

Análise comparativa de modelos digitais do terreno obtidos por satélite, para aplicação hidrológica em Portugal

Comparative analysis of digital terrain models obtained by satellite, for hydrological application in Portugal

Jorge E. Matos¹, Cíntia F. Santos², Raquel Matos³

^{1, 2} Mathidro Engineering Lda., Campo Mártires da Pátria 144-A, Porto, Portugal

³ Kengo Kuma & Associates Ltd., Tokyo, Japão

RESUMO: Os Modelos Digitais do Terreno (MDT) desempenham um papel crítico na modelação hidrológica e hidráulica. Os mapas de inundações, realizados com esses modelos, contêm informação que depende, em grande parte, da precisão do MDT. Em Portugal, os MDT com resolução de 10 ou 5 m que existem não cobrem todo o território, são caros e de difícil acesso, o que faz dos obtidos por via satélite, de acesso livre e gratuito, uma ferramenta essencial para os estudos hidrológicos e hidráulica dos recursos hídricos. Os diferentes MDT gratuitos disponíveis foram obtidos por diferentes satélites, em diferentes datas e com diferentes algoritmos utilizados na sua elaboração. Por essa razão, apresentam naturalmente diferenças significativas quer em altitude, quer nos resultados que proporcionam neste tipo de estudos. Assim, é necessário avaliar as diferenças na introdução dos MDT atualmente disponíveis para simulação e previsão de inundações, assim como reduzir possíveis erros que estes possam apresentar. Neste estudo, apresenta-se uma comparação de oito MDT de livre acesso, utilizando a análise estatística dos ficheiros raster de cada modelo e também uma simulação de inundação urbana em duas bacias hidrográficas em Portugal, na Bacia do Rio Leça, a norte da cidade do Porto, e na Bacia do Rio Arade, no Algarve, usando um *software* de modelação hidrodinâmica a duas dimensões.

Palavras Chave: Hidrologia, mapas de inundação, modelação hidráulica, MDT.

ABSTRACT: Digital Terrain Models (DTM) play a critical role in hydrological and hydraulic modeling. Flood maps created with these models contain information that largely depends on the accuracy of the DTM. In Portugal, the existing DTM with a resolution of 10 or 5 m do not cover the entire territory nor are they free. Existing national DTM with this resolution are still scarce, expensive and difficult to access, which makes those obtained via satellite, freely accessible, an essential tool for hydrological and hydraulic studies of water resources. The different free DTM available were obtained by different satellites, on different dates and prepared with different algorithms. For this reason, they naturally present significant differences both in altitude and in the results they provide in this type of studies. Therefore, it is necessary to evaluate the differences in the introduction of currently available MDTs for flood simulation and forecasting, as well as reducing possible errors that they may present. In this study, a comparison of eight freely accessible MDTs is presented, using statistical analysis of the raster files of each model and also a simulation of urban flooding in two river basins in Portugal, in the Leça River Basin, north of the city of Porto, and in the Arade River Basin, in the Algarve, using two-dimensional hydrodynamic modeling software.

Keywords: Hydrology, flood maps, hydraulic modeling, DTM.

1. INTRODUÇÃO

A ameaça de inundações nas suas diversas formas, resulta em última análise, em perdas económicas e sociais, com a devastação de propriedades, e perda de vidas humanas e materiais. Uma avaliação precisa do risco de inundação em áreas urbanas em cidades costeiras e fluviais é, portanto, necessária para compreender os riscos de inundação, fornecer previsões precisas de ocorrência destes desastres naturais, assim como preparar respostas prontas a este tipo de emergências.

O mapeamento das áreas inundadas, assim como a avaliação das profundidades e velocidades do escoamento em situação de cheia, é imprescindível para identificar áreas de potencial impacto e destruição e assim preparar uma resposta adequada das populações de modo a minimizar a gravidade destas ocorrências.

Devido à constante evolução das capacidades de cálculo dos computadores, bem como à simplificação e desenvolvimento de algoritmos dedicados, nos anos mais recentes os modelos hidrodinâmicos têm assumido um papel cada vez mais importante na simulação hidráulica de inundações fluviais e costeiras. E para usufruir dos mais avançados modelos hidrodinâmicos é necessário dispor de modelos digitais do terreno (MDT).

Em Portugal, tradicionalmente, os estudos hidrológicos e hidráulicos de linhas de água eram realizados recorrendo a cartas militares, á escala 1/25.000, publicadas pelo Instituto Geográfico do Exército, cobrindo cada uma delas uma área de 16x10 km². Estas cartas, presentemente, podem ser compradas online em formato raster, mas são uma reprodução da carta a duas dimensões. Além do custo de aquisição dessas cartas, a transformação de uma carta bidimensional em tridimensional, para uso nos modernos algoritmos de modelação hidráulica, acarretaria muitas horas de trabalho, e correspondente custo laboral, aumentando os custos globais dos serviços de engenharia.

Por essa razão, á medida que foram sendo disponibilizados para o público, os modelos digitais obtidos via satélite, estes foram gradualmente sendo usados pelos especialistas para os modelos hidrológicos e hidráulicos das linhas de água. No entanto, para que o cálculo hidráulico destes modelos seja o mais aproximado à realidade possível, é necessário que o MDT seja o mais preciso e que corresponda, de facto, em todas dimensões, à topografia do terreno natural, mas descartando elementos que podem alterar o escoamento superficial, e impedir uma avaliação incorreta de pendentos, como grupos de grandes árvores ou edifícios.

Os produtos MDT gratuitos e de livre acesso têm sido amplamente utilizados em simulação de inundações e mapeamento. No entanto, a resolução e a precisão relativamente fracas dos MDT de acesso livre limitam significativamente a capacidade de estimar as áreas de inundação e riscos relevantes (Sampson *et al.* 2016). Foi já demonstrado que a baixa qualidade dos dados do MDT pode levar a enganos graves na previsão de inundações (Hawker *et al.* 2018). Os resultados são afetado principalmente pela resolução espacial e pelo erro vertical dos MDT.

Por um lado, a baixa resolução espacial afeta o delineamento das características da superfície e a precisão da simulação de inundação (Merwade 2015). Por outro lado, os erros de elevação (direção vertical) também podem afetar a precisão da simulação do terreno e, portanto, da simulação de inundação (Talchabhadel *et al.* 2021). É evidente a necessidade da utilização de MDT precisos e de resolução tal, que não altere significativamente o escoamento superficial, de modo a obter uma modelação rigorosa e uma gestão de inundações precisa.

Neste estudo comparam-se oito MDT de acesso livre, produzidos por organizações internacionais, com as cartas militares portuguesas, de modo a perceber qual deles se aproxima melhor ao território nacional. Essa avaliação e comparação foi feita de três formas: (1) analisando pontualmente pontos cotados das cartas militares, com as cotas dos MDT; (2) comparando trechos de linhas de nível das cartas com as cotas obtidas nos mesmos locais nos MDT; e (3) modelando uma cheia centenária num troço de duas bacias hidrográficas e comparando áreas e profundidades de escoamento dos mapas de inundação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As subseções seguintes apresentam uma breve introdução da área de estudo, os conjuntos de dados empregues e suas propriedades, e os métodos usados.

2.1 Bacias hidrográficas estudadas

Para analisar possíveis alterações de resultados causadas pelas diferentes latitudes do território nacional, optou-se por realizar este estudo em duas bacias hidrográficas posicionadas uma a norte e outra a sul do país. A norte escolheu-se a bacia do rio Leça, situada a norte do Porto, e a Sul a bacia do rio Arade, cuja foz é em Portimão, no Algarve. O relevo e forma destas duas bacias pode ser visto nas figuras 1 e 2.

A bacia hidrográfica do rio Leça tem uma área aproximada de 189,18 km² e cotas que variam entre 0 e 535 metros de altitude. Está orientada na direção Este-Oeste e é limitada a Norte pela bacia do rio Ave e a Sul e Este pela bacia do rio Douro. O rio Leça nasce a uma cota aproximada de 457 m, entre os Montes de Santa Luzia e do Lavradio, a Norte da localidade de Redundo, no distrito de Santo Tirso. Percorre 48,61 km antes de desaguar no oceano Atlântico, através do porto de Leixões

que é o segundo maior do país, a cerca de 1900 m a Norte da cidade do Porto. Os seus principais tributários são a Ribeira do Arquinho, que desagua no Leça em São Mamede de Infesta, Matosinhos, e a Ribeira de Leandro, que encontra o Leça perto da localidade de Travagem, na Maia. Esta bacia, que ocupa território de quatro municípios do distrito do Porto - Santo Tirso, Valongo, Maia e Matosinhos – pertence à região hidrográfica do Cávado, Ave e Leça (RH2).

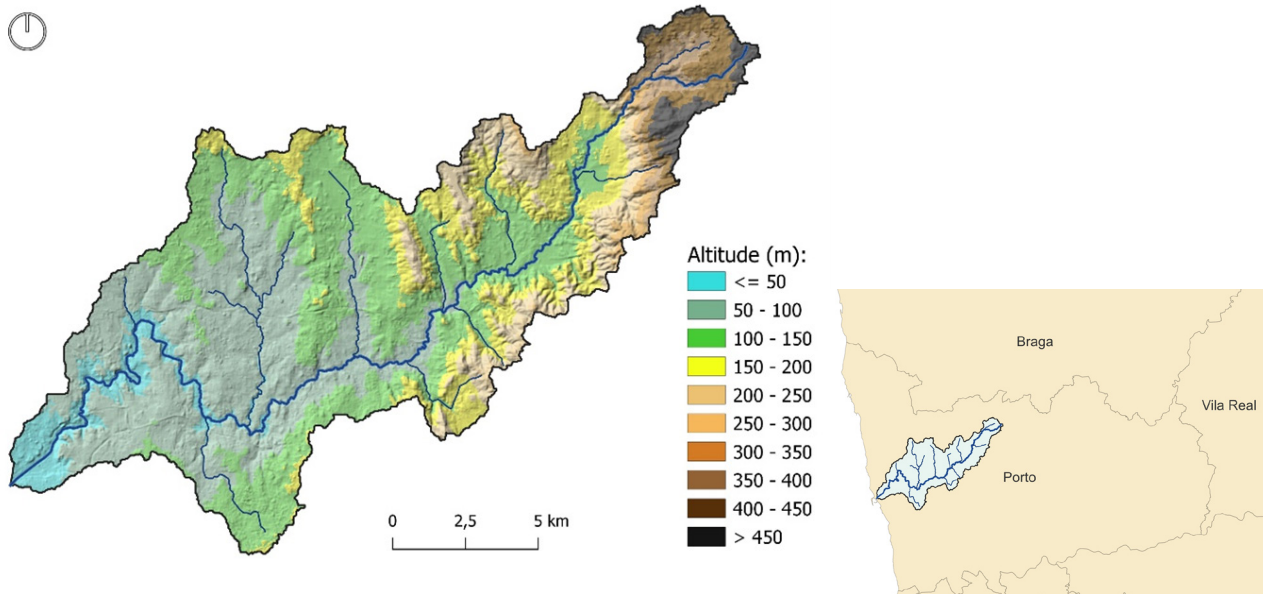


Figura 1. Área, relevo e localização da bacia hidrográfica do rio Leça.

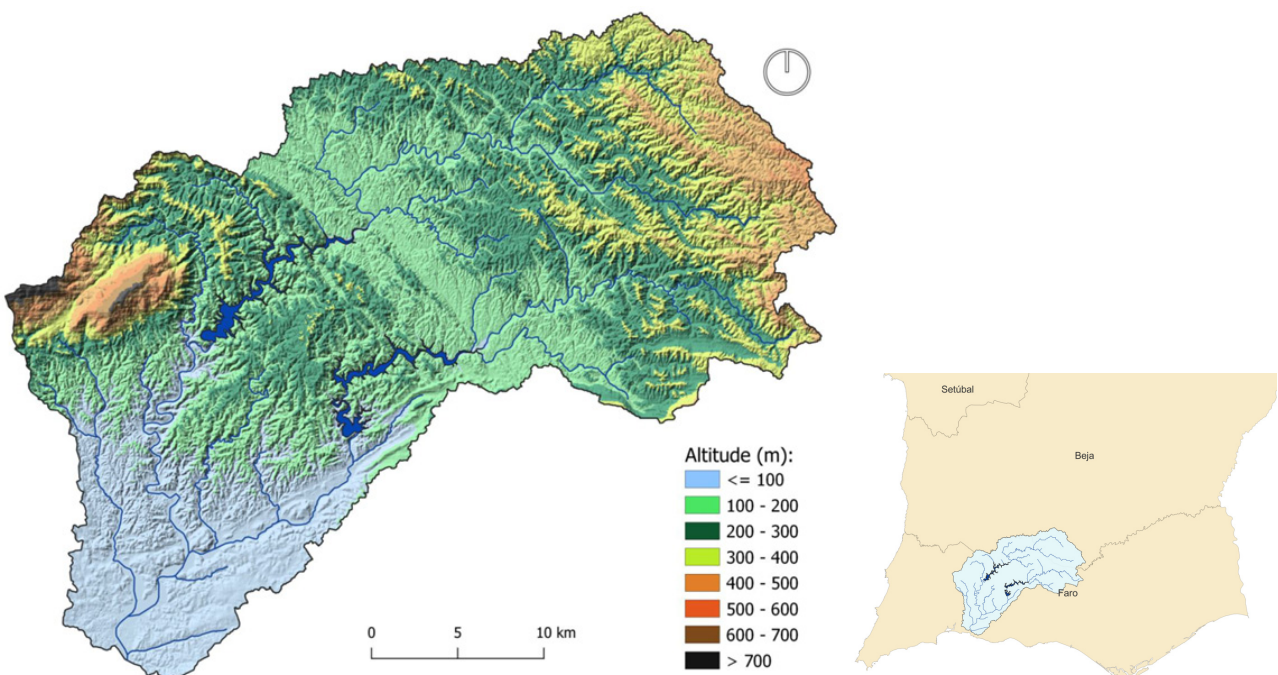


Figura 2. Área, relevo e localização da bacia hidrográfica do rio Arade.

A bacia hidrográfica do rio Arade tem uma área aproximada de 972,24 km² e cotas que variam entre os 0 e os 902 m de altitude, em Foia, no alto da serra de Monchique. A sua orientação é Nordeste-Sudoeste. É limitada a Norte pela bacia do rio Mira, a Este pelas bacias das ribeiras de Alcantarilha e de Quarteira, e a Oeste pelas bacias das ribeiras da Torre, do Farelo, de Aljezur e do rio Seixe. O rio Arade, que começa como ribeira do Arade, nasce a uma cota aproximada de 485 m, perto da localidade de Malhão, freguesia de Salir, conselho de Loulé. O rio Arade tem um comprimento de 72,03 km e a sua foz situa-se junto à cidade de Portimão. Tem como principal tributário a ribeira de Odelouca, cuja bacia hidrográfica tem 507,27 km², o que representa 52% da área total da bacia do rio Arade. Esta bacia, que abrange dois concelhos dos distritos do Beja - Ourique e Almodôvar - e cinco do distrito de Faro - Loulé, Silves, Monchique, Portimão e Lagoa - pertence à região hidrográfica do Algarve (RH8).

2.2 Modelos digitais do terreno utilizados

Neste estudo analisamos oito conjuntos de dados MDT globais que são livremente acessíveis: SRTM, ASTER-GDEM, NASADEM, EURODEM, ALOS-WORLD, COPERNICUS, FABDEM e ALOS-PALSAR. Quase todos com resolução de 30 m, com exceção do último, alegadamente com 12,5 m de resolução.

SRTM: A primeira versão dos dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) foi lançada em 2003 com resoluções horizontais de 30 m e 90 m. Os conjuntos de dados publicados inicialmente foram processados usando uma interpolação algorítmica para preencher as lacunas de dados do radar (Reuter *et al.* 2007). Os erros absolutos de elevação do SRTM no quantil de 90% (LE90) variam entre 5,6 cm e 9,0 m (Rodrigue *et al.* 2006). Neste estudo foram usados MDT com resolução de 30 m.

ASTER GDEM: é um conjunto global de dados de elevação de um arco de segundo (30 m) baseado nos produtos do novo satélite de observação da Terra lançado pelas equipas científicas do Laboratório de Propulsão a Jato (JPL) da NASA e do Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (METI). Este tem a vantagem de uma ampla cobertura de dados, cobrindo a maior parte das regiões do globo terrestre, entre as latitudes 83N e 83S. O erro médio das elevações do ASTER foi estimado em 8,68 m (Tachikawa, *et al.* 2011). A versão 2 do ASTER-GDEM, usada neste estudo, foi lançada em outubro de 2011 e melhora a resolução espacial, usando 260.000 pares de imagens adicionais e melhora a precisão horizontal e vertical (Tachikawa *et al.* 2011).

NASADEM: este produto reprocessa os dados SRTM, com elevações do ASTER GDEM, para melhorar os dados altimétricos. As novas e melhoradas altitudes do SRTM em NASADEM são o resultado do melhor controlo vertical baseado em pontos de controlo no solo da missão Satélite de Gelo, Nuvens e Elevação da Terra (ICESat), e as lacunas no SRTM foram reduzidas pelo uso de um novo algoritmo (Crippen *et al.* 2016). NASADEM cobre 80% das regiões terrestres e inclui latitudes entre 60N e 56S. A versão usada neste estudo foi divulgada em fevereiro de 2020, e tem 30 m de resolução horizontal.

AW3D30: Os dados ALOS WORLD 3D com 30 m de resolução, são obtidos pelo Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping (PRISM) no satélite de observação avançada do terreno, ALOS (Tadono *et al.* 2014). Os valores de elevação são obtidos por *software* de cálculo a partir de fotografias obtidas por três câmaras com diferentes ângulos de visão, o que efetivamente melhora a precisão. AW3D30 é uma versão transformada a partir do AW3D5 (que não é de uso livre), com resolução de 30 m e cobertura global de 83N a 82S. O erro vertical médio do AW3D5 em 5121 pontos distribuídos em 127 blocos de imagens, é de 4,40 m (Takaku *et al.* 2016). Os dados AW3D30 usados neste estudo são da versão 2.3, lançada em abril de 2019 com 30 m de resolução horizontal.

Copernicus GLO-30: O MDT Copernicus é um modelo digital de superfície (MDS) que representa a superfície da Terra, incluindo edifícios, infraestruturas e vegetação. Este MDS é derivado de um outro denominado WorldDEM, onde foram incluídos o achatamento dos corpos d'água e o fluxo consistente dos rios. Além disso, também foram editadas linhas costeiras e ilhas, assim como características especiais como aeroportos e formas improváveis de terreno.

O produto WorldDEM é baseado nos dados de radar de satélite adquiridos durante a Missão TanDEM-X, que foi financiada por uma Parceria Público-Privada entre o Estado Alemão, representado pelo Centro Aeroespacial Alemão (DLR) e a Airbus Defence and Space.

A Copernicus tem dois produtos; o GLO-30, que foi usado neste estudo, oferece cobertura global com resolução de 30 m; e o GLO-90 que oferece cobertura global com resolução de 90 m.

EuropeDTM: Este MDT para a Europa Continental foi elaborado usando Ensemble Machine Learning (EML) a partir de modelos digitais de superfície disponíveis publicamente. Cerca de 9 milhões de pontos foram sobrepostos em relação aos mapas MERITDEM, AW3D30, GLO-30, EU DEM, assim como

a altura das copas das árvores (GLAD – Global Land Analysis & Discovery), e mapas de cobertura de solos com árvores e superfícies de águas superficiais. Um modelo de previsão de conjunto foi ajustado usando floresta aleatória, Cubist e GLM, e usado para prever a cota mais provável do terreno (sem vegetação). (Hengl *et al.* 2020).

FABDEM: é um produto derivado do Copernicus GLO-30, e elaborado na Universidade de Bristol (UK) onde, por “*machine learning*”, se tentou “retirar” desse MDT os edifícios e florestas (FAB – Forest and Buildings). Tem também resolução de 30 m. Segundo os seus autores (Hawker *et al.* 2020) o método usado para a sua produção permite reduzir o erro vertical médio absoluto em áreas urbanas de 1,61 para 1,12 m, e em florestas de 5,15 a 2,88 m, apresentando este modelo digital como sendo mais preciso do que outros mapas de elevação globais existentes.

ALOS-PALSAR RTC: são baseados nos SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) ou do NED (National Elevation Dataset) dos Estados Unidos. Por um processo de correção radiométrica do terreno (RTC), o espaçamento de pixels do MDT de origem foi ajustado para corresponder ao da imagem Terrain Corrected ao qual ele está agregado e não corresponde à resolução do MDT. Estes ficheiros MDT fornecidos com os produtos “Terrain Corrected” destinam-se apenas a ser usados como referência para a interpretação dos resultados do processo de correção radiométrica do terreno. Eles não devem

ser usados diretamente como um MDT normal, pois os valores de elevação são alterados pela correção do geóide na preparação para o processamento de correção radiométrica.

A opção de comparar este produto aos restantes MDT’s, deve-se à propalada melhoria da sua resolução (12,5 m) que pode induzir em erro os menos informados.

2.3 Metodologia

Nas subseções que se seguem apresentam-se os três processos principais do estudo, que incluem o processamento do modelo digital de elevação, a análise das diferenças altimétricas, a simulação dos eventos de inundação e a avaliação da precisão da simulação de inundação.

2.3.1 Processamento dos Modelo Digital de Elevação

Os oito MDT usados para cada bacia deste estudo foram “descarregados” dos sites respetivos e foram reprojatados para as coordenadas EPSG:3763 - ETRS89/Portugal TM06, depois recortados de acordo com as áreas de cada bacia, entretanto calculadas com ferramentas apropriadas do *software* SIG, e finalmente coloridos de acordo com a sua hipsometria.

A primeira análise efetuada foi o aspeto gráfico dos MDT. Nas figuras 3 e 4 podem ver-se pormenores das duas bacias hidrográficas recorrendo aos oitos modelos digitais do terreno.

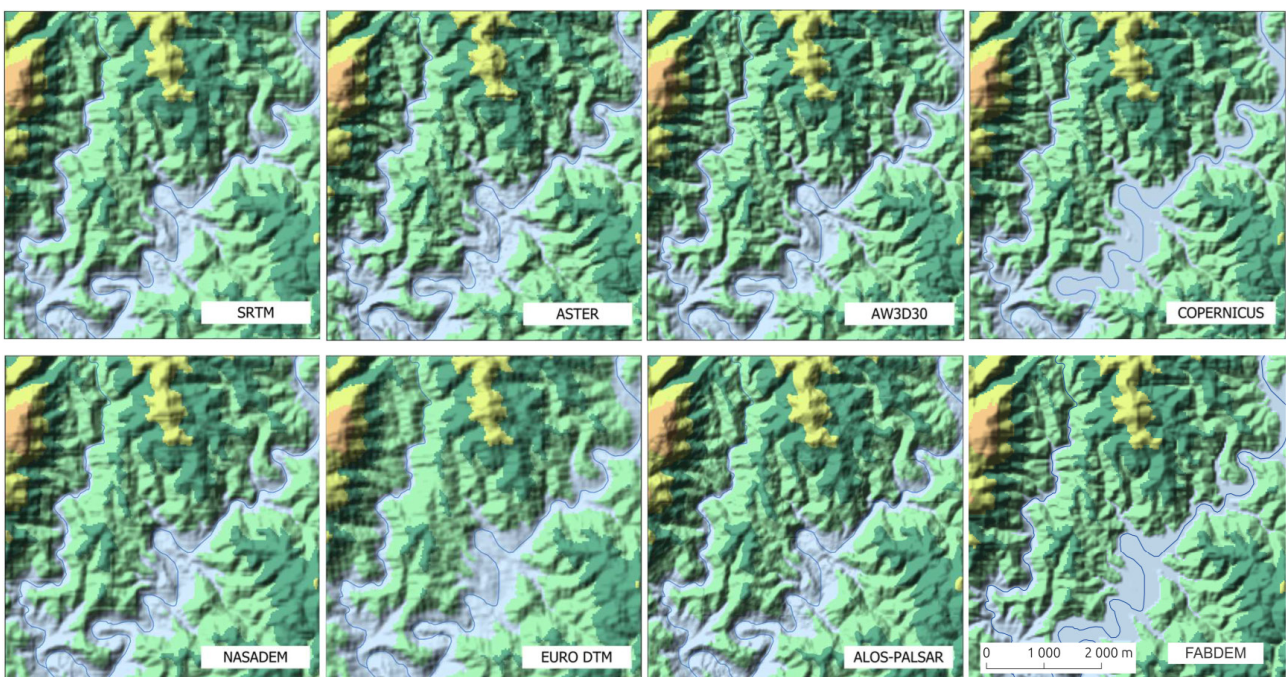


Figura 3. Representação altimétrica de pormenor da bacia hidrográfica do Rio Arade, com os diferentes MDT.

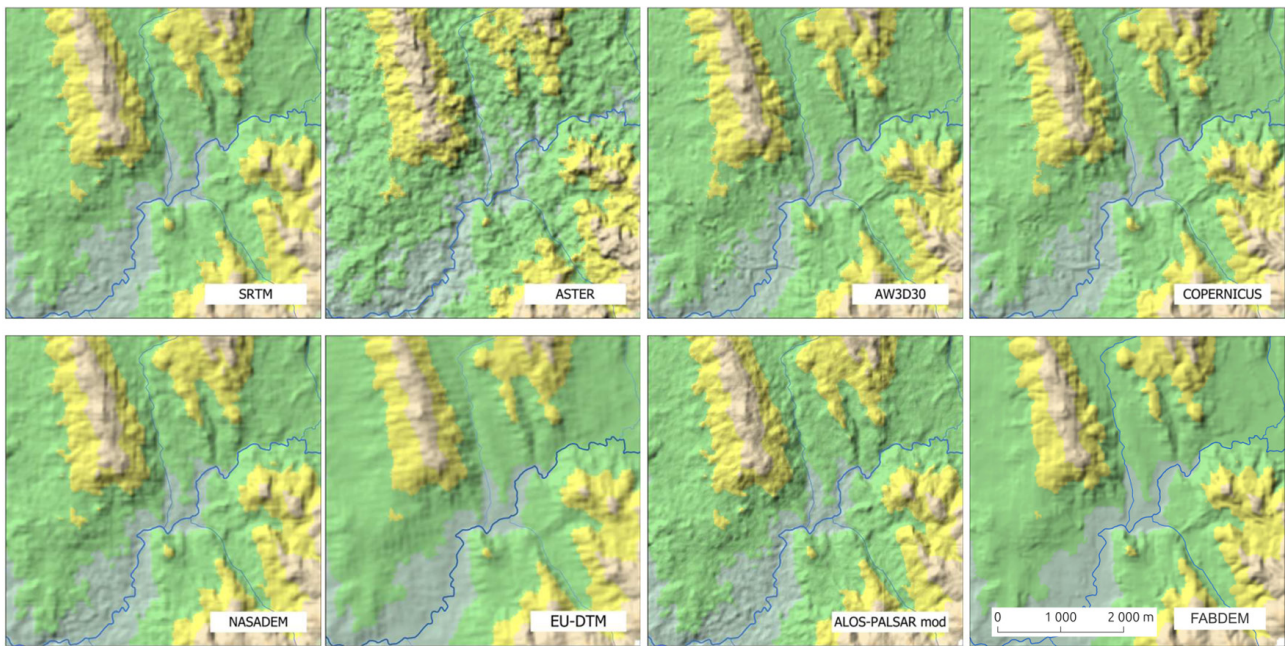


Figura 4. Representação altimétrica de pormenor da bacia hidrográfica do Rio Leça, com os diferentes MDT.

Apesar da avaliação gráfica não poder ser medida por parâmetros exatos e depender mais do gosto e sensibilidade pessoal de quem avalia, é possível sentir alguma simpatia por uns modelos e antipatia por outros, que parecem menos naturais. No caso dos pormenores do rio Arade, que abrangem a albufeira da barragem de Odelouca, construída em 2009, é possível notar em alguns MDT (COPERNICUS e FABDEM) o nível de água da albufeira, enquanto nos restantes não se representa o nível da água da albufeira. No pormenor da bacia do rio Leça sobressai a “aspereza” do modelo ASTER e a “lisura” do modelo EU-DTM.

Todos os MDT, sendo obtidos por tratamento informático de fotografias obtidas por satélite, representam apenas o terreno acima do nível da água e, portanto, não são utilizáveis para a análise batimétrica dos cursos dos grandes rios ou de albufeiras.

Foi também analisado o perfil longitudinal das principais linhas de água das duas bacias, o que permitiu detetar logo uma grande diferença de cotas entre o modelo ALOS-PALSAR e os restantes. Na figura 5 apresenta-se o perfil longitudinal do rio Arade obtido com recurso aos modelos digitais, onde é evidente que o modelo ALOS-PALSAR está claramente desfasado de todos os outros e da realidade, contendo cotas que, em média, estão 47,6 metros acima dos restantes. Na bacia do rio Leça, essa diferença média é de 56,8 metros. Este produto foi obtido a partir de MDT’s pré-

existentes, como os SRTM (resolução de 30 m) e os NED (National Elevation Dataset dos Estados Unidos, com resolução de 10 m), e artificialmente organizado com pixels de 12,5 m, de modo a coincidir com as imagens satélite LandSat 8, com as quais é fornecido, no pacote RTC.

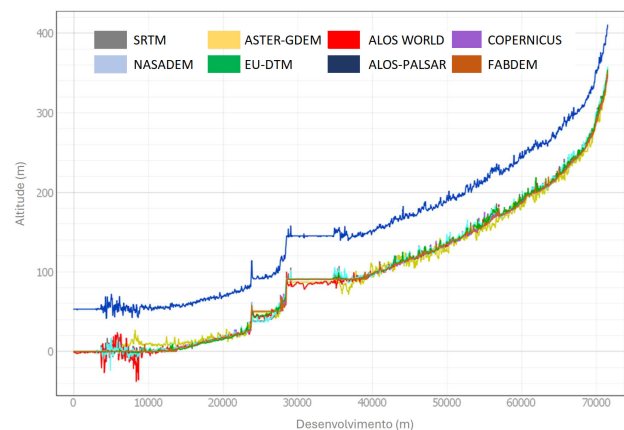


Figura 5. Perfil longitudinal do rio Arade, obtido pelos MDT.

As diferenças de cotas médias, encontradas no produto ALOS PALSAR RTC, entre o Norte e o Sul de Portugal, talvez se devam à conversão de alturas do geoide de cada MDT de origem, para o elipsoide WGS84, que usaram como referência. Estas conversões altimétricas foram elaboradas pelo ASF (Alaska Satellite Facility) recorrendo a ferramentas informáticas, por eles desenvolvidas, a partir de alturas ortométricas com dados verticais EGM96.

Por esta razão, nas análises comparativas que se seguem, o modelo ALOS-PARSAR foi “rebaixado” das diferenças médias encontradas, em cada bacia, de modo a permitir a sua comparação com os restantes modelos.

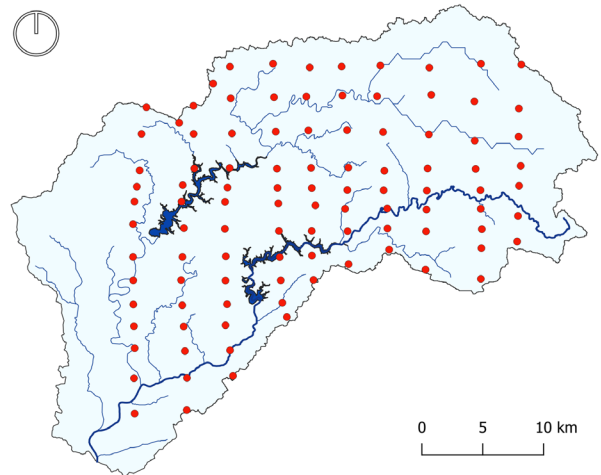
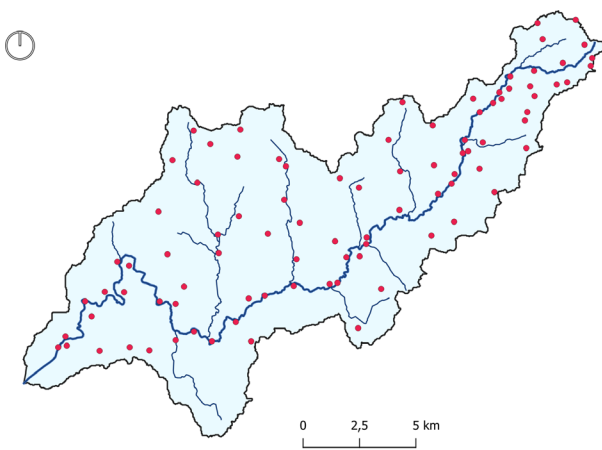
2.3.2 Análise das diferenças altimétricas pontuais

Seguidamente analisou-se a exatidão das cotas dos MDT, fazendo uma comparação com os pontos cotados das cartas militares portuguesas. Assim, em cada bacia hidrográfica foram escolhidos aproximadamente uma centena de pontos, correspondentes a locais com cotas assinaladas nas cartas militares e foi comparada a cota vertical com as dadas pelos MDT. Nas figuras 6 e 7 podem ver-se

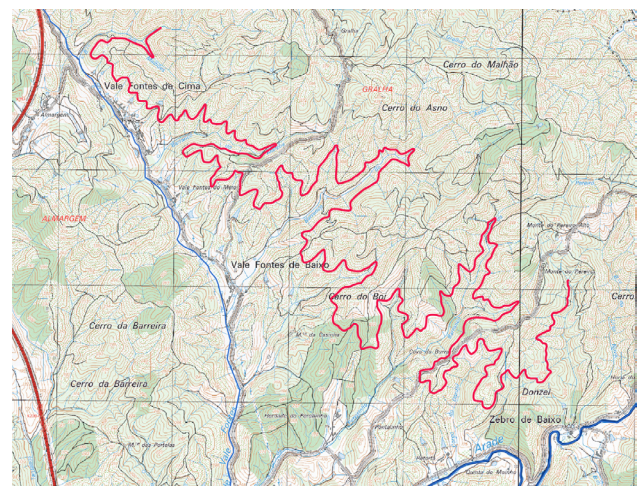
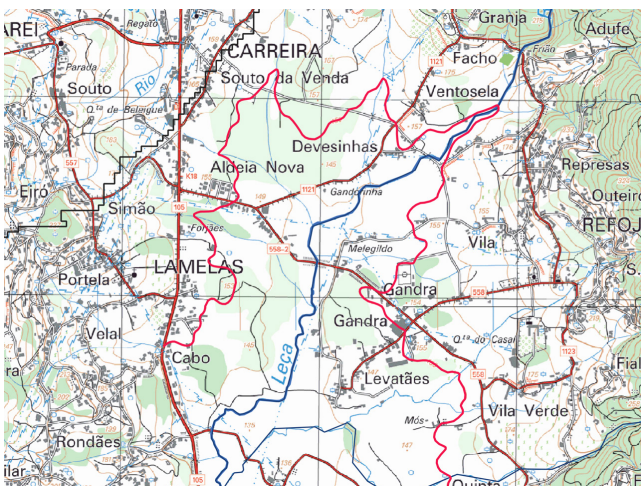
os locais onde foram feitas essas comparações nas duas bacias hidrográficas.

2.3.3 Análise das diferenças altimétricas lineares

Dado que os pontos cotados das cartas militares são maioritariamente pontos com cotas elevadas, foi também feita uma análise linear das diferenças de altitude. Para tal, foram digitalizadas sobre as cartas militares troços de curvas de nível com cerca de 10 km de extensão. As curvas de nível escolhidas foram as de 150 m para a bacia do rio Leça e de 250 m para a bacia do rio Arade. Nas figuras 8 e 9 pode ver-se a localização das curvas de nível nas duas bacias hidrográficas e nas figuras 10 e 11 apresentam-se as diferenças observadas em relação aos diferentes MDT.



Figuras 6 e 7. Pontos escolhidos para comparação de cotas, nas duas bacias hidrográficas.



Figuras 8 e 9. Localização das curvas de nível escolhidas para comparação nas bacias do rio Leça (8) e do rio Arade (9).

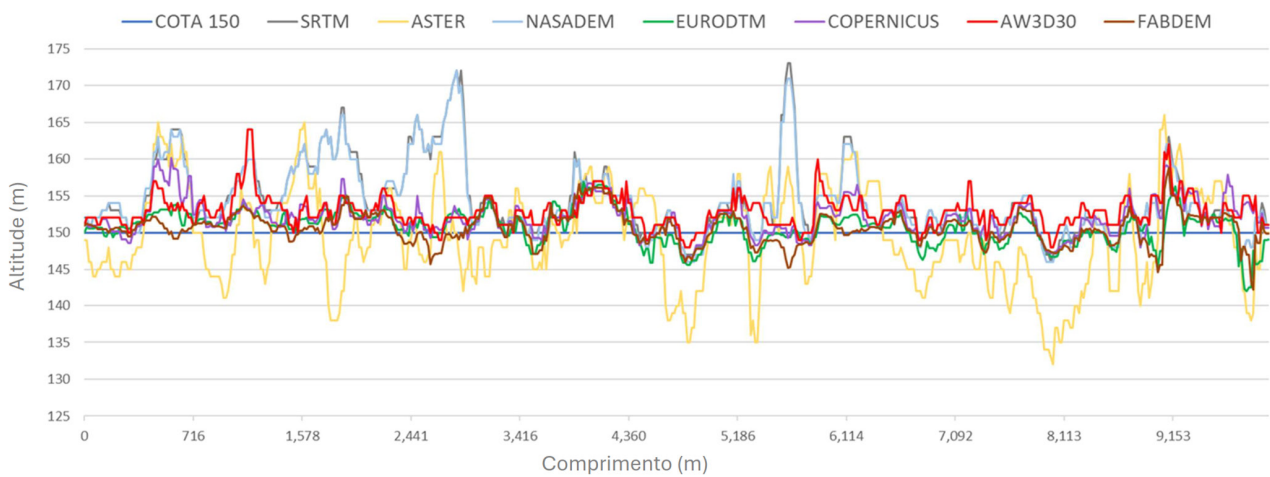


Figura 10. Comparação de cotas dos MDT com a curva de nível 150, na bacia do rio Leça.

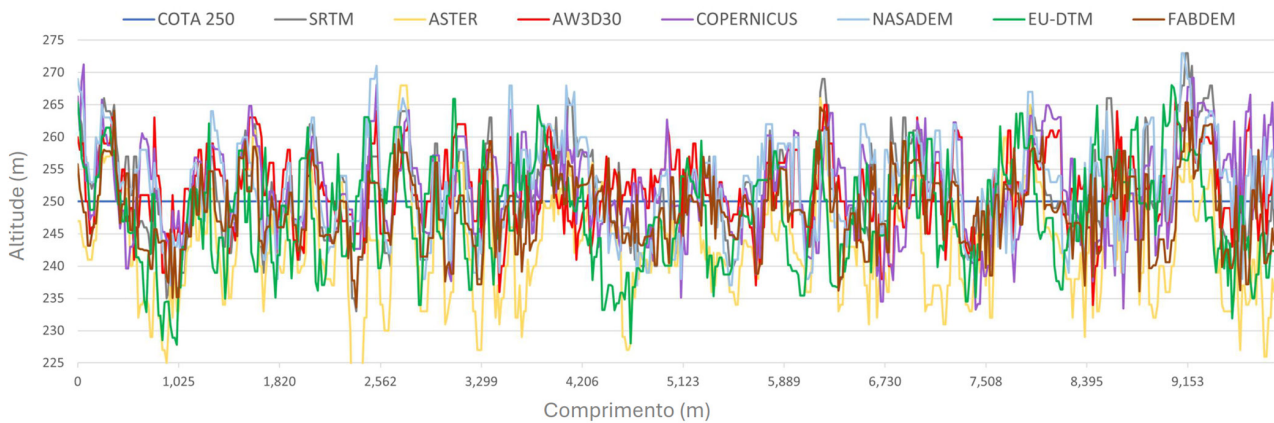


Figura 11. Comparação de cotas dos MDT com a curva de nível 250, na bacia do rio Arade.

2.3.4 Mapas de inundação

As análises de diferenças de altimetria, sejam elas pontuais ou lineares, não permitem avaliar completamente a adequabilidade de um MDT para utilização em estudos de hidráulica fluvial, uma vez que não nos dão pistas sobre o comportamento hidráulico no plano horizontal ou em planta. A melhor forma de fazer essa análise é modelando uma ocorrência de uma inundação e isso foi feito para as duas bacias hidrográficas com todos os MDT em análise.

Para se comparar cada um dos MDT com o terreno real, foi necessário obter primeiro um modelo digital do terreno real de um trecho de cada bacia hidrográfica em estudo. Para isso, com base nas curvas de nível e pontos cotados das cartas militares, foi elaborado um modelo tridimensional com recurso a um *software* SIG, (SAGA GIS v. 9.1.3) pelo método de interpolação "Multilevel B-Spline".

As áreas utilizadas para cada bacia foram de cerca de 2,5x2,5 km², no caso do rio Leça, e 7x7 km², no caso do rio Arade. Nas figuras 12 e 13 podem ver-se os modelos digitais do terreno real e o mapa de inundação nos trechos escolhidos do rio Leça e Arade, respetivamente.

Depois de obtido o modelo digital real foi simulada uma situação de inundação. Para esse efeito foi utilizado o *software* HEC-RAS, na versão 6.2, e foi desenvolvida uma análise do escoamento não-permanente a 2 dimensões. Este *software* foi desenvolvido pelo United States Army Corps of Engineers e nas suas últimas versões permite desenvolver uma simulação em duas dimensões de escoamentos variados através da utilização das equações de Saint-Venant e/ou das equações de difusão da onda.

O modelo digital elaborado com base nas cartas militares tem uma resolução de 0,5 m o que permite um escoamento superficial modelado muito mais

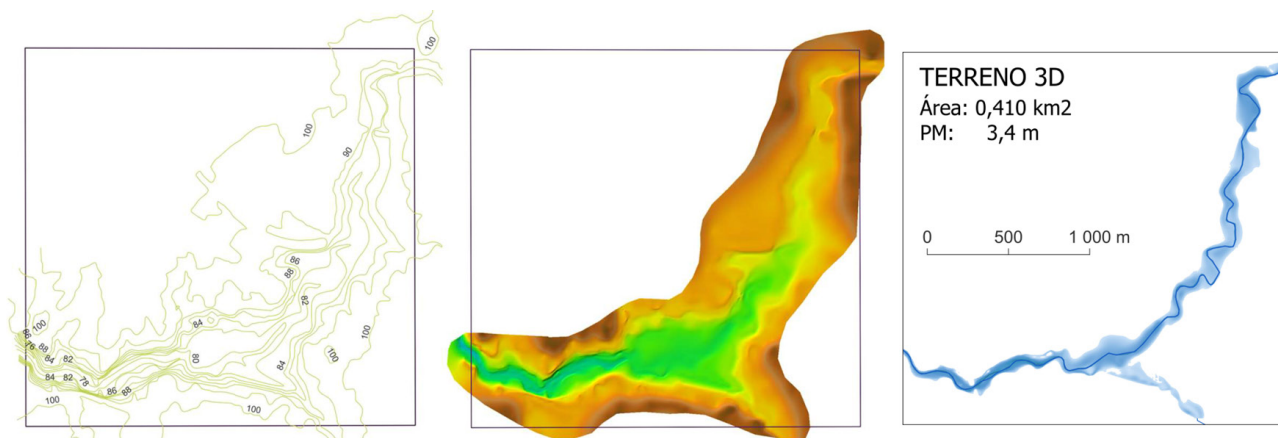


Figura 12. Modelação do terreno real e correspondente mapa de inundação no rio Leça (área de 2,5x2,5 km²).

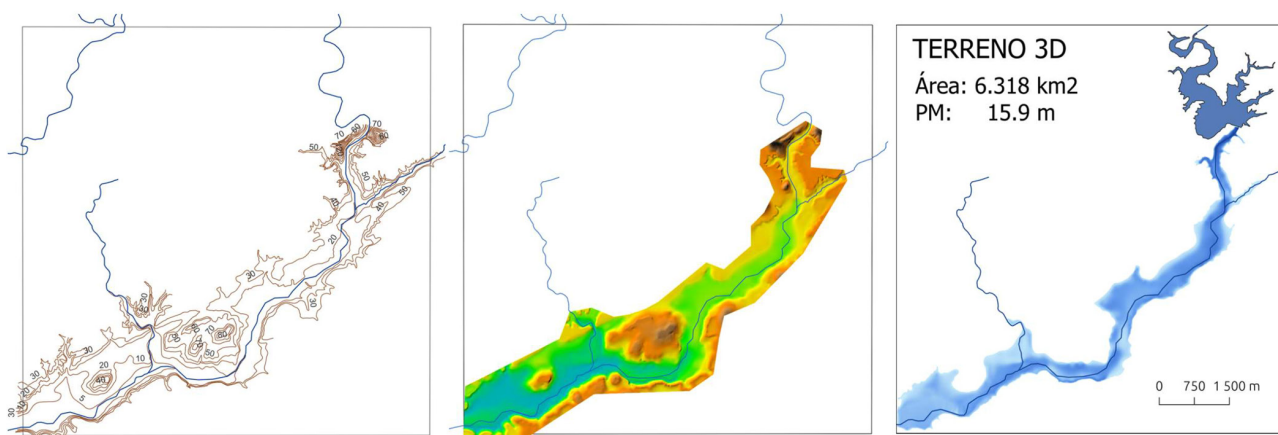


Figura 13. Modelação do terreno real e correspondente mapa de inundação no rio Arade (área de 7x7 km²).

aproximado á realidade do que os MDT em estudo que têm, recorde-se, uma resolução de 30 metros. Em seguida fizeram-se os mapas de inundação das mesmas zonas e com os mesmos caudais de cheia, para os vários MDT e comparou-se a área inundada e as profundidades máximas de escoamento.

Para o rio Leça considerou-se uma cheia relativamente frequente (período de retorno de 5 anos), numa zona de relevo amplo ocupada por parques urbanos recreativos, com um caudal de cheia de 60 m³/s. Para o rio Arade esse cenário não seria plausível, quer pela ausência de precipitação na zona, quer pela existência de duas barragens no rio (Odelouca e Funcho) cujas albufeira absorvem e amortecem as possíveis cheias que possam ocorrer. Por essa razão, para o rio Arade simulou-se a destruição por rompimento da barragem de Odelouca, o que originaria uma onda de cheia de 5700 m³/s, com efeitos catastróficos na cidade

de Silves. Para ambos os rios analisou-se a área inundada e a profundidade máxima da cheia (no ponto mais fundo).

3. RESULTADOS

3.1 Diferenças altimétricas pontuais

Apesar da correlação matemática entre os valores apresentados nas cartas militares e os dados pelos MDT ser satisfatória para ambas as bacias, com valores de R² entre 0,9944 (ASTER) e 0,9992 (AW3D30 e COPERNICUS), a análise das diferenças revelou ser mais conclusiva acerca das capacidades dos vários modelos para representar o terreno real. Nas figuras 14 e 15 apresentam-se as diferenças de cotas encontradas e linhas de tendência da variação em função da altitude.

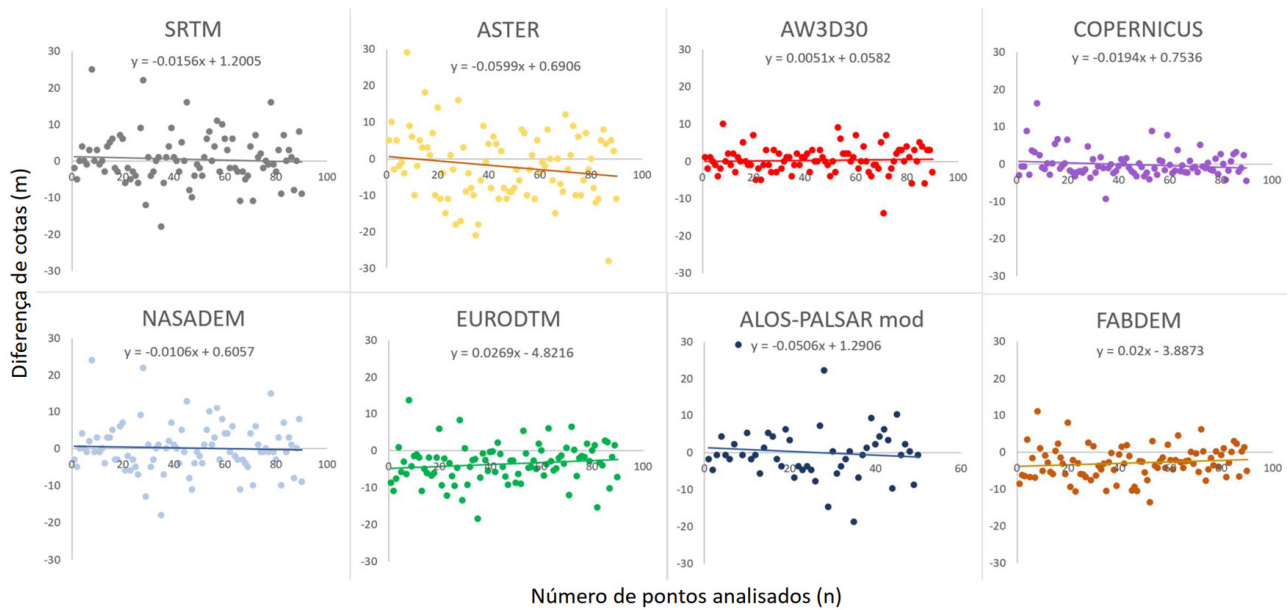


Figura 14. Análise das diferenças de cotas pontuais para a bacia do rio Leça.

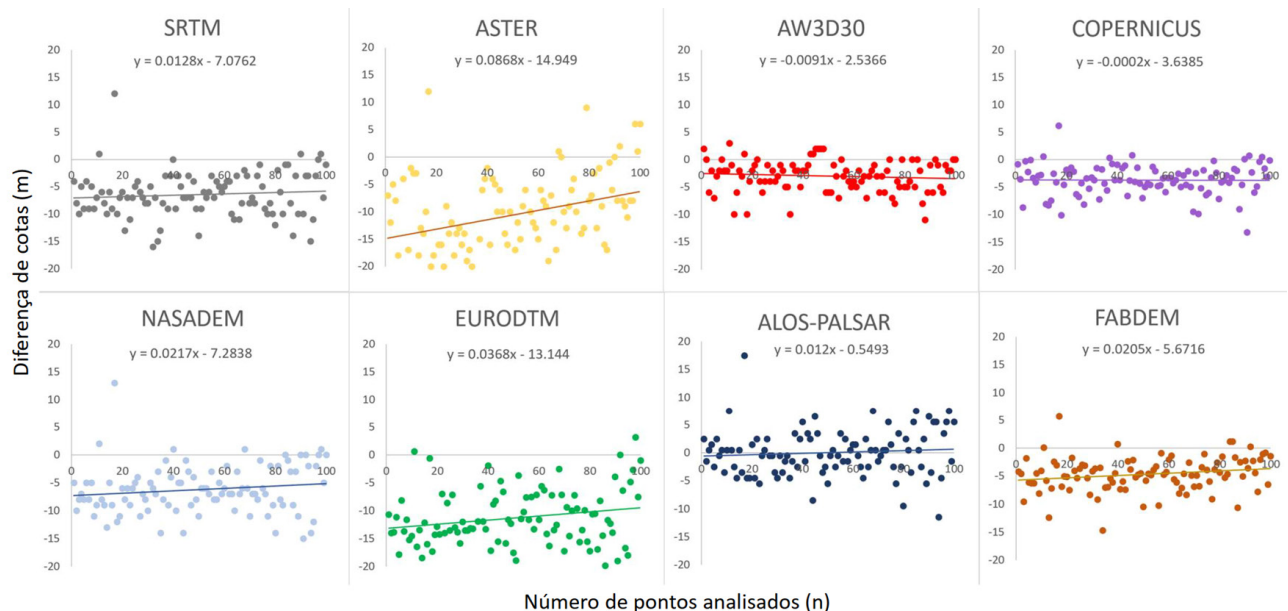


Figura 15. Análise das diferenças de cotas pontuais para a bacia do rio Arade.

Relativamente à bacia do rio Leça, podemos observar que a maioria dos modelos não apresenta variações em função da altitude, apresentando linhas de tendência horizontais. As exceções são o modelo ASTER, cujas diferenças vão sendo maiores à medida que aumenta a altitude, e o modelo EURODTM cujas diferenças são maiores para baixas altitudes.

Naturalmente que os modelos mais próximos da realidade serão aqueles cuja nuvem de pontos se aproxima mais da linha horizontal zero. Para a bacia hidrográfica do rio Leça serão os modelos AW3D30, COPERNICUS e FABDEM.

O erro quadrático médio (EQM) das diferenças por pontos nesta bacia variam entre os 3,56 m (COPÉRNICUS) e 9,08 m (ASTER). (Ver Tabela 1)

Na bacia hidrográfica localizada no Algarve notam-se mais diferenças em função da altitude. Na figura 15 pode observar-se que as linhas de tendência raramente são horizontais, sendo os modelos AW3D30, COPERNICUS e ALOS-PALSAR (modificado) aqueles que apresentam uma tendência mais estável com a altitude.

O erro quadrático médio (EQM) das diferenças por pontos na bacia do rio Arade variam entre os 2,82 m (COPÉRNICUS) e 22,15 m (EURODTM). (Ver Tabela 2).

3.2 Diferenças altimétricas lineares

Da comparação das altitudes das linhas de nível escolhidas para cada bacia hidrográfica, resultam as seguintes observações.

Na bacia do rio Leça constata-se que a diferença máxima de altitudes é de cerca de 5 metros (entre 145 e 155 m), com exceção dos modelos SRTM, NASA DEM e ASTER, que apresentam diferenças maiores. Já para a bacia do rio Arade as diferenças são maiores, da ordem dos 15 metros, resultando num gráfico bastante confuso (fig.11), de onde não se conseguem descortinar quais os modelos melhores ou piores.

Nas diferenças altimétricas lineares, o EQM varia entre 2,24 m (FABDEM) e 6.62 m (ASTER) para o rio Leça e entre 5,90 m (FABDEM) e 10,76 m (ASTER), para a bacia do Arade.

Observa-se mais claramente que, na bacia do rio Leça, os modelos AW3D30, COPERNICUS, EURODTM e FABDEM apresentam pouca dispersão em volta do valor 150 m, e têm uma linha de tendência quase horizontal, o que significa que não existem variações com a altitude. Os restantes modelos apresentam variações maiores e tendências de variação com a altitude. Notar que o modelo SRTM atinge diferenças superiores a 20 m. Relativamente à bacia do Rio Arade no Sul, as dispersões observadas são muito maiores e mesmo os modelos com melhores resultados no Norte apresentam agora diferenças superiores a 20 m.

As figuras 16 e 17 apresentam uma análise das diferenças encontradas ao longo das curvas de nível nas bacias do rio Leça e do Arade respetivamente.

3.3 Análise da precisão da simulação de inundação

Para cada troço escolhido de cada um dos rios foi feita uma simulação de cheia com os oito MDTs e analisada a área inundada, assim como as profundidades máximas de escoamento obtidas. Nas figuras 18 e 19 podem ver-se esses mapas e nas tabelas da secção 4 apresentam-se os valores e as diferenças.

4. DISCUSSÃO

Para uma análise mais precisa sobre as diferenças verificadas entre as altitudes dos modelos digitais e as cartas militares, elas foram analisadas segundo o erro quadrático médio (EQM) e o desvio padrão (DP). Nas simulações de inundação compararam-se as áreas inundadas e as profundidades máximas obtidas com cada um dos MDT com os mesmos parâmetros obtidos com o terreno tridimensional real, obtido por interpolação das linhas de nível. Nas tabelas 1 e 2 apresentam-se estes valores sintetizados.

A correlação linear entre as altitudes registadas nas cartas militares e as dadas nos mesmos pontos por cada um dos modelos MDT demonstrou ser positiva e quase perfeita, com um coeficiente de correlação entre 0,9958 e 0,9994 para a bacia do rio Leça, e entre 0,9944 e 0,9992 para a bacia do rio Arade. Neste aspeto o pior resultado é obtido para o modelo ASTER e os melhores resultados vão para os modelos AW3D30 e COPERNICUS em ambas as bacias.

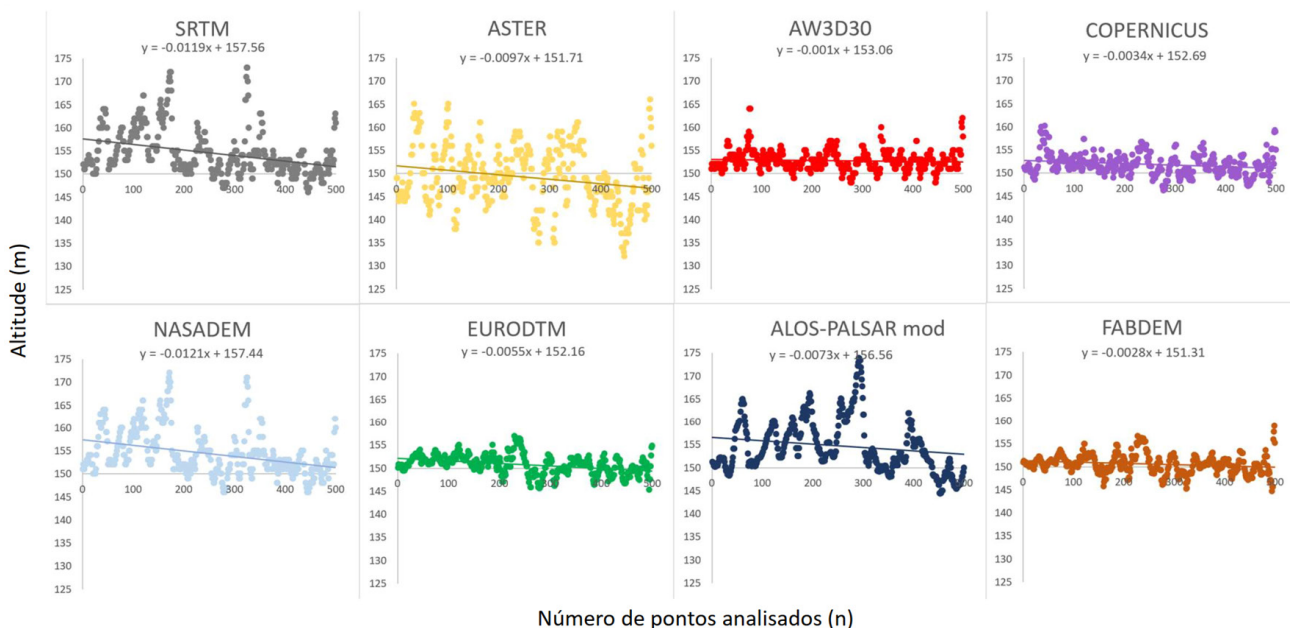


Figura 16. Análise das diferenças de cotas dos MDT com a curva de nível 150, na bacia do rio Leça.

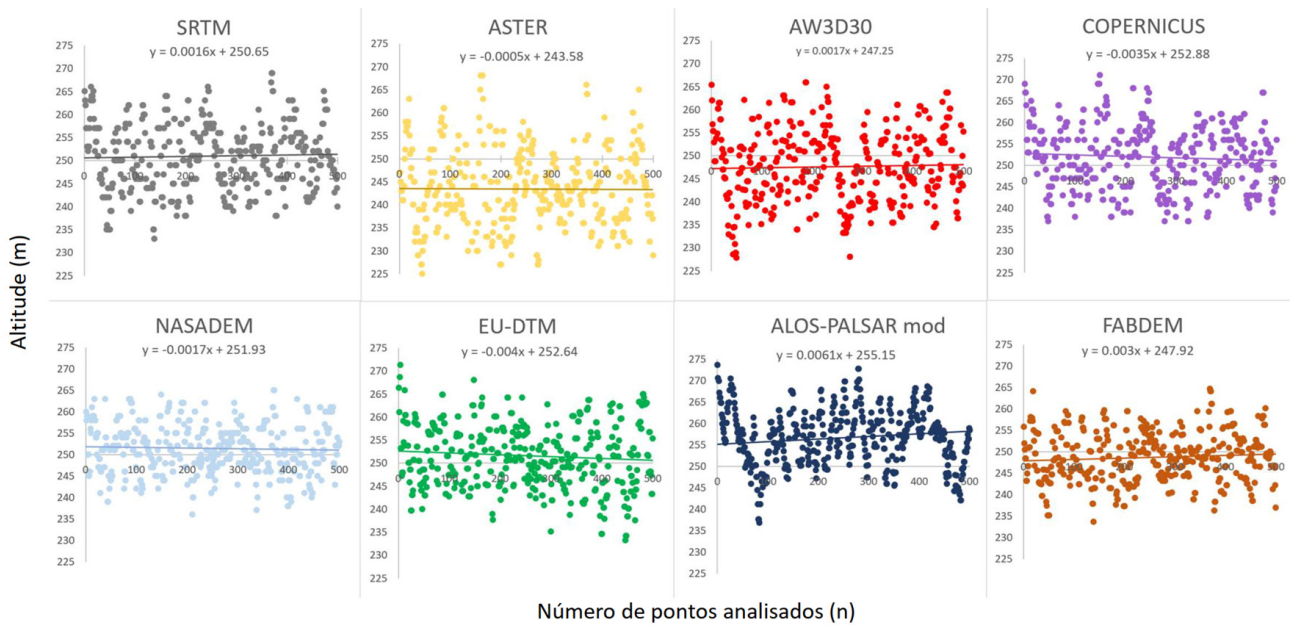


Figura 17. Análise das diferenças de cotas dos MDT com a curva de nível 250, na bacia do rio Arade.

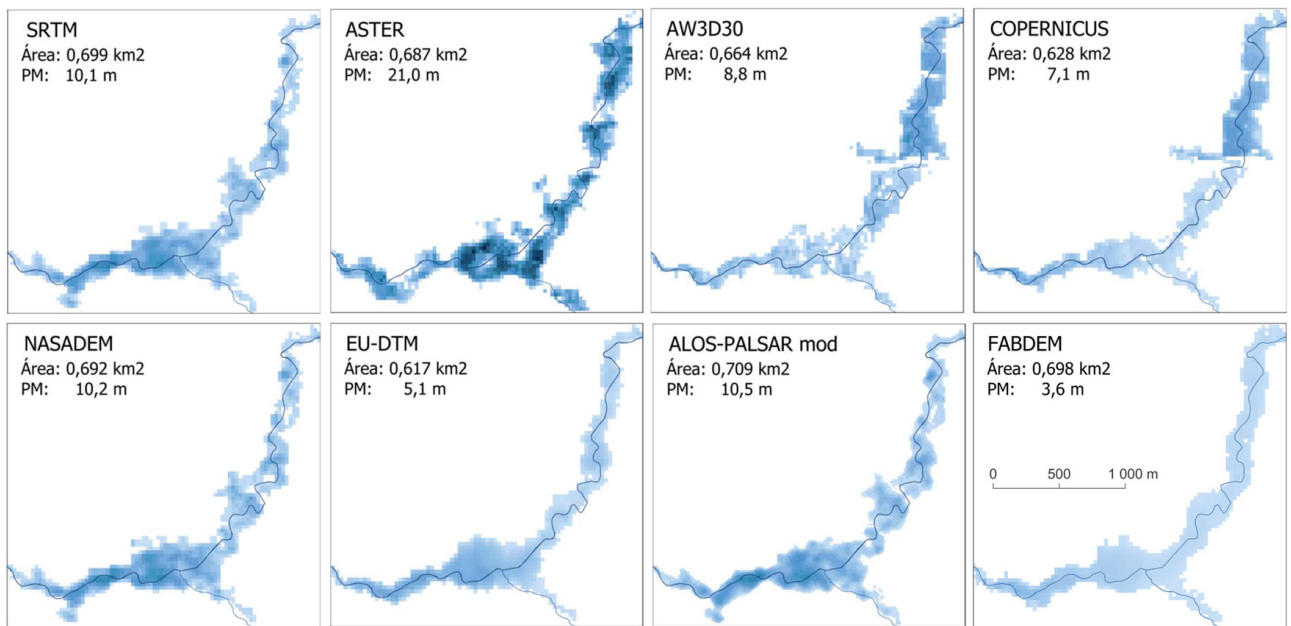


Figura 18. Comparação das áreas inundadas e profundidades máximas de inundação no trecho do rio Leça.

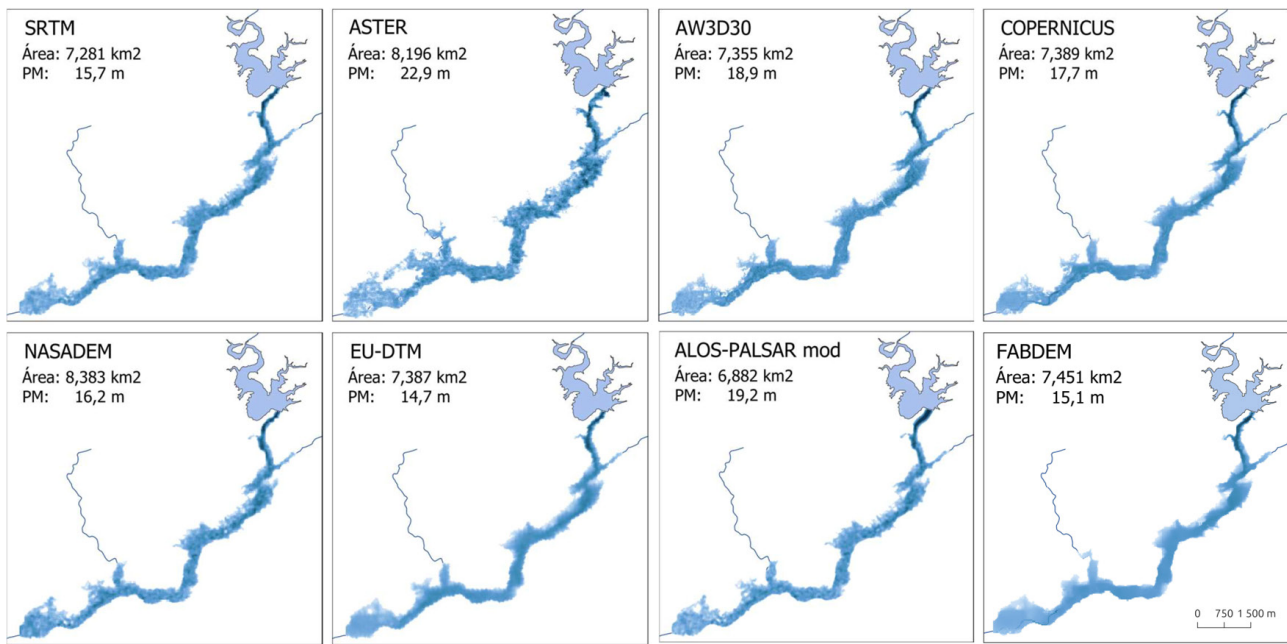


Figura 19. Comparação das áreas inundadas e profundidades máximas de inundação no troço do rio Arade.

Tabela 1. Comparação de resultados relativos à Bacia do rio Leça.

NORTE - Bacia do rio Leça												
MDT/MDE	R ²	EQM (m)		DP (m)		Área Inundada (Km ²)				Prof. Máx. Escoam. (m)		
		Pontos	Linha	Pontos	Linha	MDT	Real	Dif.	%	MDT	Real	Dif.
SRTM	0.9976	7.41	6.56	6.79	4.89	0.699	0.410	0.289	41%	10.0	3.4	6.6
ASTER	0.9958	9.08	6.62	9.23	6.60	0.687		0.277	40%	21.0		17.6
AW3D30	0.9994	3.48	3.56	3.53	4.82	0.664		0.254	38%	8.8		5.4
COPERNICUS	0.9994	3.53	3.09	3.47	2.29	0.628		0.218	35%	7.1		3.7
NASADEM	0.9977	6.06	6.39	6.66	2.39	0.692		0.282	41%	10.2		6.8
EURODTM	0.9988	4.82	2.39	5.11	2.17	0.617		0.207	34%	5.2		1.7
FABDEM	0.9991	4.20	2.24	4.28	2.16	0.698		0.288	41%	3.6		0.2
ALOS-PALSAR*	0.9971	7.55	6.12	7.72	6.12	0.709		0.299	42%	10.5		7.1

* - Depois de rebaixado 56.8 m

Tabela 2. Comparação de resultados relativos à Bacia do rio Arade.

Sul - Bacia do rio Arade												
MDT/MDE	R ²	EQM (m)		DP (m)		Área Inundada (Km ²)				Prof. Máx. Escoam. (m)		
		Pontos	Linha	Pontos	Linha	MDT	Real	Dif.	%	MDT	Real	Dif.
SRTM	0.9983	4.10	7.40	4.13	7.20	7.281	6.318	0.963	13%	15.7	15.9	0.2
ASTER	0.9944	7.39	10.76	7.49	8.37	8.196		1.878	23%	22.9		7.0
AW3D30	0.9992	2.86	6.11	2.91	5.91	7.355		1.037	14%	18.9		3.0
COPERNICUS	0.9992	2.82	7.01	2.84	6.83	7.389		1.071	14%	17.7		1.8
NASADEM	0.9982	4.25	7.30	4.30	7.02	8.383		2.065	25%	16.2		0.3
EURODTM	0.9976	22.15	8.12	5.06	7.86	7.387		1.069	14%	14.7		1.2
FABDEM	0.9991	2.99	5.90	3.02	5.86	7.451		1.133	15%	15.1		0.8
ALOS-PALSAR*	0.9983	4.19	10.42	4.16	6.72	6.882		0.564	8%	19.2		3.3

* - Depois de rebaixado 47.6 m

Relativamente ao EQM das diferenças pontuais de altitude, verifica-se que os melhores resultados são os dos modelos AW3D30 e COPERNICUS, com um EQM de 3,48 e 2,82 m, para as bacias do rio Leça e do Arade, respetivamente. Já para a comparação linear, o modelo que melhor resultado obteve foi o FABDEM com 2,24 e 5,90 m, respetivamente para a bacia do Norte e do Sul.

O desvio padrão das diferenças de altitude confirmou estes modelos como os mais aproximados à realidade com o COPERNICUS a ser melhor na análise por pontos (3,47 e 2,84 m no Leça e no Arade) e o FABDEM na análise linear com 2,16 e 5,86 m, respetivamente para a bacia do rio Leça e do rio Arade.

A análise das áreas inundadas demonstra uma disparidade de precisão dos resultados entre a bacia do Rio Leça e a do Arade. Enquanto na primeira as diferenças de área inundada estão entre os 35 e os 42%, na segunda estão entre os 8 e os 25%. Esta diferença de precisão, entre as duas zonas, talvez resida no modelo tridimensional elaborado com base nas curvas de nível das cartas militares. De facto, como se pode ver nas figuras 8 e 9, apesar das curvas de nível terem o mesmo espaçamento vertical (10 m) a área na zona escolhida do rio Leça é menor (2,5x2,5 km²) e as margens tem menores declives logo, apresenta poucas curvas de nível e muito espaçadas em planta. A zona escolhida do rio Arade tem uma área maior (7x7 km²) e as margens do rio são mais inclinadas, pelo que as curvas de nível são em maior número na carta militar. Este facto faz com que o modelo tridimensional do terreno, elaborado por interpolação das curvas de nível, e que se assumiu para efeito deste estudo como correspondendo ao modelo real, seja mais credível na zona do rio Arade do que no rio Leça.

Assim, dado que o MDT "real" se baseou nas curvas de nível, que são escassas, e não em cartas topográficas ou MDT reais, a análise da área inundada não apresenta o mesmo rigor matemático que a análise altimétrica por comparação de cotas cartografadas. No entanto, os resultados de profundidade máxima podem ser considerados corretos e permitem tirar algumas conclusões. Assim, verifica-se que na zona estudada do rio Leça os modelos mais precisos são os EURODTM e FABDEM, com diferenças de 1,7 e 0,2 m, e na zona do rio Arade os MDT FABDEM e NASADEM são os que apresentam menor diferença, com -0,80 e 0,30 m, respetivamente.

5. CONCLUSÕES

Os métodos usados para o estudo hidrológico e hidráulico de linhas de água naturais, tradicionalmente feitos com base nas curvas de nível das cartas militares, têm vindo a ser modificados com a introdução no mercado de novas tecnologias espaciais. A disponibilidade de livre acesso de modelos digitais da superfície terrestre, que aconteceu em 2015 com o lançamento do modelo SRTM, veio revolucionar a forma como se fazem este, e outros tipos de estudos ambientais.

Este estudo demonstrou que o modelo pioneiro SRTM, foi ultrapassado em precisão e rigor geográfico pelos posteriores modelos ALOS WORLD e COPERNICUS e seus subprodutos. O modelo FABDEM, subproduto do COPERNICUS, e o ALOS WORLD (AW3D30) parecem ser os que mais se aproximam no terreno natural em Portugal continental, devendo por essa razão ser usados nos estudos de escoamento superficial, em detrimento do modelo SRTM, mais antigo e por isso mais conhecido

Ficou também demonstrado que quanto maior a área estudada por estes métodos, maior será o grau de precisão alcançado por estes modelos digitais. O facto destes produtos terem unidades de área de 30x30 m, impede a sua aplicação em área reduzidas, que devem ser estudadas recorrendo às tradicionais plantas topográficas ou a modelos digitais mais precisos, obtidos por meios aéreos.

Comparando a aplicabilidades dos MDT analisados ao Norte e a Sul do território português, verifica-se que os modelo COPERNICUS e o seu subproduto FABDEM, são igualmente eficazes, apresentando o primeiro, melhores resultados na análise por pontos e o segundo na análise linear. No entanto, dado que o COPERNICUS contem a informação sobre construções e florestas pode ser necessário modificá-lo localmente (junto a uma ponte, p.ex.) para evitar que impeça o escoamento natural. O modelo FABDEM, tendo sido produzido de modo a eliminar edifícios e florestas, terá resultados mais fiáveis, e não necessita de técnicos tão habilidosos na manipulação e alteração dos modelos tridimensionais.

REFERÊNCIAS

- Crippen, R., S. Buckley, P. Agram, E. Belz, E. Gurrola, S. Hensley, M. Kobrick, M. Lavalley, *et al.* (2016). NASADEM global elevation model: Methods and progress. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI–B4: 125–128.
- Hawker, L., P. Bates, J. Neal, and J. Rougier. (2018). Perspectives on Digital Elevation Model (DEM) simulation for flood modeling in the absence of a high-accuracy open access global DEM. *Frontiers in Earth Science* 6: Article 233.
- Hengl, Tomislav, Leal Parente, Leandro, Krizan, Josip, and Bonannella, Carmelo. (2020). “Continental Europe Digital Terrain Model at 30 M Resolution Based on GEDI, Icesat-2, AW3D, GLO-30, EUEM, MERIT DEM and Background Layers.” Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4724549>.
- Reuter, H.I., A. Nelson, and A. Jarvis. (2007). An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. *International Journal of Geographical Information Science* 21(9): 983–1008.
- Rodriguez, E., C.S. Morris, and J.E. Belz. (2006). A global assessment of SRTM performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72(3): 249–260.
- Sampson, C., A. Smith, P. Bates, J. Neal, and M. Trigg. (2016). Perspectives on open access high resolution Digital Elevation Models to produce global flood hazard layers. *Frontiers in Earth Science* 3: Article 85.
- Tachikawa, T., M. Hato, M. Kaku, and A. Iwasaki. (2011). Characteristics of ASTER GDEM version 2. In *Proceedings of the 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 24–29 July, Vancouver, BC, Canada, 3657–3660.
- Tadono, T., H. Ishida, F. Oda, S. Naito, K. Minakawa, and H. Iwamoto. (2014). Precise global DEM generation by ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* II–4: 71–76.
- Takaku, J., T. Tadono, K. Tsutsui, and M. Ichikawa. (2016). Validation of “AW3D” global DSM generated from ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* III–4: 25–31.
- Talchabhadel, R., H. Nakagawa, K. Kawaike, K. Yamanoi, and B.R.Thapa. (2021). Assessment of vertical accuracy of open source 30m resolution space-borne digital elevation models. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 12(1): 939–960.