na figura 10 é evidente a preocupante situação da margem esquerda do rio, que concentra inúmeras atividades que em situação de cheia são fortemente condicionadas, levando mesmo à sua interrupção temporária, aliando-se com os elevados prejuízos materiais. Em relação à margem direita é evidente que não existem tantos elementos expostos a estes processos, podendo provocar apenas condicionamentos no funcionamento do mercado municipal, e graves constrangimentos à circulação no caminho pedonal, cuja zona está classificada com uma perigosidade muito elevada.

4. Considerações Finais

Com o presente trabalho foi possível compreender a elevada frequência com que o centro histórico e

urbano da cidade de Amarante é atingido por cheias e inundações. Não obstante, à escala nacional persistem lacunas ao nível dos instrumentos de gestão do risco para dar resposta ao planeamento da cidade e da bacia hidrográfica do rio Tâmega. Neste sentido, a modelação hidráulica revela muitas potencialidades, destacando-se o facto de permitir elaborar cartografia que possibilita o conhecimento das zonas críticas à ocorrência de cheias, para um dado período de retorno, assumindo-se como importantes instrumentos para alguns trabalhos como, por exemplo, a revisão do Plano Diretor Municipal e o apoio à elaboração de um Plano de Gestão dos Riscos de Inundações no âmbito da implementação do 2.º ciclo da Diretiva comunitária que os enquadra. Este tipo de cartografia é fundamental para um adequado ordenamento do território, auxiliando na tomada de

decisão e na sugestão de medidas ao nível do planeamento de emergência. No entanto, importa salientar que a modelação hidráulica é apenas uma aproximação à realidade, estando sujeita a falhas e representações menos precisas e, apesar de gerar resultados fiáveis, está muito dependente dos dados de base, nomeadamente, de um MDS pormenorizado. Neste sentido, destaca-se a grande importância do trabalho de campo, que possibilitou a incorporação de novos elementos na cartografia de base (edifícios, muros/margens, ponte, passeios e ruas), de forma a obtermos um MDS mais próximo da realidade, uma vez que quanto mais rigorosos e detalhados forem os dados, mais fidedignos serão os resultados obtidos (MARAFUZ *et al.*, 2014; GONÇALVES, 2012). Considerando esta problemática, muitos autores afirmam que um dos aspetos mais importantes a considerar nos modelos hidráulicos é a representação geométrica do canal, que se inclui na qualidade dos modelos de terreno e superfície, sendo que no caso dos modelos unidimensionais se relaciona com a configuração das secções transversais, enquanto nos modelos bidimensionais está relacionada com a malha de elementos (MERWADE *et al.*, 2008). Para além disso, importa referir que a modelação hidráulica é também condicionada pela correta definição das condições de fronteira, *i.e.*, o local de entrada e saída do fluxo, e pela atribuição dos valores de rugosidade para cada tipo de uso do solo (ALEMSEGED e RIENTJES, 2007). Contudo, no setor estudado, além de algumas imprecisões que possam persistir no MDS, as falhas na modelação hidráulica podem estar relacionadas com problemas de drenagem de águas pluviais que encaminham o fluxo para áreas deprimidas, levando à acumulação de escoamento excedentário (MARAFUZ, 2011).

Agradecimentos

Os nossos agradecimentos à Câmara Municipal de Amarante pela cedência da cartografia de base (escala 1:10 000) à Faculdade de Letras da Universidade do Porto. Agradecer também à Direção Geral do Património Cultural por ter fornecido a imagem da ponte de São Gonçalo, em Amarante, com as respectivas medidas. Por fim, aos residentes no centro histórico e urbano da cidade de Amarante pelo contributo fundamental no esclarecimento de algumas dúvidas.

Referências Bibliográficas

- ALEMSEGED, T.; RIENTJES, T. Uncertainty Issues in Hydrodynamic Flood Modeling. **Proceedings of the 5th International Symposium for Spatial Data Quality**, 2007.
- APA (2012) **Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Douro**. Relatório de Base, Parte 2 - Caracterização e diagnóstico da região hidrográfica, p. 5-147.
- APA (2015) **Plano de Gestão dos Riscos de Inundações. Região Hidrográfica 3 - Douro**. Lisboa, APA, 106p.
- APEL, H.; ARONICA, G. T.; KREIBICH, H.; THIEKEN, A. H. Flood risk analyses—how detailed do we need to be? **Natural Hazards**, v. 49, n. 1, p. 79-98, 2009.
- BLADÉ, E.; CEA, L. Modelización matemática en lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable. **Jornadas Técnicas Sobre Hidráulica Fluvial**, 30 p, 2008.
- BLADÉ, E.; CEA, L.; CORESTEIN, G.; ESCOLANO, E.; PUERTAS, J.; VÁZQUEZ-CENDÓN, E.; DOLZ, J.; COLL, A. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, v. 30, n. 1, p. 1-10, 2014.
- CABEZAS, J. **Fundamentos Basicos de Hidraulica**. IICA Biblioteca Venezuela, 1983, 31p.
- CHAUDHRY, M. HANIF. **Open-Channel Flow**. Second ed. Springer, 2007. 523p.
- COSTA, C. **A comunicação dos Risco Naturais. Reflexões em torno das inundações de 2000/2001 na cidade de Amarante**. Dissertação (Curso Integrado de Estudos Pós-Graduados em Gestão de Riscos Naturais), Faculdade de Letras, Universidade do Porto, 2006. 144p.
- COSTA, F. S. **A importância dos processos morfogenéticos no ordenamento urbano - O caso de Amarante**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Faculdade de Letras, Universidade do Porto, 1998. 253p.
- COSTA, F. S. As grandes cheias do Tâmega em Amarante (o caso do período 1960-1986). **Atas do VI Congresso da Água**, p. 67-69, 2002.
- COSTA, F. S. O risco de inundação na cidade de Amarante (Norte de Portugal): contributo metodológico para o seu estudo. **Territorium**, 16, p. 99-111, 2009.
- CUNHA, P. P. Vulnerabilidade e risco resultante da ocupação de uma planície aluvial - o exemplo das cheias do rio Mondego

- (Portugal central), no Inverno de 2000/2001. **Territorium**, n. 9, p. 13-35, 2002.
- DELGADO, V. **A Perceção Social do Risco de Cheias em Amarante**. Dissertação (Mestrado em Riscos, Cidades e Ordenamento do Território). Faculdade de Letras, Universidade do Porto, 2014. 115p.
- DGPC (Direção Geral do Património Cultural). Disponível em: <http://www.patrimoniocultural.gov.pt/pt/>. Último acesso em: novembro/2017.
- DGT (Direção-Geral do Território). Disponível em: http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/cartografia_tematica/cartografia_de_uso_e_ocupacao_do_solo__cos_clc_e_copernicus_/. Último acesso em: novembro/2017.
- DI BALDASSARRE, G. **Floods in a Changing Climate: Inundation Modelling**. Cambridge University Press, 2012. 105p.
- EEA (2010) **Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe**. Technical report 13. European Environment Agency, 144p.
- EEA (2017) **Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016**. EEA Report No 1/2017. European Environment Agency, 419p.
- FERNANDES, F.; CUNHA, D.; MACIEL, J.L. Ponte do Arquinho - Uma ponte medieval em Amarante. **Revista Oppidum**, v. IV, n. 4, p. 51 - 62, 2010.
- GOMES, S. A. L.; COSTA, F. S. As cheias urbanas em Amarante - o caso da cheia do rio Tâmega em 2001. **Atas do VII Congresso da Água**, p. 1-14, 2004.
- GONÇALVES, P. **A Delimitação de Perímetros de Inundação no Rio Leça – modelação hidráulica para duas áreas do concelho de Matosinhos**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território). Faculdade de Letras, Universidade do Porto. 2012. 126p.
- IBER (2012) **Manual básico de usuario: Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas**. 22p.
- IBER (2014) **Manual de referencia hidráulico: Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas**. 59p.
- JULIÃO, R. P.; NERY, F.; RIBEIRO, J. L.; BRANCO, M. C.; ZÊZERE, J. L. **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 Protecção Civil, 91p, 2009.
- KUNDZEWICZ, Z.W.; MATA, L. J.; ARNELL, N. W.; DÖLL, P.; KABAT, P.; JIMÉNEZ, B.; MILLER, K. A.; OKI, T.; SEN, Z.; SHIKLOMANOV, I. A. Freshwater resources and their management. **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 2007. 210p.
- MARAFUZ, I. **Inundações Urbanas e Cheias Progressivas em Arouca. Casos de Estudo, Metodologias de Análise e Ordenamento do Território**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território). Faculdade de Letras, Universidade do Porto. 2011. 136p.
- MARAFUZ, I.; ADELINO, R.; GOMES, A. Perigosidade a cheias no rio Uíma (Santa Maria da Feira, Portugal): ensaio metodológico de suporte à implementação da Diretiva 2007/60/CE. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.15, n.4, p. 539-549, 2014.
- MERWADE, V.; OLIVEIRA, F.; ARABI, M.; EDLEMAN, S. Uncertainty in Flood Inundation Mapping: Current Issues and Future Directions. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 13, n.7, p. 608 - 620, 2008.
- MILLS, E. Insurance in a Climate of Change. **Science**, v. 309, n. 5737, p. 1040-1044, 2005.
- MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA. **Decreto nº 735/74 de 21 de Dezembro 1974**. I Série, Nº297, p. 1604-1606.
- MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, COMÉRCIO E INDÚSTRIA. **Decreto nº 136 de 23 de Junho de 1910**, p. 2163-2166.
- MOEL, H.; VAN ALPHEN, J.; AERTS, J. C. J. H. Flood maps in Europe - methods, availability and use. **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 9, n. 2, p. 289-301, 2009.
- MUÑOZ, A. **Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional (HEC-RAS) y bidimensional (IBER) en el análisis del rompimiento de presas de materiales sueltos**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Politénica da Catalunha. 2012. 72p.
- ORDEM DOS ENGENHEIROS (2016) **Caracterização das condições de escoamento do rio Mondego que deram origem às inundações em Coimbra em Janeiro de 2016**. 106p.
- PAIVA, I. Risco de inundação em Coimbra: factores físicos e acção antrópica: as inundações urbanas e as cheias do Mondego (1950/51 - 2003/04). **Cadernos de Geografia**, n. 24/25, p. 145-147, 2005/06.

- PEDROSA, A. S.; COSTA, F. S. As cheias do Rio Tâmega. O caso da área urbana de Amarante. **Territorium**, n. 6, p. 49-60, 1999.
- RAMOS, C.; REIS, E. As Cheias no Sul de Portugal em Diferentes Tipos de Bacias Hidrográficas. **Finisterra**, v. XXXVI, n.71, p. 61-82, 2001.
- RIBEIRO, O.; LAUTENSACH, H.; DAVEAU, S. **Geografia de Portugal II. O ritmo climático e a paisagem**. João Sá da Costa, 1988, p. 465-623.
- SÁ, L.; ALMEIDA, M.; FREIRE, P.; TAVARES, A. (2016) **Gestão do Risco de Inundação - Documento de Apoio a Boas Práticas**. ANPC/PNRRC, 44p.
- SANTOS, M.; HERMENEGILDO, C.; SOARES, L.; BATEIRA, C. Base de Dados DISASTER - Eventos Hidro-Geomorfológicos na Região Norte de Portugal de 1900 a 1950. **XIII Colóquio Ibérico de Geografia**, Santiago de Compostela, p. 980-989, 2012.
- SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos). Disponível em: <http://snirh.apambiente.pt/>. Último acesso em: dezembro/2017.
- TEDIM, F.; CARVALHO, S. Flood management strategies in frequent and small scale events: lessons learned from Amarante (Portugal). **Quaestiones Geographicae**, v. 29, n. 3, p. 69-84, 2010.
- TEDIM, F.; RAMOS, A.; CAMPOS, P.; CARVALHO, S.; RAMALHEIRA, D. Cem anos de história: A frequência e a intensidade das cheias do rio Tâmega na cidade de Amarante (Portugal) aumentaram ao longo do século XX? **Atas do XII Colóquio Ibérico de Geografia**, Porto, 23p, 2010.
- UE. Directiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Outubro de 2007 relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações. **Jornal Oficial da União Europeia**, L-288, p. 27-34, 2007.