



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Elisabete dos Santos Veiga Monteiro

**INTEGRAÇÃO DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA
VOLUNTÁRIA EM MODELOS DIGITAIS DE
ELEVAÇÃO GLOBAIS NA REPRESENTAÇÃO DE
LINHAS DE ÁGUA**

Tese no âmbito do Doutoramento em Engenharia Civil, especialidade de Hidráulica Recursos Hídricos e Ambiente, orientada pela Professora Doutora Cidália Costa Fonte e pelo Professor Doutor João Luís Mendes Pedroso de Lima e apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2019

Departamento de Engenharia Civil

INTEGRAÇÃO DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA VOLUNTÁRIA EM MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO GLOBAIS NA REPRESENTAÇÃO DE LINHAS DE ÁGUA

Elisabete dos Santos Veiga Monteiro

Tese no âmbito do Doutoramento em Engenharia Civil, especialidade de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente orientada pela Professora Doutora Cidália Costa Fonte e pelo Professor Doutor João Luís Mendes Pedroso de Lima e apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2019



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



AGRADECIMENTOS

No *terminus* desta etapa quero expressar o meu agradecimento à minha orientadora, Professora Cidália Costa Fonte pela partilha do seu saber, conhecimento, experiência, intuição científica, mas também pelos aconselhamentos e apoio na escolha das melhores opções. Ao Professor João Luís Mendes Pedroso de Lima, meu orientador, agradeço o seu contributo em termos de experiência, nomeadamente ao nível da investigação, pelo seu conhecimento e aconselhamento em momentos chave. À equipa de orientadores agradeço, pois, mostraram uma complementaridade de saberes científicos que permitiram alcançar os objetivos traçados.

Ao INESC Coimbra, Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra agradeço todo o apoio prestado ao longo de todo o percurso, nomeadamente no apoio à publicação de artigos científicos e ida a conferências, o meu bem-haja.

Um justo agradecimento ao Departamento de Matemática (DM) e Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC), pela disponibilidade que sempre demonstraram no apoio da resolução de determinados assuntos, nomeadamente o Departamento de Matemática que disponibilizou um local próprio para desenvolvimento dos trabalhos.

Ao Instituto Politécnico da Guarda (IPG), em particular à Escola Superior de Tecnologia e Gestão, na qual leciono desde que conclui a minha licenciatura em Engenharia Geográfica agradeço toda a colaboração e apoio prestado no âmbito do processo.

Aos meus colegas do IPG, nomeadamente os da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTG), em particular aos da área disciplinar de Ciências Geográficas do IPG, os quais acompanharam de perto todo o percurso no desenvolvimento dos trabalhos, a eles agradeço o apoio e atenção manifestada. Realço aqui os meus colegas e amigos Glória Patrício, Elisabete Soares e António Monteiro.

Quero agradecer carinhosamente à minha família, pais, irmãos e sobrinhos, agradeço todo apoio que sempre demonstraram e também a forma como sem se aperceberem, me fizeram acreditar que apesar das adversidades era possível vencer mais esta “batalha”. O último mas o não menos importante, ao meu querido pai, agradeço profundamente, com uma saudade infinita, sei que onde quer que ele esteja, acredito veementemente que ele esteve bem presente e me apoiou incondicionalmente e arduamente na conclusão da tese. Obrigada Pai...

Dedico aos meus Pais...

*Integração de Informação Geográfica Voluntária em Modelos Digitais de Elevação Globais na
representação de linhas de água*

RESUMO

Integração de Informação Geográfica Voluntária em Modelos Digitais de Elevação Globais na representação de linhas de água

Os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) permitem a extração de parâmetros topográficos que servem a modelação hidrológica. A definição altimétrica da bacia hidrográfica permite traçar o seu limite, extrair a rede hidrográfica e outros parâmetros, nomeadamente, o número de ordem, o comprimento do curso de água, o comprimento total da rede hidrométrica e o declive. A exatidão de todos estes parâmetros está dependente da exatidão do MDE.

A presente tese apresenta uma metodologia que permite melhorar a exatidão dos Modelos Digitais de Elevação Globais (MDEGs) Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) e Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), bem como a exatidão dos parâmetros topográficos deles extraídos, recorrendo a dados do projeto colaborativo OpenStreetMap (OSM) (linhas de água). São criados novos MDEs a partir dos pontos cotados extraídos dos MDEs originais que são interpolados com as linhas de água disponíveis no OSM. As redes hidrográficas foram extraídas a partir dos MDEs originais e dos MDEs reconstruídos. Foi avaliada a exatidão dos novos MDEs e dos parâmetros topográficos derivados, nomeadamente, as redes hidrográficas. Foram utilizados dados de referência para efetuar a comparação entre estes e os dados em análise. A metodologia foi aplicada de forma faseada em três estudos de caso.

O estudo de caso 1 foi aplicado a uma zona inserida na bacia hidrográfica do rio Mondego, região de Gouveia, Guarda, Portugal. O estudo teve por objetivo verificar se as linhas de água do OSM tinham uma exatidão posicional superior à exatidão posicional das linhas de água extraídas dos MDEGs ASTER e SRTM com 30 m e 90 m de resolução espacial, respetivamente. Como dados de referência foi utilizada a rede hidrográfica da série cartográfica M888 do Centro de Informação Geoespacial do Exército (CIGeoE) à escala 1/25 000. Os resultados mostraram que as linhas de água extraídas do OSM possuem maior exatidão posicional que as linhas de água extraídas dos MDEGs SRTM e ASTER, sendo que, as linhas de água extraídas do SRTM possuem maior exatidão posicional que

Integração de Informação Geográfica Voluntária em Modelos Digitais de Elevação Globais na representação de linhas de água

as linhas extraídas do ASTER, apesar de este último modelo ter maior resolução espacial (30 m).

O estudo de caso 2 teve por objetivo desenvolver uma metodologia que permitisse construir novos MDEs criados a partir de altimetria derivada dos MDEs originais ASTER e SRTM e de linhas de água do OSM, de modo a que fosse possível extrair linhas de água dos novos MDEs com maior exatidão posicional em relação à exatidão das linhas de água extraídas dos MDEs originais. O estudo foi aplicado a duas bacias localizadas no Reino Unido e como dados de referência foi utilizada a rede hidrográfica do Ordnance Survey para as duas áreas de estudo. Foi analisada a exatidão posicional das redes extraídas dos MDEs originais e as redes extraídas dos MDEs reconstruídos, calculando-se a média e desvio padrão das distâncias horizontais entre a rede de referência a cada uma das redes em análise, dentro de uma região situada no interior de um *buffer* definido em torno da rede de referência. Os resultados mostraram para as duas áreas de estudo e para os dois MDEs ASTER e SRTM (com 90 metros de resolução espacial), uma diminuição nos valores da média e do desvio padrão das distâncias. Este estudo de caso mostrou que a integração dos dados OSM (linhas de água) com os dados altimétricos dos MDEs (pontos cotados) permitiram criar novos MDEs a partir dos quais é possível extrair redes hidrográficas com maior exatidão posicional em relação à exatidão posicional das redes extraídas dos MDEs originais. De seguida, foi feita a análise para verificar se a aplicação da metodologia desenvolvida permitiria melhorar a altimetria das redes hidrográficas (estudo de caso 3).

O estudo de caso 3 engloba as metodologias aplicadas nos dois casos anteriores (1 e 2) e, para além disso, teve por objetivo verificar se as redes hidrográficas extraídas dos MDEs reconstruídos segundo a metodologia desenvolvida, possuíam também maior exatidão vertical em relação às redes extraídas do MDE original. Neste estudo de caso, o MDE utilizado foi o SRTM de 30 metros de resolução espacial e a metodologia foi aplicada a uma região do Reino Unido e mostrou que as redes hidrográficas obtidas com o novo MDE possuem maior exatidão horizontal e vertical e que os novos modelos são mais exatos, permitindo também a extração de alguns parâmetros topográficos com maior exatidão.

A metodologia proposta nesta tese utiliza apenas dados de acesso livre disponíveis para qualquer região do mundo. Importa referir a aplicabilidade da metodologia a regiões do

mundo que não dispõem de dados hidrológicos (e.g. redes hidrográficas) de grande exatidão. A metodologia também poderá ser aplicada em estudos cuja área ocupe mais do que um país, pois, caso se utilizasse cartografia oficial, as diferentes especificações técnicas tornariam o processo mais complexo na medida em que seria necessário uniformizar a cartografia proveniente dos dois países. Por conseguinte, o uso deste tipo de informação geográfica global traduz-se numa agilização do desenvolvimento dos estudos e de aplicações hidrológicas. Algumas limitações a apontar são o facto de existirem regiões do mundo onde a cobertura OSM é insuficiente; no entanto, a literatura também refere que a primeira informação a ser registada pelos voluntários são os rios. Deve-se acrescentar também que, de dia para dia, aumenta o volume de informação disponível no OSM, o que eliminará o problema da falta de dados e poderá assim permitir obter parâmetros topográficos para a Hidrologia em qualquer parte do planeta.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos Digitais de Elevação Globais, Informação Geográfica Voluntária, OpenStreetMap, Exatidão, Redes Hidrográficas.

ABSTRACT

Integration of Volunteered Geographic Information in Global Digital Elevation Models in the representation of water lines

The Digital Elevation Models (DEMs) allow the extraction of topographic parameters used in hydrological modelling. The altimetric definition of the river basin allows to delineate its boundary, the extraction of the drainage network as well as other topographic parameters such as the network ramification, the watercourse length, the total length of the network and the slope. The accuracy of all these parameters is dependent on the accuracy of the DEM.

The present thesis presents a methodology that allows to improve the accuracy of the Global Digital Elevation Models (GDEMs), as well as the accuracy of the topographic parameters extracted from them, using data from the OpenStreetMap (OSM) collaborative project, namely the water lines. New DEMs are created from the elevation points extracted from the original GDEMs Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) and Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) that are interpolated with the water lines available in OSM. The drainage networks were extracted from the original and the rebuilt DEMs. The accuracy of the new DEMs and derived topographic parameters, namely the drainage networks, was evaluated. Reference data were used to compare them with the data under analysis. The methodology was applied in a phased way to three case studies.

Case study 1 was applied to an area within the basin of the Mondego river, Gouveia region, Guarda, Portugal. The study aimed to verify if the OSM water lines had a higher positional accuracy than the positional accuracy of the water lines extracted from the ASTER and SRTM (with 90 m spatial resolution) global DEMs. The drainage network of the cartographic series M888 at 1/25,000 scale of the Army Geospatial Information Center was used as reference data. The results showed that the water lines extracted from OSM have a greater positional accuracy than the accuracy of the water lines extracted from the SRTM and ASTER global DEMs, and the lines extracted from the SRTM have greater

Integração de Informação Geográfica Voluntária em Modelos Digitais de Elevação Globais na representação de linhas de água

positional accuracy than the lines derived from ASTER, even though this last DEM has a higher spatial resolution (30 m)

Case study 2 aimed to develop a methodology that would allow the construction of new DEMs generated from altimetry derived from the original ASTER and SRTM DEMs and OSM water lines so that the water lines derived from the new DEMs would have a higher positional accuracy than the accuracy of the water lines derived from the original DEMs. The study was applied to two basins located in the UK and as reference data the Ordnance Survey hydrographic network was used for the both study areas. The positional accuracy of the networks extracted from the original DEMs and the networks extracted from the reconstructed DEMs was computed, by calculating the mean and standard deviation of the horizontal distances between the reference drainage network and each drainage network under analysis, within a region located inside a buffer defined around the reference network. The obtained results for both study areas and for the two DEMs (ASTER and SRTM with 90 m of spatial resolution) show a decrease in the mean and standard deviation of those distances. This case study showed that the integration of the OSM data (water lines) with the altimetric data of the DEMs (elevation points) allowed to create new DEMs from which it is possible to extract drainage networks with greater positional accuracy in relation to the accuracy of the networks extracted from the original DEMs. Then, the analysis was made to verify if the application of the developed methodology would allow to improve the altimetry of the drainage networks (case study 3).

Case study 3 includes the methodologies applied in the previous cases (1 and 2). In addition, the objective was to verify if the drainage networks extracted from the rebuilt DEMs according to the developed methodology also had greater vertical accuracy in relation to the drainage networks extracted from the original DEMs. In this case study the SRTM DEM with a spatial resolution of 30 m was used and the methodology was applied to a region of the United Kingdom. The results showed that the drainage networks obtained from the new DEMs have greater horizontal and vertical accuracy and also that the new models are more accurate, allowing also the extraction of some topographic parameters with greater accuracy.

The methodology proposed in this thesis uses only open data and may be applied to any region of the world. It is important to mention the applicability of the methodology to

regions of the world that do not have hydrological data (e.g. drainage networks) with great accuracy. The methodology may also be applied in studies that occupy areas in more than one country, because if official cartography is used the different technical specifications may make the process more complex, as it would be necessary to standardize the cartography from the involved countries. Therefore, the use of this type of global geographic information allows to facilitate the development of studies and applications. Some limitations are the fact that there are regions of the world where the OSM coverage is insufficient. However, the literature also states that usually the first information to be added by volunteers in OSM are the rivers. Moreover, every day the volume of available data in OSM increases, which will solve the problem of lack of data and may therefore enable to obtain more accurate topographical parameters for hydrology in any part of the world.

KEYWORDS: *Global Digital Elevation Models, Volunteered Geographic Information, OpenStreetMap, Accuracy, Drainage Networks.*

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO.....	v
ABSTRACT	viii
ÍNDICE GERAL	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xxii
Capítulo I - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação e âmbito do estudo.....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Organização da tese	4
1.4 Publicações e participação em conferências.....	6
Capítulo II - MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO APLICADOS À HIDROLOGIA ...	10
2.1 Introdução.....	10
2.2 Modelos hidrológicos	11
2.2.1 Enquadramento	11
2.2.2 Classificação dos modelos	13
2.2.3 Bacias hidrográficas.....	15
2.3 Modelação digital do terreno	17
2.3.1 Técnicas de aquisição de dados	20
2.3.2 Estrutura de dados.....	30
2.3.3 Métodos de interpolação	32
2.3.4 Modelos Digitais de Elevação Globais	37
2.3.5 Avaliação da qualidade da Informação Geográfica	40
2.3.5.1 Avaliação da exatidão posicional	42
2.3.6 Exatidão dos MDEs	44

*Integração de Informação Geográfica Voluntária em Modelos Digitais de Elevação Globais na
representação de linhas de água*

2.3.6.1 Fatores que influenciam a exatidão	44
2.3.6.2 Avaliação da qualidade do MDE.....	47
2.3.6.3 Variabilidade espacial do erro	50
2.4 Extração de parâmetros topográficos a partir de MDEs	51
2.4.1 Bacia hidrográfica.....	52
2.4.2 Declive	53
2.4.3 Rede hidrográfica.....	57
2.4.4 Hierarquização fluvial.....	60
Capítulo III - INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA VOLUNTÁRIA	62
3.1 Introdução.....	62
3.2 OpenStreetMap.....	65
3.2.1 O Projeto OSM	65
3.2.2 Os dados OSM.....	66
3.2.3 Qualidade dos dados OSM.....	67
Capítulo IV - METODOLOGIA PARA MELHORAR A EXATIDÃO DE MDEGs E DE PARÂMETROS DERIVADOS.....	73
4.1 Introdução.....	73
4.2 Reconstrução do MDE.....	75
4.2.1 Preparação dos dados OSM	75
4.2.2 Criação dos novos MDEs.....	80
4.2.3 Extração das redes hidrográficas a partir dos MDEs	81
4.3 Cálculo do declive e geração da bacia hidrográfica	82
4.4 Avaliação da exatidão do MDE e do declive.....	83
4.5 Avaliação da exatidão das redes hidrográficas	84
4.6 Avaliação da exatidão da bacia hidrográfica	87
4.7 Avaliação da exatidão do perímetro da bacia	87
4.8 Número de ordem, número de segmentos e comprimento total da rede hidrográfica	88

Capítulo V - ESTUDOS DE CASO	90
5.1 Avaliação da exatidão posicional das redes hidrográficas extraídas dos MDEs	90
5.1.1 Apresentação, área de estudo e dados	90
5.1.2 Completude das linhas de água OSM	91
5.1.3 Exatidão posicional das linhas de água.....	92
5.1.4 Resultados e discussão	94
5.2 Melhoria da exatidão posicional de redes hidrográficas extraídas de MDEs reconstruídos usando dados do OSM.....	95
5.2.1 Apresentação, área de estudo e dados	95
5.2.2 Resultados e discussão	97
5.3 Utilização de dados OSM para aumentar a exatidão do MDE derivado do SRTM 30 e dos parâmetros derivados	104
5.3.1 Dados altimétricos - MDEs.....	105
5.3.2 Dados planimétricos – redes hidrográficas	106
5.3.3 Resultados e discussão	109
5.3.3.1 Exatidão dos MDEs	109
5.3.3.2 Exatidão do declive	110
5.3.3.3 Exatidão das redes hidrográficas	113
5.3.3.4 Análise dos rios	120
5.3.3.5 Exatidão das bacias hidrográficas.....	123
Capítulo VI - CONCLUSÕES	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131
ANEXO PUBLICAÇÕES	153
A1: Analysing the potential of OpenStreetMap data to improve the accuracy of SRTM 30 DEM on derived basin delineation, slope, and drainage networks.....	115
A2: Improving the positional accuracy of drainage networks extracted from Global Digital Elevation Models using OpenStreetMap data.....	142

A3: Assessing positional accuracy of drainage networks extracted from ASTER, SRTM and OpenStreetMap	152
A4: Parâmetros topográficos derivados do relevo e utilizados na caracterização de bacias hidrográficas.....	157
A5: Exatidão posicional de redes hidrográficas extraídas de MDEs gerados partir de MDE globais e de dados extraídos do OpenStreetMap	164
A6: Utilização de Informação Geográfica Voluntária para aumentar a exatidão de redes hidrográficas extraídas de Modelos Digitais de Elevação	172
A7: Influência da geomorfologia no transporte e deposição de materiais litiníferos em bacias hidrográficas – Estudo de caso de uma mina localizada na região da Guarda.....	173
A8: Variability of topographic parameters obtained from the ASTER and SRTM Digital Elevation Models	174

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: ALGUNS CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS. (FONTE: ADAPTADO DE MOREIRA, 2005).....	13
FIGURA 2: ESQUEMA REPRESENTATIVO DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA COMO SISTEMA HIDROLÓGICO USADO EM MODELOS DE PRECIPITAÇÃO-ESCOAMENTO. (FONTE: ADAPTADO DE CHOW ET AL. 1988).	15
FIGURA 3: MDE SRTM (90 M DE RESOLUÇÃO) REFERENTE A UMA ZONA QUE INCLUI UMA REGIÃO DE PORTUGAL.	19
FIGURA 4: MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE OBTIDO A PARTIR DE DADOS LIDAR. (FONTE: ESRI).	19
FIGURA 5: SOBREPOSIÇÃO LONGITUDINAL E SOBREPOSIÇÃO TRANSVERSAL ESQUEMATIZADA SOBRE LINHAS DE VOO.	23
FIGURA 6: PRINCÍPIO BASE DA MEDIÇÃO INSAR. (FONTE: ADAPTADO DE WANG E TIAN, 2018).....	26
FIGURA 7: INTERFEROGRAMAS DA MESMA REGIÃO: A) COM LINHA DE BASE DE 45 M E B) COM LINHA DE BASE DE 162 M. (FONTE: NIEVINSKY, 2004).	27
FIGURA 8: EXEMPLO DE UMA TIN GERADA A PARTIR DE UMA AMOSTRA IRREGULAR DE PONTOS COTADOS EXTRAÍDOS DE UM MDE (ASTER 30 M).	31
FIGURA 9: MDE DO TIPO GRELHA OU MATRICIAL.....	32
FIGURA 10: SEMIVARIOGRAMA.....	35
FIGURA 11: MAPA DE ERRO DAS DIFERENÇAS ALTIMÉTRICAS ENTRE DOIS MDES, UM DE REFERÊNCIA E OUTRO EM ANÁLISE.	50
FIGURA 12: ESQUEMA EXEMPLIFICANDO A NUMERAÇÃO DAS ELEVAÇÕES NUMA JANELA 3×3. (FONTE: ADAPTADO GONÇALVES E SANTOS, 2002).....	55
FIGURA 13: MAPA DE DECLIVE GERADO A PARTIR DE UM MDE (ASTER) NUMA ZONA INSERIDA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MONDEGO (PORTUGAL).	56
FIGURA 14: ESQUEMA DO ALGORITMO D8. (FONTE: ADAPTADO DE JENSON E DOMINGUE, 1988).....	57
FIGURA 15: ESQUEMA REPRESENTATIVO DA DIREÇÃO DO ESCOAMENTO (B) E DO CÓDIGO ASSOCIADO À DIREÇÃO (C) DO MDE INDICADO EM (A) ONDE ESTÃO PRESENTES OS VALORES DE ALTITUDE. (FONTE: RUICHAO ET AL., 2010).....	58

FIGURA 16: ESQUEMA REPRESENTATIVO DA GERAÇÃO DA MATRIZ DE ACUMULAÇÃO DE ESCOAMENTO. (FONTE: RUICHAO ET AL., 2010).	59
FIGURA 17: A) MDE ASTER DA BACIA HIDROGRÁFICA E B) A REDE HIDROGRÁFICA EXTRAÍDA.	60
FIGURA 18: REDE HIDROGRÁFICA EXTRAÍDA DE UM MDE (À ESQUERDA) E DETALHE DA REDE AO NÍVEL DO <i>PIXEL</i> (À DIREITA).	60
FIGURA 19: EXEMPLO DE UMA REDE HIDROGRÁFICA CLASSIFICADA, UTILIZANDO O MÉTODO DE STRAHLER (STRAHLER, 1952).	61
FIGURA 20: EXEMPLO DA <i>KEY</i> E <i>VALUE</i> DA ENTIDADE <i>WATERWAY</i> DO OSM. (FONTE: HTTPS://WIKI.OPENSTREETMAP.ORG/WIKI/MAP_FEATURES#NATURAL_WATERCOURSES).....	67
FIGURA 21: COBERTURA DE DADOS OSM EM DUAS ZONAS URBANAS DE DUAS CIDADES EUROPEIAS: A CIDADE DA GUARDA, EM PORTUGAL A) E NA CIDADE DE LONDRES, NA INGLATERRA B).	70
FIGURA 22: EXEMPLOS DE REGIÕES DO MUNDO DE BAIXA COBERTURA DE INFORMAÇÃO OSM: A) BRASIL (AMÉRICA); B) ANGOLA (AFRICA).	71
FIGURA 23: FLUXOGRAMA GERAL DOS PROCESSOS PARA OBTENÇÃO DOS MDES RECONSTRUÍDOS, PARA ANÁLISE DA EXATIDÃO DO MDE ORIGINAL E DOS MDES RECONSTRUÍDOS, BEM COMO DA EXATIDÃO DAS REDES HIDROGRÁFICAS, DO DECLIVE, DA DELIMITAÇÃO DAS BACIAS EXTRAÍDAS DOS MDES ORIGINAIS E DOS MDES MODIFICADOS.	74
FIGURA 24: A) E C) LINHAS DE ÁGUA DO OSM QUE FORAM REMOVIDAS (ASSINALADAS COM SETAS DE COR BRANCA); B) E D) IMAGEM DE SATÉLITE JÁ SEM AS LINHAS DO OSM.	76
FIGURA 25: A) E C) LINHAS DE ÁGUA DO OSM QUE FORAM REMOVIDAS DA REDE HIDROGRÁFICA USADA PARA CRIAR O NOVO MDE; B) E D) IMAGEM DE SATÉLITE DAS ZONAS REFERENTES À LOCALIZAÇÃO DESSAS LINHAS DO OSM.	77
FIGURA 26: A) EXEMPLO DE UMA LINHA DE ÁGUA DO OSM COM ORIENTAÇÃO INVERTIDA, ENVOLVIDA NO RETÂNGULO A TRAÇO INTERROMPIDO E B) LINHA DE ÁGUA DO OSM JÁ COM A ORIENTAÇÃO CORRETA E COMO FUNDO O DECLIVE GERADO A PARTIR DO MDE RECONSTRUÍDO UTILIZANDO A REDE OSM RETIFICADA.	78
FIGURA 27: FLUXOGRAMA QUE INCLUI OS PROCESSOS DE PROCESSAMENTO DA REDE DO OSM A SER UTILIZADA NA CRIAÇÃO DO NOVO MDE.	79

FIGURA 28: FLUXOGRAMA QUE INCLUI OS PROCESSOS DE CRIAÇÃO DOS NOVOS MDES.	80
FIGURA 29: FLUXOGRAMA QUE INCLUI OS PROCESSOS PARA EXTRAÇÃO DAS REDES HIDROGRÁFICAS A PARTIR DOS MDES.	81
FIGURA 30: FLUXOGRAMA QUE INCLUI OS PROCESSOS PARA GERAÇÃO DE BACIAS DOS <i>POUR POINTS</i> E DAS RESPECTIVAS ÁREAS CONTRIBUTIVAS.	82
FIGURA 31: CÁLCULO DA DISTÂNCIA DE UM PONTO DA REDE HIDROGRÁFICA EXTRAÍDA DE UM MDE À REDE HIDROGRÁFICA DE REFERÊNCIA.	84
FIGURA 32: FLUXOGRAMA QUE INCLUI OS PROCESSOS PARA AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO HORIZONTAL DAS REDES HIDROGRÁFICAS.	85
FIGURA 33: FLUXOGRAMA QUE INCLUI OS PROCESSOS PARA AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO VERTICAL DAS REDES HIDROGRÁFICAS.	86
FIGURA 34: PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO DA REDE HIDROGRÁFICA E DETERMINAÇÃO DOS COMPRIMENTOS DOS CURSOS DE ÁGUA.....	89
FIGURA 35: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO COM A REDE HIDROGRÁFICA DE REFERÊNCIA DO CIGEOE SOBREPOSTA EM IMAGEM DE SATÉLITE.	90
FIGURA 36: REDE HIDROGRÁFICA DO OSM SOBREPOSTA À REDE HIDROGRÁFICA DE REFERÊNCIA DO CIGEOE.	91
FIGURA 37: REDES HIDROGRÁFICAS EXTRAÍDAS DOS MDES SRTM 90 (ESQUERDA) E ASTER (DIREITA) SOBREPOSTAS À REDE HIDROGRÁFICA DE REFERÊNCIA DO CIGEOE.	93
FIGURA 38: A) LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO: ÁREA LOCALIZADA NA ESCÓCIA (AE1) B) E ÁREA LOCALIZADA A SUDESTE DE INGLATERRA (AE2) C).....	95
FIGURA 39: REDE HIDROGRÁFICA DISPONÍVEL NO OSM COM OS VALORES <i>RIVERS</i> E <i>STREAMS</i> PARA AE1 A) E PARA AE2 B).	96
FIGURA 40: REDE HIDROGRÁFICA DE REFERÊNCIA DE AE1 A) E DE AE2 B).	96
FIGURA 41: REDES HIDROGRÁFICAS EXTRAÍDAS DOS MDES ORIGINAIS E MDES RECONSTRUÍDOS: A) REDES EXTRAÍDAS DO MDE SRTM 90 NA AE1; B) REDES EXTRAÍDAS DO MDE ASTER NA AE1; C) REDES EXTRAÍDAS DO SRTM 90 NA AE2; D) REDES EXTRAÍDAS DO MDE ASTER NA AE2.	97
FIGURA 42: A) <i>BUFFER</i> DE 200 M EM TORNO DA REDE DE REFERÊNCIA NA AE1; B) <i>BUFFER</i> DE 500 M EM TORNO DA REDE DE REFERÊNCIA NA AE2.	98
FIGURA 43: VARIABILIDADE DA ORDEM DA BACIA, NÚMERO TOTAL DE SEGMENTOS E COMPRIMENTO TOTAL DAS REDES HIDROGRÁFICAS PARA A ÁREA DE ESTUDO AE1.	100

FIGURA 44: VARIABILIDADE DOS PARÂMETROS TOPOGRÁFICOS, ORDEM DA BACIA, NÚMERO TOTAL DE SEGMENTOS E COMPRIMENTO TOTAL DA REDE PARA A ÁREA DE ESTUDO 2 (AE2).	101
FIGURA 45: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E VISUALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DO RELEVO.	104
FIGURA 46: MDES DA ÁREA DE ESTUDO: A) MDE DO ORDNANCE SURVEY; B) MDE SRTM 30.	105
FIGURA 47: REDES HIDROGRÁFICAS NA ÁREA ESTUDO: A) REDE DO OSM COM <i>RIVERS</i> E <i>STREAMS</i> , B) REDE DO OSM COM <i>RIVERS</i> E C) REDE DE REFERÊNCIA DO ORDNANCE SURVEY.	107
FIGURA 48: DETALHE DA REDE HIDROGRÁFICA DA GRÃ-BRETANHA EXTRAÍDA DA PÁGINA DO ORDNANCE SURVEY (COR AZUL) E DA REDE HIDROGRÁFICA EXTRAÍDA DO MDE DO ORDNANCE SURVEY COM UMA RESOLUÇÃO ESPACIAL DE 50 M (COR VERMELHA) SOBREPOSTAS A UMA IMAGEM DE SATÉLITE.	108
FIGURA 49: DIFERENÇAS DE ELEVAÇÃO ENTRE O MDE DE REFERÊNCIA E: A) MDE SRTM 30 ORIGINAL; B) MDE RECONSTRUÍDO USANDO <i>RIVERS</i> E <i>STREAMS</i> E C) MDE RECONSTRUÍDO USANDO APENAS <i>RIVERS</i>	110
FIGURA 50: DECLIVE DA ÁREA DE ESTUDO EXTRAÍDO DE: A) MDE DE REFERÊNCIA DO ORDNANCE SURVEY; B) MDE SRTM 30 ORIGINAL E C) MDE RECONSTRUÍDO UTILIZANDO <i>RIVERS</i> E <i>STREAMS</i>	112
FIGURA 51: REDE HIDROGRÁFICA DE REFERÊNCIA DO ORDNANCE SURVEY, B) REDE HIDROGRÁFICA EXTRAÍDA DO MDE SRTM 30 ORIGINAL, C) REDE HIDROGRÁFICA EXTRAÍDA DO MDE RECONSTRUÍDO UTILIZANDO <i>RIVERS</i> E <i>STREAMS</i> DO OSM E D) REDE HIDROGRÁFICA EXTRAÍDA DO MDE RECONSTRUÍDO UTILIZANDO APENAS <i>RIVERS</i> DO OSM.	113
FIGURA 52: ZONAS DEFINIDAS SOBRE A ÁREA DE ESTUDO E CORRESPONDENTES A RELEVO COM DIFERENTES CARACTERÍSTICAS.	115
FIGURA 53: GRÁFICO QUE REPRESENTA A VARIAÇÃO DA MÉDIA DAS DISTÂNCIAS HORIZONTAIS ENTRE A REDE HIDROGRÁFICA DE REFERÊNCIA E AS REDES HIDROGRÁFICAS EXTRAÍDAS DO MDE ORIGINAL (SRTM 30), DO MDE RECONSTRUÍDO COM <i>RIVERS</i> E <i>STREAMS</i> E AS REDES EXTRAÍDAS DO MDE RECONSTRUÍDO COM <i>RIVERS</i> DO OSM.	115
FIGURA 54: MÉDIA DA DISTÂNCIA VERTICAL ENTRE A REDE HIDROGRÁFICA DE REFERÊNCIA EXTRAÍDA DO MDE DE REFERÊNCIA, E AS REDES EXTRAÍDAS DO MDE	

ORIGINAL (SRTM 30), DO MDE RECONSTRUÍDO COM <i>RIVERS</i> E <i>STREAMS</i> E AS REDES EXTRAÍDAS DO MDE RECONSTRUÍDO COM <i>RIVERS</i> DO OSM.	116
FIGURA 55: MAPAS DE DECLIVE DAS ZONAS Z1, Z2, Z3 E Z4.....	119
FIGURA 56: LOCALIZAÇÃO DOS RIOS 1), LOCALIZADO NA ZONA ACIDENTADA E RIO 2) LOCALIZADO NA ZONA PLANA.	120
FIGURA 57: MOSTRA A PLANIMETRIA DOS RIOS 1) E 2) APRESENTADOS NA FIGURA 56, EXTRAÍDOS DA REDE HIDROGRÁFICA DE REFERÊNCIA (A COR PRETA), DO MDE ORIGINAL (SRTM 30) (A COR VERMELHA) E DO MDE RECONSTRUÍDO UTILIZANDO <i>RIVERS</i> E <i>STREAMS</i> (A COR VERDE).....	121
FIGURA 58: PERFIS LONGITUDINAIS DOS RIOS 1) E 2).....	123
FIGURA 59: BACIAS HIDROGRÁFICAS GERADAS A PARTIR DA INDICAÇÃO DE <i>POUR POINTS</i> A PARTIR: A) DO MDE DE REFERÊNCIA, B) DO MDE ORIGINAL SRTM 30, C) DO MDE RECONSTRUÍDO UTILIZANDO OS <i>RIVERS</i> E <i>STREAMS</i> DO OSM E D) DO MDE RECONSTRUÍDO CONSIDERANDO APENAS OS <i>RIVERS</i> DO OSM.	124
FIGURA 60: DIFERENÇA DAS ÁREAS DAS BACIAS GERADAS POR <i>POUR POINTS</i> SELECIONADOS E EXTRAÍDAS DO MDES EM ANÁLISE E AS ÁREAS DAS BACIAS EXTRAÍDAS DO MDE DE REFERÊNCIA.	125

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1: ARTIGOS EM REVISTAS INTERNACIONAIS (VER ANEXOS 1 E 2).....	7
TABELA 2: ARTIGOS EM ATAS DE CONFERÊNCIAS/CONGRESSOS INTERNACIONAIS (VER ANEXOS 3 E 4)	7
TABELA 3: ARTIGOS EM ATAS DE CONFERÊNCIAS NACIONAIS (VER ANEXO 5).....	8
TABELA 4: <i>POSTERS</i> EM CONGRESSOS NACIONAIS (VER ANEXO 6 E 7).....	8
TABELA 5: RESUMO EM CONGRESSO INTERNACIONAL (VER ANEXO 8).....	8
TABELA 6: DIFERENÇAS ENTRE O COMPRIMENTO TOTAL DA REDE DE REFERÊNCIA (L_{CIGEOE}) E DE CADA UMA DAS REDES HIDROGRÁFICAS GERADAS PARA OS DIFERENTES NÍVEIS CRÍTICOS.	92
TABELA 7: MÉDIA E A RAIZ QUADRADA DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO ($REQM$) DAS DISTÂNCIAS HORIZONTAIS ENTRE A REDE DE REFERÊNCIA E CADA UMA DAS REDES EM ANÁLISE (A REDE DO OSM, A REDE EXTRAÍDA DO SRTM 90 E A REDE EXTRAÍDA DO ASTER).....	93
TABELA 8: ORDEM DA BACIA (O), ORDEM I DO CURSO DE ÁGUA (O_I), NÚMERO DE SEGMENTOS DE ORDEM I (N_{SI}) E COMPRIMENTO TOTAL DOS SEGMENTOS DE ORDEM I (L_I), EXTRAÍDOS DAS REDES HIDROGRÁFICAS DERIVADAS DOS MDES ASTER E SRTM 90 ORIGINAIS PARA A AE1.	98
TABELA 9: ORDEM DA BACIA (O), ORDEM I DO CURSO DE ÁGUA (O_I), NÚMERO DE SEGMENTOS (N_{SI}) E COMPRIMENTO TOTAL DOS SEGMENTOS DE ORDEM I (L_I), EXTRAÍDOS DAS REDES HIDROGRÁFICAS DERIVADAS DOS MDES ASTER E SRTM RECONSTRUÍDOS PARA A AE1.....	99
TABELA 10: PARÂMETROS TOPOGRÁFICOS ORDEM DA BACIA, NÚMERO DE ORDEM DO CURSO DE ÁGUA, NÚMERO DE SEGMENTOS E COMPRIMENTO TOTAL DOS SEGMENTOS DE ORDEM I , EXTRAÍDOS DAS REDES HIDROGRÁFICAS DERIVADAS DOS MDES ASTER E SRTM ORIGINAIS PARA AE2.	100
TABELA 11: PARÂMETROS TOPOGRÁFICOS ORDEM DA BACIA, ORDEM DO CURSO DE ÁGUA, NÚMERO DE SEGMENTOS E COMPRIMENTO TOTAL DOS SEGMENTOS DE ORDEM I , EXTRAÍDOS DAS REDES HIDROGRÁFICAS DERIVADAS DOS MDES ASTER E SRTM RECONSTRUÍDOS PARA A AE2.....	101

TABELA 12: MÉDIA, DESVIO PADRÃO E A RAIZ QUADRADA DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO DAS DISTÂNCIAS HORIZONTAIS ENTRE A REDE DE REFERÊNCIA E CADA UMA DAS REDES HIDROGRÁFICAS EM ANÁLISE.	102
TABELA 13: COMPRIMENTO TOTAL DA REDE EXTRAÍDA DO MDE ORIGINAL (L_O) E A REDE EXTRAÍDA DO MDE RECONSTRUÍDO (L_R) E A SUA DIFERENÇA ($L_O - L_R$), A DIFERENÇA ENTRE O COMPRIMENTO DA REDE HIDROGRÁFICA DE REFERÊNCIA (L_{OS}) E O COMPRIMENTO DAS REDES EXTRAÍDAS DOS MDES ORIGINAIS ($L_{OS} - L_O$) E DOS MDES RECONSTRUÍDOS ($L_{OS} - L_R$).....	103
TABELA 14: MÉDIA, DESVIO PADRÃO, A RAIZ QUADRADA DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO, VALORES MÁXIMO E MÍNIMO DAS DIFERENÇAS ENTRE O MDE DE REFERÊNCIA E CADA MDE I EM ANÁLISE.	109
TABELA 15: MÉDIA, DESVIO PADRÃO, A RAIZ QUADRADA DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO, VALORES MÁXIMO E MÍNIMO DAS DIFERENÇAS ENTRE O DECLIVE DERIVADO DO MDE DE REFERÊNCIA E OS MAPAS DE DECLIVE EXTRAÍDOS A PARTIR DO MDE ORIGINAL E DO MDE RECONSTRUÍDO UTILIZANDO <i>RIVERS</i> E <i>STREAMS</i>	111
TABELA 16: MÉDIA (M), DESVIO PADRÃO (σ) E A RAIZ QUADRADA DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO ($REQM$) DAS DISTÂNCIAS HORIZONTAIS ENTRE OS PONTOS DE CADA REDE UM ESTUDO (A EXTRAÍDA DO MDE ORIGINAL, A EXTRAÍDA DO MDE RECONSTRUÍDO UTILIZANDO <i>RIVERS</i> E <i>STREAMS</i> E A EXTRAÍDA DO MDE RECONSTRUÍDO USANDO APENAS <i>RIVERS</i>) E A REDE HIDROGRÁFICA DE REFERÊNCIA.	114
TABELA 17: MÉDIA (M), DESVIO PADRÃO (σ) E A RAIZ QUADRADA DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO ($REQM$) DAS DIFERENÇAS DE DECLIVE EXTRAÍDO DO MDE DE REFERÊNCIA E DOS MDES EM ESTUDO (ORIGINAL E O RECONSTRUÍDO UTILIZANDO <i>RIVERS</i> E <i>STREAMS</i>).	117
TABELA 18: VALORES DA ÁREA DAS BACIAS EXTRAÍDAS DOS: MDE DE REFERÊNCIA, MDE ORIGINAL (SRTM 30), MDE RECONSTRUÍDO USANDO <i>RIVERS</i> E <i>STREAMS</i> E O MDE RECONSTRUÍDO UTILIZANDO <i>RIVERS</i> DO OSM.	125

LISTA DE ABREVIATURAS

ANUDEM	Australian National University Digital Elevation Model
ASPRS	American Society of Photogrammetry and Remote Sensing
ASTER	Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer
CIGeoE	Centro de Informação Geoespacial do Exército
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DGT	Direção Geral do Território
DM	Departamento de Matemática
D8	Deterministic Eight Neighbor
EGM96	Earth Gravitational Model 1996
ESRI	Environmental Systems Research Institute
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
FCTUC	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
GNSS	Global Navigation Satellite System
IG	Informação Geográfica
IGV	Informação Geográfica Voluntária
INESC Coimbra	Instituto Nacional de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra
IPG	Instituto Politécnico da Guarda
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
JPL	Jet Propulsion Laboratory

JSS	Japan Space Systems
LiDAR	Light Detection And Ranging
MDEs	Modelos Digitais de Elevação
MDEGs	Modelos Digitais de Elevação Globais
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MIT	Massachusetts Institute of Technology
METI	Ministério de Economia, Comércio e Indústria
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NSSDA	National Standard for Spatial Data Accuracy
ODN15	Ordnance Datum Newlyn 1915
OSM	OpenStreetMap
RADAR	Radio <u>D</u> etection And Ranging
SAR	Synthetic Aperture Radar
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TIN	Triangulated Irregular Network
USGS	United States Geological Survey
VANTs	Veículos Aéreos Não – Tripulados

Capítulo I - INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e âmbito do estudo

A presente tese faz a ponte entre os domínios científicos da ciência da Informação Geoespacial e da Hidrologia pretendendo dar um contributo e evidenciar a importância da correta definição do relevo (modelação digital do terreno) com vista à modelação dos processos hidrológicos que ocorrem no espaço físico, que é a bacia hidrográfica, e que inclui a sua rede de drenagem. Os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) e a análise da exatidão das linhas de água extraídas, assim como, a exatidão de outros parâmetros topográficos derivados dos MDEs, ocupam o núcleo essencial dos assuntos estudados. Apresenta-se uma metodologia que permite através da interpolação da altimetria derivada dos Modelos Digitais de Elevação Globais (MDEGs) (pontos cotados) e de Informação Geográfica Voluntária (IGV), mais concretamente as linhas de água disponíveis no projeto colaborativo OpenStreetMap (OSM), gerar novos modelos que permitem a extração de linhas de água de maior exatidão planimétrica e altimétrica que a exatidão das linhas de água extraídas dos MDEGs originais.

As linhas de água do OSM (em planimetria) são interpoladas com a altimetria (pontos cotados) derivados dos MDEGs Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) e Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), utilizando um interpolador apropriado para gerar MDEs úteis para a Hidrologia (ANUDEM). A metodologia permitiu aumentar a exatidão das redes hidrográficas extraídas dos modelos reconstruídos, assim como, o limite da bacia. A avaliação da exatidão é efetuada

comparando com uma fonte de dados de maior exatidão, sendo considerados como referência. A metodologia recorre a dados de livre acesso e gratuitos, os MDEGs e linhas de água do OSM, podendo ser aplicada a regiões do mundo onde não existem dados oficiais ou no caso de existirem, o seu acesso seja difícil.

Nesta tese são referidos vários assuntos que estão subjacentes à metodologia desenvolvida e aplicada nesta tese. Referem-se algumas noções, ainda que breves, de modelos hidrológicos e o conceito de bacia hidrográfica como sistema hidrológico. No domínio da modelação digital de terreno referem-se as fontes de erro dos MDEs e faz-se a revisão de alguns trabalhos sobre os fatores que influenciam a exatidão dos MDEs e referem-se alguns trabalhos que propõem metodologias que permitem melhorar essa exatidão assim como, a exatidão dos parâmetros topográficos deles extraídos. É referida a importância dos MDEs para o estudo dos processos hidrológicos que ocorrem nas bacias hidrográficas. Descrevem-se e listam-se alguns dos parâmetros topográficos que ajudam a analisar os processos hidrológicos. São referidas metodologias utilizadas para a construção dos MDEs, descrevendo algumas das tecnologias utilizadas na aquisição dos dados, os métodos de interpolação utilizados na construção da superfície topográfica, assim como, as estruturas de armazenamento dos dados. São também abordados os MDEGs ASTER e SRTM, nomeadamente os aspetos ligados à sua construção, referindo também algumas limitações e vantagens. É exposto o tópico relativo à exatidão da Informação Geográfica e à exatidão dos MDEs e de alguns parâmetros topográficos derivados.

As razões que levaram à escolha desta temática sustentam-se na ideia central de que sendo as bacias hidrográficas unidades fundamentais ao nível do planeamento e gestão dos recursos hídricos, elas desempenham um papel importante na vida das populações, e por isso, a sua caracterização fisiográfica reveste-se de particular importância para a modelação dos processos hidrológicos que sobre ela ocorrem.

No passado os parâmetros topográficos, eram extraídos das redes hidrográficas representadas em mapas topográficos; atualmente os mesmos parâmetros são extraídos de forma automatizada através de algoritmos embebidos em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e operam sobre os MDEs. A utilização de MDEs produzidos ao nível local ou regional, embora apresente a vantagem de terem normalmente maior exatidão, têm frequentemente custos associados e o seu acesso é por vezes difícil. Estes

modelos são habitualmente produzidos pelas Agências Oficiais de Cartografia (em Portugal a Direção Geral do Território – DGT). Uma alternativa à utilização destes modelos será a utilização de MDEGs, pois, cobrem quase na totalidade a superfície terrestre. Como exemplo, referem-se os MDEs SRTM da responsabilidade do Jet Propulsion Laboratory (JPL) da NASA (National Aeronautics and Space Administrations) e ASTER da responsabilidade de uma cooperação entre a NASA, o Ministério de Economia, Comércio e Indústria (METI) do Japão e do Japan Space Systems (JSS). Todavia, como qualquer outro conjunto de dados geográficos, os MDEs possuem erros e, conseqüentemente, esses erros tendem a propagar-se aos dados deles extraídos o que se vai repercutir e influenciar as análises sobre eles realizadas.

Interessa pois, desenvolver uma metodologia que recorrendo a dados de acesso livre e gratuitos, permitirá melhorar a exatidão dos parâmetros topográficos extraídos dos MDEGs, nomeadamente as redes hidrográficas, de modo a que, em determinadas situações, possam ser uma alternativa às redes hidrográficas produzidos pelas agências oficiais de cartografia na forma de mapas topográficos e possam ser uma opção de baixo custo para regiões do mundo que não possuem sequer cartografia oficial. É objetivo que a metodologia possa ser aplicada em estudos que se desenvolvem em regiões hidrográficas que se estendem por mais do que um país, pois, o recurso a cartografia oficial de cada país tornaria a solução mais complexa devido por exemplo, às diferentes especificações técnicas cartográficas utilizadas na sua criação, o que implicaria a uniformização dessas especificações, como por exemplo, os sistemas de coordenadas associados.

Por conseguinte, apresenta-se nesta tese uma metodologia que utilizando altimetria derivada dos MDEGs ASTER e SRTM e IGV permite criar novos MDEs a partir dos quais é possível extrair linhas de água com maior exatidão planimétrica e altimétrica. Não sendo intuito nesta tese entrar no domínio da modelação hidrológica, pretende-se, isso sim, desenvolver uma metodologia que permite melhorar um dos seus *inputs* - a rede hidrográfica (e.g. linhas de água mais bem caracterizadas; parâmetros relacionados com a rede de drenagem mais representativos). Foi neste contexto que surgiu a ideia de desenvolver uma metodologia que preconizasse o exposto e que constitui a presente tese intitulada “*Integração de Informação Geográfica Voluntária em Modelos Digitais de Elevação Globais na representação de linhas de água*”.

1.2 Objetivos

O principal objetivo da presente tese centra-se em apresentar contributos no âmbito da análise e da exatidão dos MDEGs e na sua utilização juntamente com IGV (linhas de água do OSM) para gerar novos MDEs que permitam obter parâmetros topográficos com maior exatidão. Tais parâmetros permitem efetuar a caracterização fisiográfica das bacias hidrográficas necessária à modelação hidrológica. Referem-se alguns objetivos mais específicos a atingir e que se elencam de seguida:

- Analisar a exatidão planimétrica das linhas de água extraídas dos MDEGs disponíveis SRTM e ASTER e das linhas de água do OSM, comparando a sua posição horizontal com a posição horizontal de redes hidrográficas de referência, em diferentes regiões;
- Desenvolvimento de uma metodologia que permita melhorar a exatidão planimétrica das redes hidrográficas extraídas de MDEs transformados;
- Desenvolvimento de uma metodologia que permita melhorar a exatidão altimétrica das redes hidrográficas extraídas dos MDEs transformados;
- Análise da variabilidade da exatidão dos MDEs e de alguns parâmetros topográficos deles derivados em função da complexidade do terreno.

1.3 Organização da tese

A presente tese é constituída por seis capítulos que serão sintetizados e descritos de forma breve nesta seção. O Capítulo I, “Introdução”, pretende fazer a introdução e o enquadramento do tema desenvolvido, bem como as razões que motivaram e sustentaram a sua escolha, referindo-se também os objetivos propostos e a utilidade da sua aplicação. Listam-se também itens de produção científica desenvolvida, tais como artigos publicados

em revistas internacionais, artigos apresentados em conferências internacionais e nacionais e *posters* apresentados em conferências nacionais.

No Capítulo II, intitulado “Modelos Digitais de Elevação aplicados à Hidrologia”, faz-se uma breve revisão bibliográfica sobre trabalhos publicados no âmbito dos assuntos que sustentam a tese. Assim, começa-se por fazer uma abordagem geral aos modelos hidrológicos e à necessidade de conhecer o relevo da zona em estudo, para compreender, interpretar e estudar os processos hidrológicos que aí ocorrem. Refere-se também a classificação dos modelos hidrológicos segundo alguns critérios, assim como, o conceito de bacia hidrográfica como um sistema hidrológico. Posteriormente, é feita uma revisão bibliográfica sobre Modelação Digital de Terreno, referindo-se entre outros assuntos, as técnicas utilizadas na aquisição dos dados usados na construção dos modelos (MDEs), fundamentando de uma forma mais consistente as técnicas utilizadas na aquisição dos dados que foram utilizados na presente tese – MDEGs ASTER e SRTM. Referem-se também as estruturas usadas na organização dos dados e alguns métodos de interpolação usados na criação da superfície topográfica. De seguida, aborda-se o tema relativo à exatidão da Informação Geográfica e também referem-se métodos de avaliação da exatidão do MDE, referindo os fatores que influenciam a exatidão dos MDEs e as suas principais fontes de erro. A parte final do capítulo é dedicada ao tópico relativo à extração de alguns parâmetros topográficos a partir do MDE.

O Capítulo III é dedicado ao tópico da Informação Geográfica Voluntária (IGV), onde se explica o conceito, realçando aspetos e questões associadas, como os dados de IGV, a tipologia de voluntários e questões relativas à privacidade. De seguida, faz-se uma breve descrição do projeto colaborativo OSM, abordando-se a qualidade dos dados do OSM, referindo algumas medidas para avaliar a qualidade, tais como, a cobertura e a completude.

No Capítulo IV, é apresentada e descrita uma metodologia que, utilizando MDEGs e informação do OSM (linhas de água) permite criar novos MDEs a partir dos quais é possível extrair algumas características topográficas das bacias hidrográficas com maior exatidão, como por exemplo, as linhas de água e o limite da bacia. Inclui a descrição na preparação dos dados (MDEs originais e dados do OSM), e os algoritmos dos processos (fluxogramas), desde a transformação dos MDEs originais, extração da informação

derivada e finalmente a avaliação da exatidão dos MDEs e de alguns parâmetros topográficos deles extraídos.

No Capítulo V, intitulado de “Estudos de Caso” abordam-se três estudos de caso que sustentam todo o trabalho desenvolvido ao longo do programa doutoral e que se encontra publicado em revistas científicas e foi apresentado em conferências internacionais e nacionais. É explicado de forma breve cada estudo, descrevendo a metodologia, apresentando e discutindo os resultados obtidos.

Por último, no Capítulo VI “Conclusões”, são apresentadas algumas conclusões dos estudos desenvolvidos e da metodologia apresentada e aplicada, referindo a sua utilidade, bem como, as suas limitações e potencialidades. Referem-se ainda, possíveis desenvolvimentos futuros. Num anexo final são apresentadas publicações científicas referentes ao trabalho desenvolvido no âmbito da tese e enunciadas na seção 1.4.

1.4 Publicações e participação em conferências

A presente tese é sustentada no trabalho desenvolvido e incluído em artigos publicados em revistas científicas internacionais e apresentados em conferências nacionais e internacionais. A Tabela 1 resume os artigos publicados em revistas científicas internacionais. A Tabela 2 apresenta os artigos publicados em atas de conferências/congressos internacionais. A Tabela 3 apresenta os artigos apresentados e publicados em atas de conferência nacional e a Tabela 4 apresenta os *posters* apresentados e publicados em atas de congressos nacionais. A Tabela 5 apresenta um resumo submetido e publicado em livro de resumos de congresso internacional.

Tabela 1: Artigos em revistas internacionais (ver Anexos 1 e 2).

Título	Revista	Autor(es)	Estado
Improving the positional accuracy of drainage networks extracted from Global Digital Elevation Models using OpenStreetMap data	Journal of Hydrology and Hydromechanics, 66, 2018, 3, 285–294. DOI: 10.1515/johh-2017-0057	Monteiro, E.S.V., Fonte, C.C. e de Lima, J.L.M.P.	Publicado em 2018
Analysing the potential of OpenStreetMap data to improve the accuracy of SRTM 30 DEM on derived basin delineation, slope and drainage networks	Hydrology 2018, 5, 34, 1-27. https://DOI.org/10.3390/hydrology5030034	Monteiro, E.S.V., Fonte, C.C. e de Lima, J.L.M.P.	Publicado a 18/07/2018

(*) Este artigo recebeu em março de 2019 o Prémio Fluvial – Jovem Cientista do Ano 2018 atribuído pelo Fluvial de Mora (Portugal). Este prémio pretende distinguir um aluno (PhD, MSc, Lic.) que tenha publicado, como primeiro autor, um artigo (revista SCI), no ano a que se refere o concurso, na temática conservação e biodiversidade de recursos aquáticos continentais (Estuários e Rios).

Tabela 2: Artigos em atas de conferências/congressos internacionais (ver Anexos 3 e 4)

Título	Conferência	Autor(es)	Estado
Assessing positional accuracy of drainage networks extracted from ASTER, SRTM and OpenStreetMap	AGILE'2015-18th AGILE International Conference on Geographic Information Science - Lisboa, Portugal	Monteiro, E.S.V., Fonte, C.C. e de Lima, J.L.M.P.	Publicado em livro de atas da conferência em 2015 http://www.agileonline.org/index.php/conference/conference2015?layout=edit&id=241
Parâmetros topográficos derivados do relevo e utilizados na caracterização de bacias hidrográfica	VIII Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua – 2013 Lisboa, Portugal	Monteiro, E.S.V., de Lima, J.L.M.P. e Fonte, C.C.	Publicado em atas do Congresso ISBN:978-938966-6-9 - Fundación Nueva Cultura del Agua - FNCA, http://revistas.lis.ulsiada.pt/index.php/8cigpa/issue/view/28 , Lisboa (Portugal), 500-506

Integração de Informação Geográfica Voluntária em Modelos Digitais de Elevação Globais na representação de linhas de água

Tabela 3: Artigos em atas de conferências nacionais (ver Anexo 5).

Título	Conferência	Autor(es)	Estado
Exatidão posicional de redes hidrográficas extraídas de MDEs gerados a partir de MDEs globais e de dados extraídos do OpenStreetMap	VIII CNCG - Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, Lisboa - 2015	Monteiro, E.S.V., Fonte, C.C. e de Lima, J.L.M.P.	Publicado na página da Conferência: http://viiiicng.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/VIIICNCG/cncg2015_comunicao_61.pdf

Tabela 4: *Posters* em congressos nacionais (ver Anexo 6 e 7).

Título	Conferência	Autor(es)	Estado
Utilização de Informação Geográfica Voluntária para aumentar a exatidão de redes hidrográficas extraídas de Modelos Globais de Elevação	14º Congresso da Água 2018 Évora - Portugal	Monteiro, E.S.V., Fonte, C.C. e de Lima, J.L.M.P.	Publicado em Atas do Congresso
Influência da geomorfologia no transporte e deposição de materiais litíferos em bacias hidrográficas – Estudo de caso de uma Mina localizada na região da Guarda	X Congresso Nacional de Geologia – Açores 2018	Monteiro, E.S.V., Monteiro, A.F. e Antão, A.M.C. Ferreira, A.M.	Publicado em Atas do Congresso

Tabela 5: Resumo em congresso internacional (ver Anexo 8).

Título	Conferência	Autor(es)	Estado
Variability of topographic parameters obtained from the ASTER and SRTM Digital Elevation Models	3rd IAHR – Europe Congress, 2014 International Association for Hydro-Environment Engineering and Research	Monteiro, E.S.V., Fonte, C.C. e de Lima, J.L.M.P.	Publicado no Livro de Resumos

Heráclito

Nenhum homem pode banhar-se duas vezes no mesmo rio,

Pois, na segunda vez o rio já não é o mesmo, nem tão pouco é o homem!



Dados OSM



Nascente do rio Mondego



rio Mondego

Capítulo II - MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO APLICADOS À HIDROLOGIA

2.1 Introdução

No presente capítulo é feita uma breve revisão bibliográfica dos assuntos subjacentes ao tema da tese, começando por fazer um enquadramento relativo aos modelos hidrológicos (seção 2.2), onde se apresenta a definição e objetivos realçando ainda a sua importância e aplicabilidade. É apresentada uma classificação de modelos hidrológicos segundo alguns critérios definidos, sendo também abordado o conceito de bacia hidrográfica e a sua função como sistema hidrológico.

Na seção 2.3 é feita uma abordagem à Modelação Digital de Terreno, abordando-se diversos aspetos tais como, a sua relevância para os estudos hidrológicos. Descrevem-se as técnicas utilizadas na aquisição dos dados usados na construção dos MDEs, bem como as estruturas utilizadas para a organização da informação, referindo ainda alguns métodos de interpolação utilizados para gerar a superfície topográfica (MDE). Apresentam-se os MDEGs utilizados nos estudos de caso descritos na tese (ASTER e SRTM de 30 e 90 m de resolução espacial). Abordam-se também questões ligadas à avaliação da qualidade da Informação Geográfica. Esta seção (2.3) termina com a análise da exatidão dos MDEs referindo-se os erros associados e os fatores que influenciam a sua exatidão.

Por último, a secção 2.4 é dedicada ao tópico da extração dos parâmetros topográficos a partir do MDE, abordando as metodologias utilizadas na extração da bacia hidrográfica, do declive e da rede hidrográfica. Refere-se também o tópico relativo à classificação ou hierarquização das redes hidrográficas segundo o Método de Strahler.

2.2 Modelos hidrológicos

2.2.1 Enquadramento

A Hidrologia é a ciência base para o Planeamento e Gestão de Recursos Hídricos, aplicando no essencial princípios de Engenharia e de Cartografia (Davie, 2002). Os hidrologistas necessitam de investigar questões como a previsão de caudais, volumes de escoamento, precipitação, concentração de poluentes, níveis de água, entre outros (ASCE, 2000). Na verdade, todos estes problemas acontecem sobre a superfície terrestre, estando por isso, intrinsecamente dependentes da topografia do terreno e da variabilidade espacial do relevo. A topografia assume-se por isso como um fator influenciador na distribuição espacial de diversas variáveis ambientais, por exemplo, na previsão de zonas húmidas (Rodhe e Seibert, 1999) e na previsão da química do solo (Chen et al., 1997, McKenzie e Ryan, 1999, Johnson et al., 2000, Welsch et al., 2001), constituindo um dos principais fatores no controlo dos processos hidrológicos (Vaze et al., 2010).

O relevo assume um papel fundamental nos processos hidrológicos pois, condiciona os percursos que os rios tomam e por isso influencia a estrutura da rede hidrográfica. O relevo condiciona a acumulação de água em lagoas e influencia a forma geométrica de uma bacia hidrográfica. É também o relevo que define a classificação do que é ou não uma zona de leito de cheia ou até uma zona inundável. É neste contexto que a modelação digital do terreno se assume como sendo um fator chave para a modelação hidrológica.

A Hidrologia e os seus processos hidrológicos são dependentes de diversas características da bacia hidrográfica, tais como a geomorfologia, o clima, a ocupação e uso do solo, a topografia, entre outros. A análise dos processos hidrológicos é complexa e requer abstração, observação e análise do comportamento das variáveis hidrológicas, como por exemplo, o caudal médio anual de uma bacia ou o total diário de evaporação de um reservatório. Para compreender e analisar o comportamento da água sob as suas diversas formas, recorre-se à modelação hidrológica. Em termos gerais, um modelo pode entender-se como uma representação simplificada de um sistema do mundo real (Sharma et al., 2008), considerando-se por isso que o melhor modelo é aquele que produz resultados mais próximos da realidade, para o estudo de determinada variável.

Os modelos hidrológicos permitem equacionar, compreender, representar e simular os processos hidrológicos assim como, o comportamento hidrológico de uma determinada bacia hidrográfica (Tucci, 1998). São por isso considerados como uma ferramenta importante e necessária para a gestão dos recursos hídricos e ambientais. Os modelos hidrológicos quando aplicados à simulação de cenários, constituem ferramentas úteis para analisar os processos que poderão ocorrer nas bacias hidrográficas, assim como, para a sua gestão. A implementação destes modelos e a sua integração com os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite a criação de múltiplas bases de dados que possibilitam a extração de parâmetros topográficos, assim como, a análise e visualização dos resultados de simulações realizadas (He et al., 2001).

Atualmente existe uma variedade de fontes de dados topográficos com diferente resolução espacial e que são obtidos a partir de diferentes metodologias de aquisição. Refira-se como exemplo, as fontes de informação recolhida pelos sensores da Detecção Remota que permitem a construção de MDEs sobre os quais as ferramentas de *software* de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) podem operar de modo a extraírem parâmetros topográficos, e.g. o limite das bacias e das sub-bacias, as redes hidrográficas, o declive, entre outros. Por conseguinte, a informação geográfica pode entender-se como informação primária para a análise de problemas relacionados com os recursos hídricos.

Os modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos por várias e diferentes razões, no entanto, são normalmente desenhados e concebidos para cumprir essencialmente dois objetivos: i) O primeiro é a modelação de uma bacia hidrográfica de modo a entender o comportamento dos fenómenos hidrológicos que nela ocorrem, bem como entender de que forma determinadas mudanças na bacia influenciam o fenómeno hidrológico em análise, normalmente os escoamentos superficiais, as perdas por evapotranspiração e o transporte de sedimentos e poluentes; ii) Outro objetivo da modelação da bacia visa gerar séries de dados hidrológicos para uso em previsões, fornecendo assim um conhecimento valioso para estudar, por exemplo, potenciais impactos devidos a alterações climáticas e/ou do uso do solo (e.g. Xu, 2002).

2.2.2 Classificação dos modelos

Os modelos hidrológicos podem ser classificados segundo diferentes critérios (Moreira, 2005), tais como:

- i. O tipo de variáveis utilizadas e assim ter-se-ão modelos determinísticos ou modelos estocásticos;
- ii. Segundo o tipo de relação existente entre as variáveis e assim, ter-se-ão modelos empíricos e modelos conceptuais;
- iii. Segundo a forma de representação dos dados podemos ter modelos discretos e modelos contínuos;
- iv. Segundo a existência ou não de relações espaciais têm-se modelos agregados e modelos distribuídos;
- v. Segundo a dependência temporal, ter-se-ão modelos estáticos e modelos dinâmicos.

A Figura 1 pretende ilustrar alguns critérios que estão na base da classificação dos modelos hidrológicos.

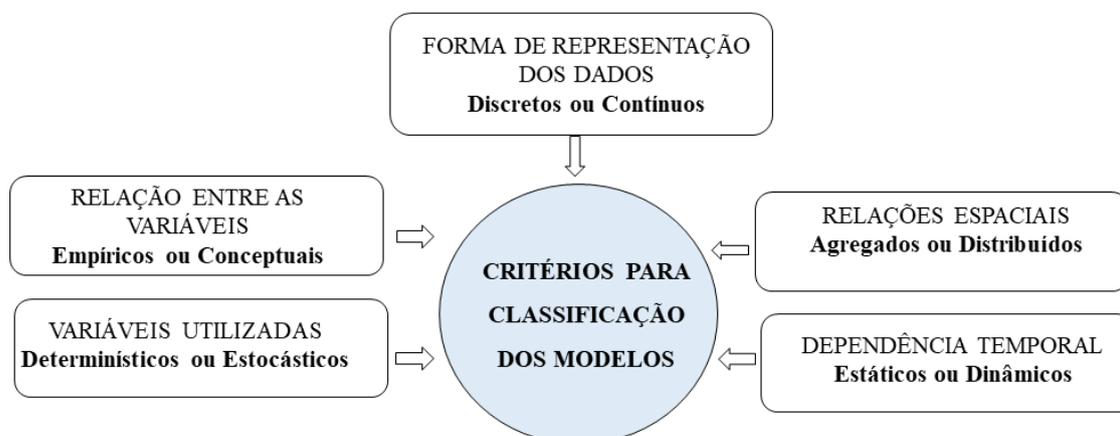


Figura 1: Alguns critérios de classificação dos modelos hidrológicos. (Fonte: Adaptado de Moreira, 2005).

Os modelos determinísticos caracterizam-se pelo facto de uma dada ação implicar uma mesma resposta. Se tal resposta é aleatória, pelo menos em parte, está-se perante um modelo não determinístico. Os modelos determinísticos aplicam-se por exemplo, à análise

de cheias e à simulação de escoamentos fluviais (Quintela e Portela, 2002). Os modelos hidrológicos são classificados como estocásticos, quando, para além da componente aleatória, têm uma, componente determinística, que permite contemplar a sequência temporal ou a sequência espacial dos valores das variáveis (Quintela e Portela, 2002). Estes modelos podem ser aplicados a séries temporais de dados de observação de uma determinada variável ao longo do tempo, podendo essa variável ser descrita através de características básicas, tais como tendência, e sazonalidade. Estas características permitem que sejam aplicados a modelos de eventos extremos (e.g. cheias, precipitações e secas) e a modelos de simulação de escoamentos fluviais, assim como, para dimensionamento de albufeiras (Quintela e Portela, 2002).

Os modelos podem classificar-se como empíricos, quando utilizam relações baseadas em observações. Quando os modelos são baseados em processos designam-se de modelos conceptuais. Este tipo de modelos são, em geral, mais complexos que os modelos empíricos, pois, procuram descrever todos os processos inerentes a determinado fenómeno hidrológico estudado.

Os modelos agregados consideram que todas as variáveis de entrada e saída são representativas de toda a área em estudo. Já os modelos distribuídos consideram a variabilidade espacial inerente às diversas variáveis envolvidas no modelo. São modelos mais complexos, pois incluem grandes volumes de dados de entrada, necessários à descrição da variabilidade do espaço físico. Para manipular esse grande volume de dados e para caracterizar a heterogeneidade fisiográfica e espacializar as respetivas simulações, os SIG são ferramentas valiosas que permitem realizar esses procedimentos, aliando sempre a componente de simulação de cenários à visualização. Por essa razão, este tipo de modelos (distribuídos) são os que mais se enquadram no conceito de análise espacial inerente a um SIG.

Uma outra classificação de modelos hidrológicos é a que os define como estáticos ou dinâmicos. Os primeiros caracterizam-se pelo facto de um conjunto de dados de entrada produzir um resultado proveniente da resolução de um conjunto de equações do modelo. Já os modelos dinâmicos utilizam o resultado de uma iteração como entrada para uma iteração seguinte, acompanhando alterações das variáveis hidrológicas ao longo do tempo.

2.2.3 Bacias hidrográficas

Uma bacia hidrográfica é uma unidade essencial para os estudos hidrológicos, pois ela possui características relativas a várias componentes, como por exemplo, a geologia, a cobertura do solo, a topografia e o clima. Estas componentes influenciam os escoamentos que sobre ela ocorrem.

O conceito de bacia hidrográfica pode ser entendido como uma área do terreno que contribui para alimentar um rio e os seus afluentes em qualquer seção transversal do referido rio (Chow et al., 1988, Dingman, 2002, Viessman e Lewis, 2003). Julga-se consensual a dificuldade em lidar com os problemas do ambiente e dos recursos hídricos sem aplicar qualquer tipo de modelo de bacia hidrográfica (Tokar e Johnson, 1999). Na verdade, os modelos de bacia assumem-se como as principais ferramentas em recursos hídricos e ambiente (Singh et al., 2006), pois segundo Chow et al. (1988), uma bacia hidrográfica pode ser estudada usando o conceito de sistema hidrológico. A Figura 2 representa a bacia hidrográfica como um sistema hidrológico onde se visualizam as suas componentes: a fronteira do sistema, o limite da bacia, o armazenamento, o *input* do sistema (a precipitação) e o caudal na seção da foz da referida bacia e a evapotranspiração como *output* do sistema.

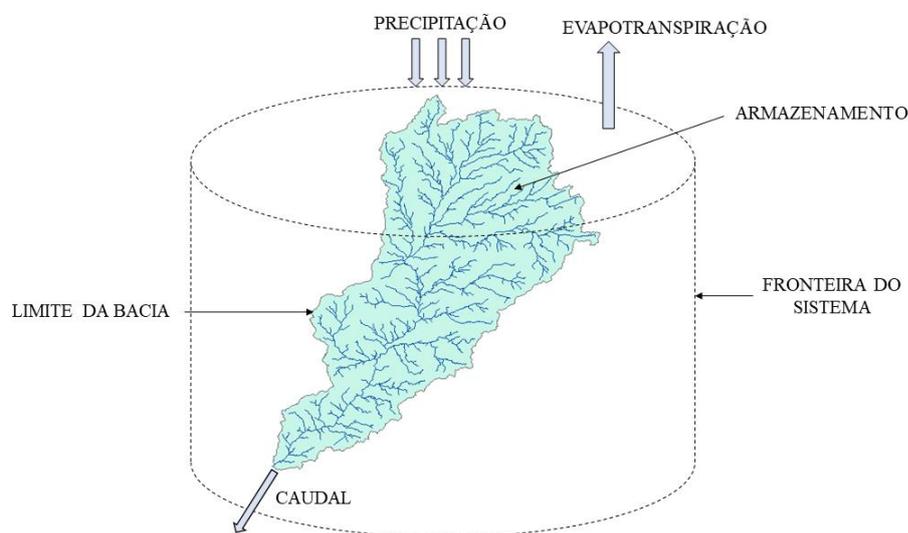


Figura 2: Esquema representativo de uma bacia hidrográfica como sistema hidrológico usado em modelos de precipitação-escoamento. (Fonte: Adaptado de Chow et al. 1988).

As bacias hidrográficas possuem a função de recolha, armazenamento e descarga de água, bem como, a função de alterar as suas propriedades químicas e de modificar a exportação de sedimentos. O escoamento da bacia será o resultado integrado de várias componentes, tais como, o clima, a geologia, a vegetação e os solos (Eisenbies et al., 2007).

A análise geomorfológica de bacias hidrográficas pode fornecer informação sobre a natureza hidrológica das rochas presentes na bacia, da mesma forma um mapa hidrográfico da bacia fornece as relações entre o tipo de rochas, estruturas e o seu estado hidrológico. Assim, a caracterização da bacia hidrográfica para fins de planeamento e gestão, exige informação topográfica, tais como: i) a rede hidrográfica; ii) o comprimento das linhas de água; iii) as linhas divisórias que delimitam a bacia e as sub-bacias e iv) o estado geológico e geomorfológico da bacia, de modo a estabelecer um adequado plano de gestão, de conservação e sustentabilidade da água (Sreedevi et al., 2013).

Os modelos de bacia quando associados a ferramentas de manipulação, processamento e visualização e apresentação de informação geográfica, como as ferramentas de SIG permitem a realização de simulações e previsão dos processos hidrológicos de forma mais assertiva, associando a componente hidrológica à componente da representação cartográfica. O efeito de simulações relativas a alterações efetuadas sobre uma bacia hidrográfica, podem ver-se em tempo real, permitindo ao hidrólogo uma mais célere compreensão e análise desses efeitos, o que pode ser importante em eventos de curta duração e de elevada intensidade como é o caso das cheias urbanas.

Uma das componentes das bacias hidrográficas são as redes hidrográficas também designadas de redes de drenagem, que constituem o sistema de drenagem da bacia, sendo formadas por segmentos de rios que conectados entre si assumem estruturas sob diversas formas, definidas pelo relevo da superfície topográfica. As redes hidrográficas são componentes importantes para a modelação de processos hidrológicos, geomorfológicos (Wilson e Gallant, 2000a), assim como, para o transporte e deposição de materiais poluentes (Jenson, 1991, Jones e Mulholland, 2000).

As redes hidrográficas podem ser obtidas a partir de diferentes métodos e técnicas, por exemplo, as técnicas fotogramétricas, onde as linhas de água que compõem a rede hidrográfica são obtidas a partir de processos de estéreo-restituição de pares estereoscópios

de fotografias áreas que cobrem a área de estudo. Uma outra forma de obtenção das redes hidrográficas (utilizada na presente tese) é através da sua extração a partir de MDEs recorrendo a algoritmos específicos. É ainda possível obter outros parâmetros topográficos a partir dos MDEs, tais como o limite da bacia hidrográfica e o declive. Uma alternativa às técnicas anteriores para a obtenção das linhas de água é a plataforma do OSM, onde uma das entidades geográficas aí representadas é a classe “*waterway*” e que inclui as linhas de água naturais mas também as estruturas artificiais, tais como canais. Estas são maioritariamente obtidas através de digitalização efetuada por cidadãos voluntários sobre imagens de satélite e/ou levantamentos topográficos utilizando o Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS – Global Navigation Satellite System).

2.3 Modelação digital do terreno

A superfície terrestre não é regular em termos altimétricos, havendo zonas mais acidentadas, zonas planas e zonas de características intermédias. A modelação digital do terreno permite definir modelos para representar a altimetria de uma qualquer região, servindo como base à resolução de diversos tipos de análises relativas a eventos que ocorrem sobre a superfície terrestre.

Em termos históricos, os MDEs foram introduzidos pelos engenheiros no Massachusetts Institute of Technology (MIT) nos finais dos anos 50 do século XX. Os MDEs têm sido vastamente aplicados desde a sua origem, em várias disciplinas como a Cartografia, Deteção Remota, Geologia, Geomorfologia, Planeamento Territorial, Engenharia Civil e Engenharia Militar (Li e Zhu, 2000, Maune, 2001). São constituídos por conjuntos de dados digitais permitindo modelar regiões da superfície terrestre de dimensão variável e a escalas variáveis.

Podem encontrar-se várias definições de MDE. Segundo Kennie e Petrie (1990), um MDE é uma representação da superfície terrestre, recorrendo a um vasto número de pontos

selecionados, cujas coordenadas tridimensionais são conhecidas num determinado sistema de coordenadas. Burrough e McDonnell (1998) definem MDE como sendo uma representação na forma matricial, sobre uma grelha regular, de modo a observar-se a variação contínua do relevo ao longo do espaço. Segundo o U. S. Geological Survey, um MDE é um Modelo de Elevação em grelha, sendo uma representação cartográfica digital da altitude do terreno em intervalos regularmente espaçados segundo as duas direções coordenadas planas X e Y , utilizando os valores de altitude (Z) referenciados a um Datum vertical comum (Aguilar et al., 2005).

Julga-se oportuno estabelecer nesta fase, a distinção entre os conceitos de MDE, Modelo Digital de Elevação (também designado por Modelo Digital de Altitude ou ainda Modelo Digital Altimétrico), MDT, Modelo Digital de Terreno e MDS, Modelo Digital de Superfície. O termo MDE tem sido vastamente utilizado em literatura como um descritor genérico para representações espaciais digitais de altitude (Tapas et al., 2010). Considera-se que um MDE é um conjunto de dados em formato de grelha (ou matricial), apropriados para serem processados em ambiente de SIG. Os MDEs encontram-se estruturados em formato de grelha ou matriz, onde cada célula ou *pixel* dessa matriz possui um valor do atributo elevação ou altitude.

A estrutura de armazenamento de informação em grelha permite utilizar métodos simples de visualização que possibilitam observar de forma aproximada as linhas de água e o relevo, bem como, a sua variabilidade ao longo da área de interesse. A Figura 3 mostra um exemplo de um MDE (SRTM com 90 m de resolução espacial) de uma zona que engloba uma área da região centro e uma área da região norte de Portugal. Estes dados de elevação foram obtidos a partir de imagens de satélite, adquiridas a partir de tecnologia InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar), que recorre a ondas/sinais de Radar.

Um MDT refere-se normalmente à superfície física da Terra, ou seja, representa a altimetria da superfície terrestre sem os objetos aí localizados, como, por exemplo, vegetação, edifícios, etc. (e.g. Varga e Bašić, 2015). Já os MDS (Figura 4) descrevem altimetricamente a superfície terrestre, onde se incluem os objetos aí localizados, como por exemplo, vegetação, construções, infraestruturas, entre outros, apresentando apenas a

altimetria do terreno em áreas onde existe pouca ou nenhuma cobertura do solo (Maune, 2007, Tapas et al., 2010).

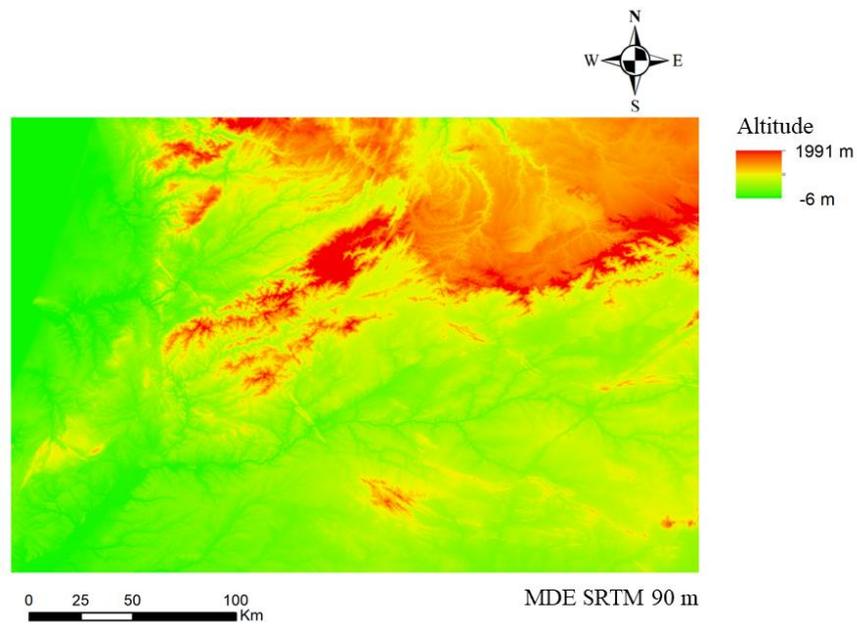


Figura 3: MDE SRTM (90 m de resolução) referente a uma zona que inclui uma região de Portugal.



Figura 4: Modelo Digital de Superfície obtido a partir de dados LiDAR. (Fonte: ESRI).

No Modelo Digital de Superfície apresentado na Figura 4 pode identificar-se o leito de um rio, zonas adjacentes ao rio com alguma vegetação e também algumas construções. Para se obter o Modelo Digital do Terreno a partir do MDS deverão ser utilizados métodos por forma a remover a altura da vegetação, de construções e de outros objetos localizados à superfície da Terra, de modo a obter-se a modelação da parte física da Terra.

Na presente tese iremos utilizar genericamente o termo MDE, na medida em que todos os modelos utilizados estão em formato matricial (*raster*).

Os dados necessários à construção de um MDE podem ser adquiridos por diversas técnicas permitindo obter diferentes tipos de dados, diferentes distribuições espaciais e naturalmente possuindo diferente exatidão. Muitas vezes, na construção dos MDEs, para além dos pontos adquiridos, podem ser necessários pontos adicionais de forma a permitir uma melhor definição da superfície topográfica. Como exemplo, pode referir-se o caso das bacias hidrográficas, onde, pontos levantados ao longo das linhas de água e em linhas de crista (ou linhas de cumeada) permitirão uma melhor definição da superfície topográfica.

Na seção 2.3.1 descrevem-se diferentes técnicas de aquisição de dados para a construção dos MDEs, em particular os que foram utilizados na presente tese, os MDEGs ASTER com 30 m de resolução espacial e o MDE SRTM nas versões de 90 e 30 m de resolução espacial. Para além da descrição das técnicas de recolha de dados, são referidas as limitações e potencialidades de cada uma.

2.3.1 Técnicas de aquisição de dados

Nas últimas décadas assistiu-se a uma significativa evolução nas técnicas de aquisição de dados geoespaciais. Para isso contribuiu o GNSS, os sistemas de varrimento a laser terrestre e aéreo (LiDAR - Light Detection And Ranging), imagens de satélite, nomeadamente as adquiridas por tecnologia de Radar (RADIO Detection And Ranging), a partir das quais se gerou por exemplo, o SRTM, um dos MDEGs utilizados no âmbito da presente tese. A modelação digital do terreno usufruiu por isso deste avanço técnico e científico, na medida em que proporcionou a disponibilidade de mais informação altimétrica que poderá ser utilizada em diversos estudos e análises realizados sobre os modelos (MDEs) onde a componente altimétrica (altitude) serve de base.

Levantamentos topográficos

Uma das formas de obter os dados necessários à modelação digital do terreno é através de levantamentos topográficos executados diretamente sobre o terreno, recorrendo a níveis e/ou estações totais e aplicados em estudos cuja área seja de pequena dimensão (Wilson e Gallant, 2000a). Por outro lado, o GNSS (Jacobsen, 2003, Heywood et al., 2006, Li et al., 2010) permite que recetores operem sobre a superfície terrestre na recolha de dados relativos à posição tridimensional de pontos aí localizados. A posição tridimensional de um qualquer ponto P à superfície terrestre é obtida a partir da captação dos sinais dos satélites da constelação GNSS. No entanto, a utilização do GNSS tem limitações por exemplo, em zonas de vegetação pode não ser possível captar os sinais enviados pelos satélites, em zonas junto a estruturas construtivas e edificadas, os sinais enviados pelos satélites sofrem do efeito multi-trajeto, o que influencia a exatidão obtida no posicionamento dos pontos. De referir também que, em zonas fechadas tais como túneis ou viadutos, não é possível receber os sinais enviados pela constelação de satélites, pelo que não é possível utilizar o GNSS.

Uma outra fonte de dados que pode ser usada na geração de MDEs são as curvas de nível e pontos cotados digitalizados sobre mapas topográficos já existentes (Gonçalves et al., 2002, Narender e Rao, 2006, Kang et al., 2008, Li e Wong, 2010). Esta fonte de dados permite recriar modelos digitais de terreno relativos a períodos temporais passados que poderão ser úteis para determinado tipo de estudos. Comparando esta fonte com outras fontes de dados (e.g. Fotogrametria e LiDAR aéreo), as curvas de nível (se disponíveis) são uma opção mais barata, tanto mais que em muitos países esta forma de representação de altimetria cobre todo território a diferentes escalas (Ardiansyah e Yokoyama, 2002).

Fotogrametria

De acordo com ASPRS (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing) (1966), a Fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia que permite obter informação a respeito de objetos e fenómenos do meio ambiente através do registo, medição e interpretação de imagens fotográficas. O recurso à utilização da Fotogrametria no passado foi de algum modo condicionada pelo grande volume de dados adquiridos, assim como, pelo moroso processamento necessário à obtenção da alta precisão. A era digital tornou os

processos fotogramétricos mais rápidos e isso foi devido não apenas à evolução dos sensores, mas também aos algoritmos embudidos em *software* de processamento, permitindo melhorar os processos de correlação entre as imagens. A Fotogrametria foi durante algum tempo o método mais utilizado para obtenção de mapas topográficos de regiões de considerável extensão e constitui uma importante fonte de dados geográficos utilizados na modelação digital de terreno (e.g. San e Suzen, 2005, Höhle, 2009, Sharma e Gupta, 2014).

As fotografias poderão ser adquiridas a partir de vários tipos de plataformas, incluindo as localizadas na superfície terrestre (câmaras terrestres) no caso da Fotogrametria Terrestre, ou em plataformas aéreas, tais como aviões ou VANTs (Veículos Aéreos Não - Tripulados), entre outros e também a partir de sensores embarcados em satélites. Atualmente, com o aparecimento dos VANTs e das imagens de satélite, os dados adquiridos permitem cartografar a diferentes escalas, no caso dos VANTs a grandes escalas, já no caso da Deteção Remota a pequenas escalas.

A Fotogrametria permite obter informação altimétrica do terreno através do processamento de fotografias adquiridas a partir de determinadas posições, de modo que se consiga obter sobreposição ao longo das fiadas (sobreposição longitudinal) e entre fiadas (sobreposição lateral ou transversal) das coberturas realizadas. Estas especificações relativas à sobreposição são necessárias para que seja possível através de equipamento de estereoscopia, visualizar o relevo e o terreno fotografado.

As coberturas aéreas são definidas num plano de voo previamente preparado, onde é calculado o número de linhas de voo (fiadas) e o número total de fotografias por forma a obter, de acordo com as sobreposições longitudinal e lateral necessárias e com a escala pretendida, a cobertura fotográfica de toda a área de estudo. A Figura 5 ilustra as referidas sobreposições a cumprir durante o voo. Refira-se que previamente ao voo, deverão ser escolhidos e sinalizados no terreno os pontos fotogramétricos (PFs), que deverão ser coordenados diretamente no terreno. A escolha destes pontos deve ser feita de modo a que possam ser facilmente identificáveis nas fotografias e tenham uma distribuição regular ao longo das sucessivas fiadas. Os pontos fotogramétricos permitem estabelecer a relação precisa entre as fotografias e o terreno, sendo necessários para efetuar a triangulação aérea ou aerotriangulação.

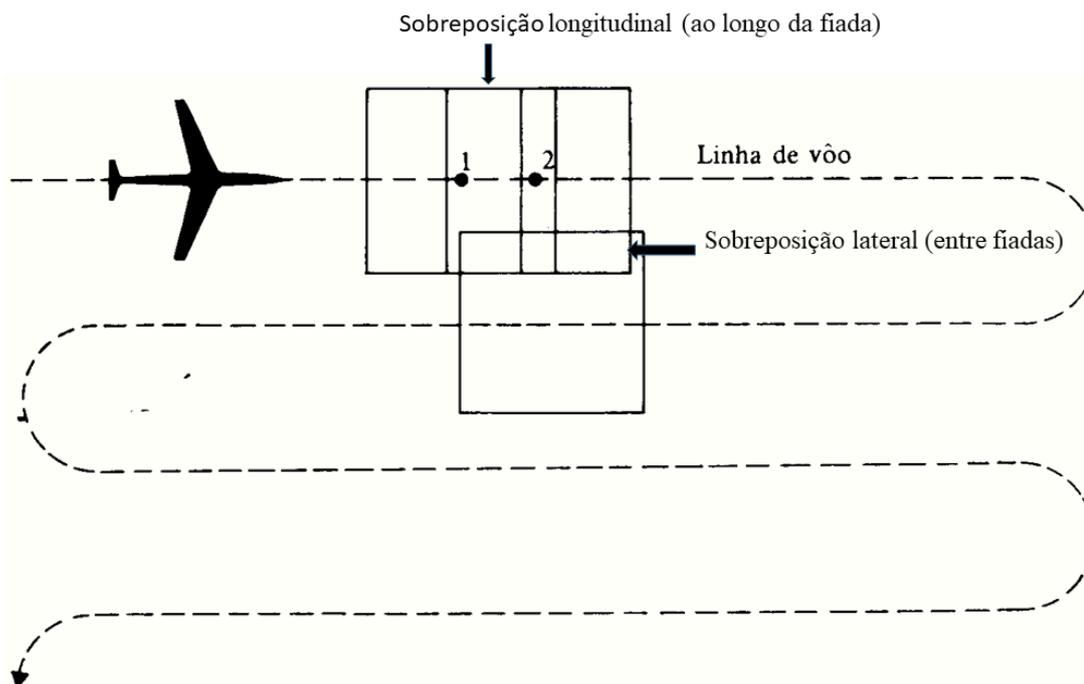


Figura 5: Sobreposição longitudinal e sobreposição transversal esquematizada sobre linhas de voo.

A determinação de coordenadas tridimensionais de pontos presentes nas fotografias baseia-se na correlação existente entre pontos homólogos (ou pontos conjugados) presentes num estereopar de fotografias, na geometria de perspetiva associada ao processo de aquisição da fotografia, na equação de colinearidade que resulta da condição que diz que um qualquer ponto objeto P , o respetivo ponto imagem (p) e o centro de projeção da câmara (C) estão sobre a mesma linha reta e baseia-se também nas propriedades dos sensores (Kraus, 2007).

Nas fotografias deverão ser marcados os pontos de apoio, estes pontos deverão ser bem identificáveis em mais do que uma fotografia e servem para realizar a concatenação das fotografias ou dos modelos de fotografias, bem como para realizar a ligação da cobertura fotográfica ao terreno fotografado. Os pontos de apoio dividem-se nos PFs, nos pontos de passagem (*passpoints*) e nos pontos de ligação (*tiepoints*). Os primeiros (PFs) como já foi anteriormente referido, deverão ser coordenados diretamente em campo. Os pontos de passagem e pontos de ligação são coordenados indiretamente em gabinete durante a execução do processo de aerotriangulação.

A aerotriangulação inclui o conjunto de algoritmos matemáticos e estatísticos que sustentados na geometria da fotografia, permitem determinar as coordenadas terreno ou coordenadas objeto de todos os pontos de apoio e realizar as orientações espaciais das fotografias ou dos modelos de todo o bloco fotográfico, utilizando as coordenadas terreno ou coordenadas objeto de apenas alguns PFs. Após a aerotriangulação é executada a estéreo-restituição da área coberta, onde é possível desenhar planimetria (linhas de água, redes de estradas, redes ferroviárias, etc.) e altimetria (curvas de nível e pontos cotados) que posteriormente, utilizando métodos de interpolação apropriados permitirão gerar o modelo da superfície topográfica (MDT). A exatidão do modelo está dependente de vários fatores, tais como, o efeito dos erros inerentes à aquisição das fotografias, o efeito da refração atmosférica, a exatidão na coordenação dos PFs, erros devidos à estéreo-restituição, erros relativos ao método de interpolação utilizado na construção da superfície topográfica, entre outros.

Esta fonte de dados é útil em particular em regiões relativamente extensas, permitindo que, após a execução das orientações espaciais das fotografias e dos modelos estereoscópios, se consiga obter as coordenadas tridimensionais dos pontos localizados na área de interesse, por forma a obter-se a modelação da superfície topográfica (e.g. Hu et al., 2016). A Fotogrametria aérea garante exatidão na geração de modelos digitais de superfície (MDS) e permite a extração de MDEs de elevada resolução, através de procedimentos automatizados que ocorrem sobre imagens adquiridas com determinada área de sobreposição comum (Fabris e Pesci, 2005).

Ainda no domínio da Fotogrametria os VANTs são outro tipo de plataforma, de baixo custo, leves e de fácil manuseamento que possibilitam a aquisição de dados, tendo-se assistido a um crescimento rápido na sua utilização. Este tipo de equipamento, tendo a capacidade de voar a baixas altitudes permite cartografar regiões do espaço físico com detalhe (e.g. Manfreda et al., 2018), assim como, recolher informação sobre os objetos aí localizados. Os produtos resultantes incluem as orto-imagens, MDEs, nuvens de pontos 3D que poderão servir de base para diversos tipos de aplicações, tais como, cartografia a grandes escalas para várias finalidades, como por exemplo, o Cadastro Predial (Volkman e Barnes, 2014, Maurice et al., 2015, Mumbone et al., 2015). Os VANTs permitem a recolha de dados tridimensionais que após o processamento permitem gerar os Modelos

Digitais de Superfície. Estes modelos representam tridimensionalmente a superfície terrestre com todos os objetos aí localizados, tais como, edifícios, vegetação, entre outros. Para se poder obter o Modelo Digital do Terreno terão que se aplicar algoritmos para extrair a altura desses objetos. Uma das limitações deste tipo de plataforma (VANTs) é a dificuldade em recolher dados em áreas extensas.

Um dos MDEs utilizados na presente tese foi o MDE ASTER que é obtido a partir de imagens adquiridas por sistemas óticos (telescópios) onde os processamentos realizados são os fotogramétricos. Por conseguinte, surgem problemas que afetam a qualidade deste tipo de dados altimétricos tais como, a presença de nuvens, existência de zonas aquáticas, tais como, lagos, provocando diversos artefactos (ASTER GDEM Validation Team 2009). A exatidão da altitude extraída do MDE ASTER depende por exemplo, da técnica e da geometria utilizada na recolha dos dados, da relação da base aérea com a altura de voo, mas também dos procedimentos utilizados na correlação das imagens.

Interferometria SAR

A tecnologia InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) permite adquirir dados de Radar (Radio Detection and Ranging) que são utilizados na construção de MDEs (Zhou et al., 2012, Elkhachy, 2018). O Radar de Abertura Sintética, em terminologia anglo-saxónica SAR (Synthetic Aperture Radar) é um sistema de aquisição de imagem que opera na região das micro-ondas, uma região da parte invisível do espectro eletromagnético. Este sistema possui a capacidade de penetrar nas nuvens. É um sistema ativo tendo por isso a capacidade de operar de dia e de noite. A tecnologia InSAR permite a aquisição de dados altimétricos recorrendo a ondas (sinais) de Radar.

A configuração InSAR permite efetuar medições precisas do percurso do sinal. Tal como os lasers o Radar tem comportamento coerente, ou seja, as ondas possuem a mesma frequência e direção, podendo-se por isso determinar a fase do sinal do Radar. Esta coerência pode ser temporal e espacial. Os Radares são semelhantes às ondas sonoras, pois as ondas emitidas pelos Radares transportam informação que ecoa em objetos distantes, sendo que, o atraso do tempo do eco permite medir a distância entre objeto e o sensor. As mudanças de mensagens do eco permitem determinar as características do objeto localizado no terreno.

A essência da geração de MDEs através da tecnologia InSAR reside na medição da fase e na conversão da fase para o parâmetro altitude (Zhou et al., 2012). É feita a medição da diferença de fase (ou fase interferométrica) entre duas ondas (ou sinais) SAR (Abdelfattah e Nicolas, 2002) adquiridas a partir de duas antenas (SAR_1 e SAR_2) localizadas em diferentes posições orbitais e/ou em diferentes instantes (Figura 6). A cada uma das antenas SAR chegam sinais de retorno com diferentes fases (ψ_1 e ψ_2) cuja diferença (θ) é medida, achando-se assim a fase interferométrica. Desta forma, θ representa o atraso verificado entre os dois sinais SAR, devido à diferença da distância percorrida por cada sinal (R_1 e R_2). Assim, a diferença de fase (θ) e as distâncias percorridas por cada sinal de retorno (R_1 e R_2) podem ser relacionadas.

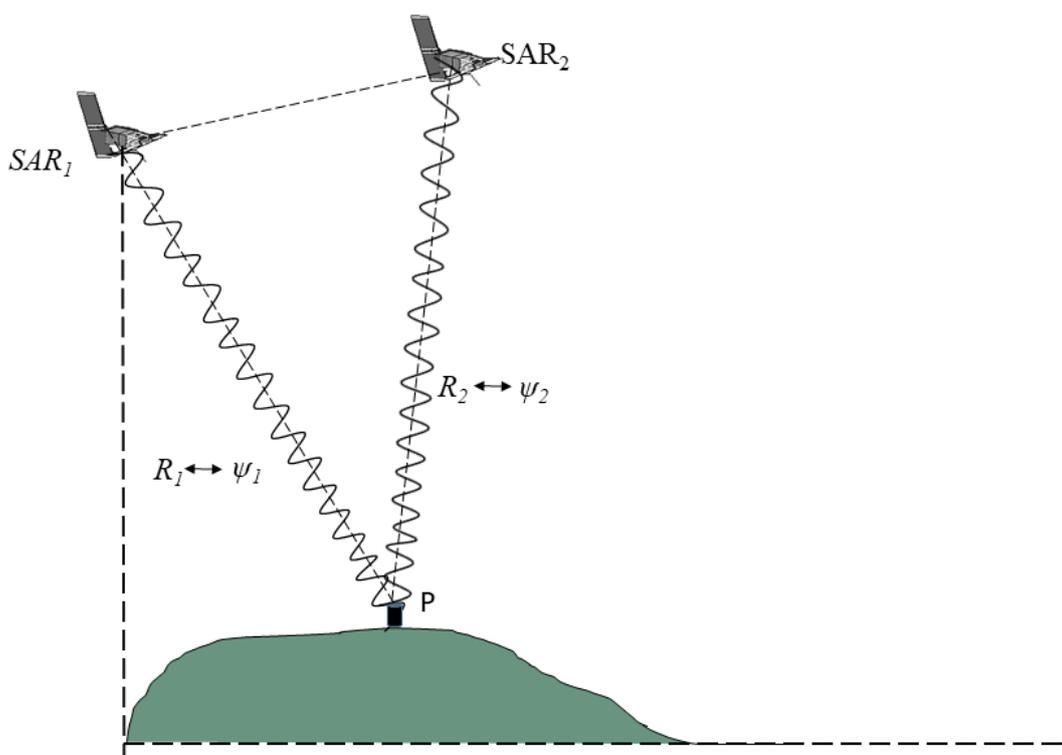


Figura 6: Princípio base da medição InSAR. (Fonte: Adaptado de Wang e Tian, 2018).

A variação da fase (θ) depende do comprimento da linha de base (distância entre as duas antenas). Considerando um ponto P no terreno, verifica-se que, linhas de base muito curtas detetam diferenças de fase muito pequenas. No caso oposto, se a linha de base for muito grande, a fase torna-se ruidosa e tal deve-se à impossibilidade de não se

conseguir a correlação espacial, devido às diferenças entre as geometrias na aquisição provenientes das duas antenas.

Quando é possível efetuar a correlação espacial das duas imagens, estas são combinadas e permitem gerar o interferograma (uma única imagem) que está na base da extração de informação altimétrica relativa à superfície terrestre, ou seja, na criação do MDE. Na Figura 7 são apresentados dois interferogramas da mesma região obtidos com linhas de base de diferente comprimento (45 e 162 metros).

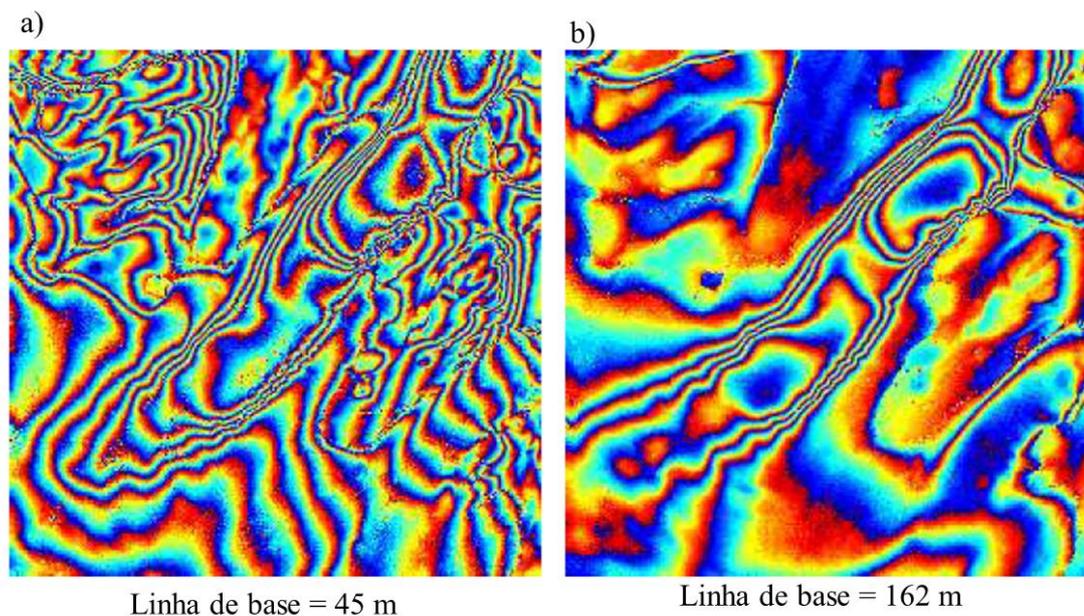


Figura 7: Interferogramas da mesma região: a) com linha de base de 45 m e b) com linha de base de 162 m. (Fonte: Nievinsky, 2004).

Para além da altitude topográfica (Z), a tecnologia InSAR permite também medir as características geomorfológicas do terreno, assim como determinadas alterações ocorridas na superfície terrestre, como por exemplo, alterações provocadas por terremotos, vulcões e outros fenómenos de natureza geofísica. Em termos históricos a tecnologia InSAR tem sido mais utilizada na medição da topografia do terreno (Zebker et al., 1994, Abdelfattah e Nicolas, 2002). O comprimento de onda (λ) dos sensores de Radar permitem registar informação que não é possível captar por sensores óticos, como por exemplo, a rugosidade da superfície topográfica e o teor de humidade dos solos (Rebelo, 2007).

Para além da capacidade de fornecer dados contínuos e em formato adequado à extração de características do terreno, o sistema InSAR possui ainda a vantagem de permitir a cobertura de vastas áreas da superfície terrestre, quando comparada com outros métodos, como por exemplo, os métodos topográficos convencionais, ou os levantamentos realizados a partir dos sistemas de posicionamento e navegação por satélite ou até os métodos fotogramétricos utilizando plataformas aéreas.

A qualidade dos MDEs gerados a partir da tecnologia InSAR depende de inúmeros fatores e está dependente dos erros que afetam a tecnologia. Estes erros têm origem na decorrelação que existe entre imagens SAR. Esta decorrelação manifesta-se sob a forma de ruído nos valores da fase do interferograma. A decorrelação global presente nas imagens SAR são resultado da composição de outras decorrelações: i) decorrelação geométrica que está relacionada com a geometria associada à aquisição das imagens; ii) decorrelação temporal que está relacionada com o intervalo de tempo entre a aquisição de duas imagens; iii) decorrelação térmica relacionada com o sensor de Radar e é avaliado segundo um coeficiente e iv) decorrelação introduzida pelo processamento das imagens (Ferretti et al., 1999, Hanssen, 2001).

A decorrelação é ainda influenciada pelos efeitos atmosféricos diferentes em cada imagem e também pela imprecisão das órbitas. Assim, o valor total da decorrelação é calculado a partir do produto de todos os fatores (Zebker e Villasenor, 1992). A decorrelação é registada pela imagem de coerência. Em zonas de vegetação e de água a não coerência entre imagens aumenta. De referir também que, zonas com declives acentuados causam efeitos geométricos de sombra que provocam decorrelação geométrica.

Diversos estudos têm sido publicados para atenuar o efeito do ruído presente nos MDEs derivados da tecnologia InSAR, como é o caso do SRTM. Stevenson et al. (2010) desenvolveu um algoritmo que elimina o ruído de objetos tridimensionais, preservando a sua nitidez. Quando se elimina o ruído o objetivo é fazê-lo sem a suavização excessiva dos dados.

Outro problema inerente à tecnologia InSAR é que o sinal não penetra na vegetação. O'Loughlin et al. (2016) desenvolveu uma metodologia para criar um MDEG do terreno

eliminando a distorção devida à vegetação. O método combina múltiplos conjuntos de dados de Detecção Remota, incluindo também pontos de controlo vertical obtidos por um altímetro a laser da NASA e bases de dados com informação sobre a percentagem de árvores existentes no terreno obtidas a partir do satélite MODIS. Apesar do algoritmo remover o efeito da vegetação ele não remove o efeito das construções existentes na superfície topográfica. A remoção do ruído é de essencial importância, por isso os dados SRTM são filtrados antes de serem disponibilizados ao público (Smith e Sandwell, 2003).

Varrimento a Laser

No âmbito da Detecção Remota, outras tecnologias têm vindo a ser aplicadas, nomeadamente a tecnologia de varrimento a laser, também referida como LiDAR (Jacobsen, 2003, Li et al., 2010). A medição da distância do sensor ao objeto baseia-se na metade do tempo gasto pelo pulso de laser entre a sua emissão e receção (Baltasvias, 1999). O sistema LiDAR tem a particularidade de recolher elevadas quantidades de dados sob a forma de nuvem de pontos com as coordenadas tridimensionais associadas. Os dados adquiridos em bruto por este sistema são processados a fim de efetuar a remoção de *outliers* (Sun et al., 2018), permitindo posteriormente gerar o MDS. A partir dos MDS é possível a criação de MDEs precisos e de alta resolução (Tarolli, 2014), realizando processamentos que permitem remover a altura dos edifícios e da vegetação criando o Modelo Digital do Terreno, representando a parte física da Terra.

Desde meados dos anos noventa do século XX que o LiDAR topográfico tem dado um relevante contributo aos profissionais da Cartografia e da Topografia, permitindo obter informação de natureza espacial de forma célere. No caso do LiDAR aéreo em áreas extensas, os levantamentos são normalmente concebidos por forma a obter-se uma densa e uniforme distribuição de pontos (Bater e Coops, 2009). No entanto, o LiDAR tem também sido aplicado em outras disciplinas, incluindo a arqueologia, geologia estrutural, geomorfologia, engenharia, gestão de recursos hídricos, planeamento da resposta e avaliação de desastres naturais. A identificação de objetos obtida a partir dos dados LiDAR (e.g. construções, vegetação, etc.) pode ser útil em estudos hidrológicos, como por exemplo, na gestão e monitorização de bacias hidrográficas urbanas, na definição de áreas de risco de inundação, entre outros. Estes objetos promovem ou inibem a infiltração da

água no solo influenciando o escoamento superficial e os processos de transporte a ele associados.

Uma vantagem dos MDEs obtidos a partir do sistema LiDAR de alta resolução é que eles podem conter informação sobre objetos antropogénicos de pequena escala, tais como, valetas e valas e que podem ser incorporadas nos modelos hidrológicos, com o intuito de melhorar a suas previsões (Lidberg et al., 2017).

2.3.2 Estrutura de dados

Quando se aborda o assunto da modelação digital do terreno importa considerar as estruturas de dados que podem ser utilizadas, pois, consoante a tipologia da aplicação, a estrutura adequada pode ser diferente. Os dados obtidos a partir das diferentes técnicas de aquisição descritas na seção 2.3.1 podem ser organizados ou estruturados em formas distintas, uma delas é a estrutura vetorial outra é a estrutura matricial ou *raster*.

O modelo de dados vetorial usa um conjunto de coordenadas tridimensionais e atributos associados a pontos distribuídos espacialmente, efetuando a representação dos objetos a partir de pontos, linhas e polígonos (ou áreas). Um exemplo da estrutura vetorial é a de rede irregular de triângulos, habitualmente designada por TIN (Triangulated Irregular Network). A TIN recorre a amostras irregulares de pontos da superfície terrestre, tais como picos, linhas de crista, linhas de quebra de declive, ou seja, pontos localizados em zonas onde há variabilidade no declive. Os pontos são armazenados através das suas coordenadas tridimensionais (Mark, 1975, Puecker et al., 1978). Para além desses pontos, devem também acrescentar-se outros dados auxiliares, tais como, informação complementar às curvas de nível, por exemplo, pontos cotados relativos a cumes, fundos, colos, etc., linhas relativas a infraestruturas com valores de altitude, como por exemplo, vias de comunicação, linhas naturais como linhas de cumeada, linhas de rotura, como a rede hidrográfica, ou ainda zonas de neve ou zonas inundadas, zonas de altitude constante (aterros) e também limites da zona de interesse a estudar. Neste tipo de estrutura, a área elementar é o plano que é definido por três pontos adjacentes na rede, o que constitui a face ou a aresta do triângulo da rede TIN.

As redes TIN ao permitirem incorporar linhas de quebra, linhas de falha e linhas de água, ajustam-se melhor às variações do terreno possibilitando também uma melhor representação da descontinuidade do terreno, aproximando o modelo da realidade. A densidade dos triângulos pode ser adaptada de forma a se ajustar à rugosidade do terreno o que constitui uma estrutura eficiente (Puecker et al., 1978). Isto quer dizer que, em terrenos de maior rugosidade é conveniente modelar de forma mais ajustada essa irregularidade e por isso tenham que se definir mais triângulos para permitir um melhor ajustamento à forma real do terreno. A situação oposta acontece em terrenos mais planos. A Figura 8 mostra um exemplo de uma TIN gerada para uma região inserida na bacia hidrográfica do rio Mondego, na região de Gouveia, distrito da Guarda, Portugal. A TIN foi gerada a partir de uma amostra com distribuição irregular de pontos cotados que foram extraídos do MDE global ASTER de 30 metros de resolução espacial.

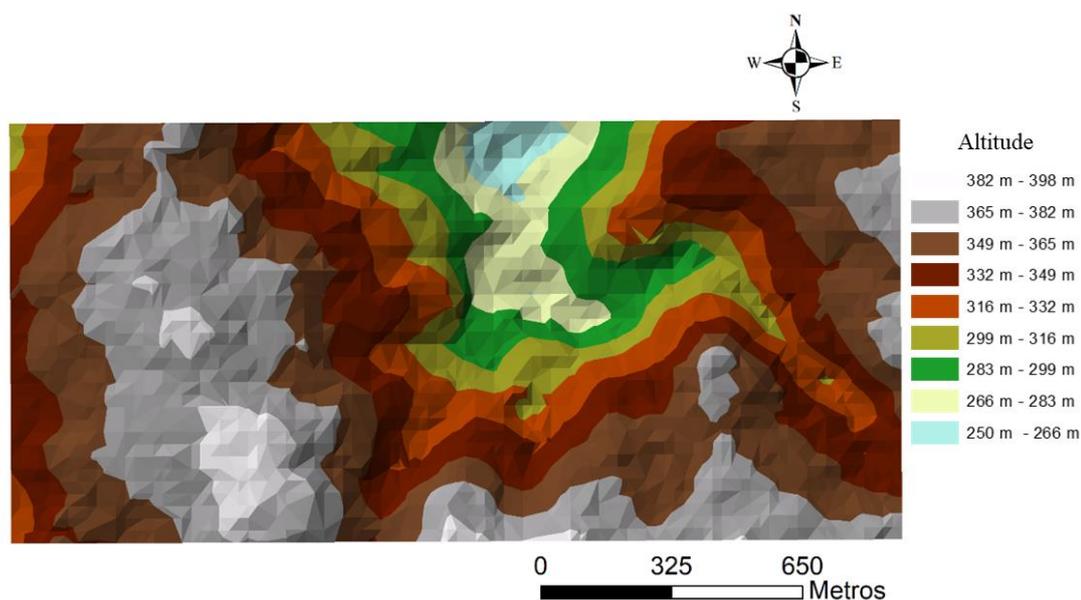


Figura 8: Exemplo de uma TIN gerada a partir de uma amostra irregular de pontos cotados extraídos de um MDE (ASTER 30 m).

Outra forma de estruturar os dados é a forma *raster* ou matricial onde a informação é organizada numa matriz de células e onde cada célula tem o atributo altitude (Z). Este tipo de estrutura permite um fácil armazenamento, pois é utilizada uma matriz para armazenar o valor da altitude de cada ponto (Z), dispensando o armazenamento das coordenadas planas (X, Y) que estão implícitas na posição (i, j) do elemento da matriz, e por esta razão,

este processo de armazenamento ocupa menos memória computacional. Este método tem a vantagem da definição implícita da topologia do ponto, permitindo um armazenamento relativamente compacto (Alias e Rahman, 1994, John e John, 2000, Li et al., 2005). O método matricial é um tipo de estrutura de dados muito utilizado na produção de MDEs, pois, é computacionalmente mais eficiente e de mais fácil implementação (Collins e Moon, 1981). No entanto, também apresenta algumas desvantagens, por exemplo, não consegue incorporar as mudanças abruptas de elevação, para além disso, a sua resolução espacial afeta os resultados obtidos, bem como a eficiência computacional (Panuska et al., 1991). As grelhas regulares também devem ser ajustadas à rugosidade e complexidade da superfície terrestre, podendo gerar redundância de dados em secções de terreno com suavidade (Puecker et al., 1978), o que não acontece com as redes irregulares de triângulos (TIN). Refira-se que, os MDEGs ASTER e SRTM abordados na tese possuem esta forma de estruturação dos dados em grelha. A Figura 9 apresenta o conceito subjacente a um MDE do tipo grelha.

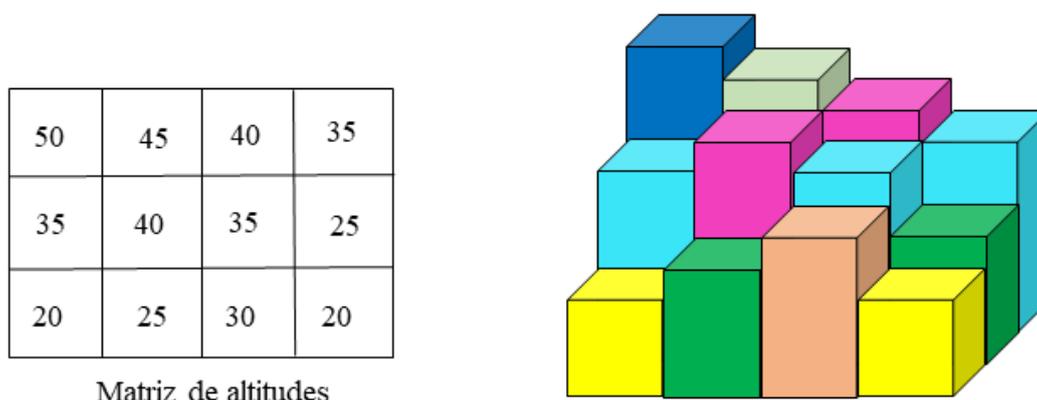


Figura 9: MDE do tipo grelha ou matricial.

2.3.3 Métodos de interpolação

A modelação digital do terreno requer a utilização de métodos de interpolação para determinar o valor da altitude de um ponto, a partir de pontos com altitude conhecida localizados na sua vizinhança. As curvas de nível em conjunto com os pontos cotados podem também ser interpolados para gerar a superfície topográfica (MDE). As curvas de

nível podem ser obtidas através de processos de digitalização realizados sobre mapas topográficos.

A magnitude e distribuição dos erros num MDE está fortemente relacionada com o método de interpolação utilizado (e.g. Erdogan, 2009) para a sua criação. Muitas vezes não é evidente qual o método mais apropriado para uma aplicação concreta. Na verdade, pode dizer-se que não existe um método de interpolação que seja o melhor sob quaisquer circunstâncias. O que acontece é que há interpoladores que possuem um melhor desempenho que outros para determinadas circunstâncias. Um interpolador poderá ser considerado o melhor, para uma dada densidade de dados, para uma dada resolução espacial, ou até de acordo com determinadas características do terreno, pois, o desempenho do método de interpolação depende de todas essas variáveis. As técnicas de interpolação são baseadas nos princípios de correlação espacial que considera que pontos mais próximos apresentam características mais similares em relação a pontos distantes.

Existem diversos métodos de interpolação habitualmente utilizados na modelação digital do terreno e referenciados em literatura tais como, o do Vizinho Natural (VN), o da Ponderação com o Inverso da Distância (PID), em terminologia anglo-saxónica IDW (Inverse Distance Weighted), Spline ou Kriging (Burrough e McDonnell, 1998, Hutchinson, 1998).

De um modo geral os métodos de interpolação podem ser classificados em duas categorias, os métodos determinísticos e os métodos estocásticos (e.g. Li e Heap, 2014). Os métodos estocásticos integrando o conceito de aleatoriedade, fornecem estimativas e informações associadas à incerteza. Estes métodos também conhecidos como geoestatísticos são baseados nas propriedades estatísticas dos dados. O Kriging é um exemplo deste tipo de interpoladores. Já os métodos de interpolação determinísticos ou não geoestatísticos permitem criar superfícies a partir de pontos de altitude conhecida (pontos cotados) (Li e Heap, 2008). Estes métodos são em geral mais simples e de mais fácil aplicação. Exemplos deste tipo de interpoladores são o da PID e o método de Spline.

Uma outra classificação dos interpoladores é a que os distingue em interpoladores locais e interpoladores globais. Os métodos locais operam em zonas inseridas na área global, já os interpoladores globais usam todos os pontos disponíveis na amostra de modo a gerarem valores estimados para toda a área de estudo (Burrough e McDonnell, 1998,

Johnston et al., 2001). Exemplos de interpoladores locais são o da PID, o interpolador Vizinho Natural, sendo o ANUDEM um interpolador adaptativo local (Pavlova, 2017), pelo facto de estar otimizado para ter a eficiência computacional dos métodos de interpolação locais. Os interpoladores Kriging e Spline são classificados como globais, embora também possam existir Splines segmentados que operam como interpoladores locais.

O interpolador Vizinho Natural (Sibson, 1981, Sukumar et al., 2001) é um método de interpolação usado principalmente em amostras de dados distribuídas de forma irregular e que permite através do conceito de vizinhança em torno de um dado ponto, construir a superfície topográfica. A ideia base consiste na capacidade de ligar um dado ponto a outros pontos de uma amostra, estando estes próximos do referido ponto, conseguindo-se ao mesmo tempo distribuir os pontos da amostra em torno do ponto considerado. Por vezes, este método apresenta melhor desempenho relativamente a outras técnicas de interpolação habitualmente utilizadas (Tily e Brace, 2006).

O método de interpolação da PID (Burrough e McDonnell, 1998, Hutchinson, 1998) é um método de interpolação determinística local, sendo um dos mais utilizados para dados dispersos. Este método baseia-se na ideia de que as coisas que estão mais próximas são mais semelhantes em relação às que estão distantes. O método da PID usa os valores medidos em torno do valor previsto, atribuindo aos valores medidos mais próximos uma maior influência contrariamente ao que sucede com os valores mais distantes em que atribui uma menor influência. Esta técnica atribui aos pontos da amostra um peso cujo valor é inversamente proporcional à distância ao ponto a calcular.

Outro método de interpolação é o Kriging (Goovaerts, 2000, Loyd, 2005), que é um procedimento geoestatístico avançado que gera uma superfície estimada a partir de um conjunto disperso de pontos com valores de altitude (Z). Este método utiliza o conceito de semivariograma (Figura 10) o qual depende da distribuição espacial dos dados da amostra e reflete as características espaciais do fenómeno em estudo, no caso da modelação do terreno, o fenómeno é a altitude. O método assume que a distância entre os pontos reflete a correlação espacial e pode ser usada para explicar a variação da superfície. O método ajusta uma função matemática a um número específico de pontos ou a todos os pontos

localizados dentro de um dado raio, tendo como objetivo determinar o valor de saída (valor previsto) de cada localização.

A Figura 10 representa um variograma, que é um gráfico da semivariância em função da distância, sendo a semivariância uma medida do grau de dependência entre cada dois pontos da amostra. Assim, pode-se interpretar que, a partir de uma certa distância (limiar) a correlação deixa de existir e as observações podem ser consideradas independentes, o que equivale a dizer que a partir dessa distância deixa de haver auto-correlação espacial, ou seja, deixa de haver relação entre os pontos devido à distância entre eles.

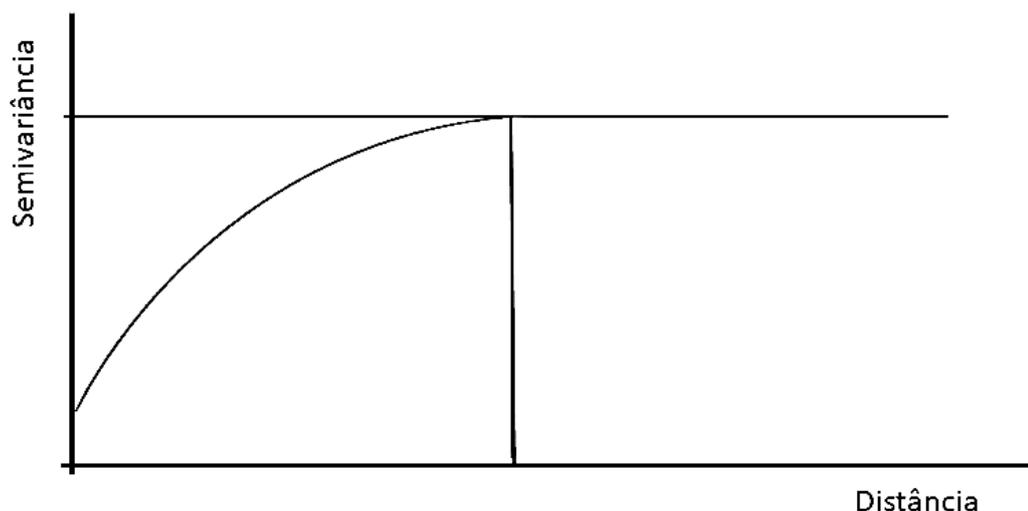


Figura 10: Semivariograma.

O método de kriging é um processo que se divide em múltiplos passos: i) análise estatística exploratória dos dados; ii) modelação do variograma; iii) criação da superfície; e iv) opcionalmente explora a variância da superfície (Royle et al., 1981, Oliver, 1990).

O método de Spline (Hutchinson, 1998) recorre a um polinómio de uma determinada ordem (por exemplo, primeira, segunda ou terceira ordem) que melhor se ajusta aos dados e de forma suavizada, minimizando a curvatura da superfície. O método utiliza uma função matemática que permite minimizar a curvatura da superfície, ou seja, tem o intuito de suavizar a superfície que passa exatamente pelos pontos da amostra (e.g. Szypula, 2016). No entanto, a execução do método cria um número significativo de artefactos. Os interpoladores Spline podem ser globais, ou sejam, operam sobre toda a área de estudo, ou

podem ser Splines segmentados, ou seja, que se aplicam a zonas individuais e contíguas, logo operam como interpoladores locais.

Um outro método de interpolação mais indicado para a construção de MDEs para processamento hidrológico é o método ANUDEM - Australian National University Digital Elevation Model (Hutchinson et al., 2011). Este método de interpolação foi utilizado no âmbito da presente tese na criação/geração dos MDEs transformados. Na base do método está o trabalho desenvolvido por Hutchinson (1989) onde apresenta uma abordagem de interpolação de dados do terreno que evidenciam a natureza especial das superfícies do terreno, considerando pontos específicos, tais como, pontos das linhas de cumeeira, linhas de água, entre outros. Estes pontos são relevantes para produzir superfícies que evidenciem as características hidrológicas da região interpolada. O método utiliza uma técnica especificamente idealizada para criar uma superfície que se aproxime o mais possível da superfície de drenagem natural preservando as linhas de cumeeira e as linhas de água (Hutchinson, 1989). O algoritmo inclui a restrição que impõe a condição de drenagem. Esta restrição remove todos os poços ou depressões do MDE que não tenham sido identificados à partida como depressões, assumindo que todas essas depressões não identificadas à partida e que ainda surgem no MDE, são erros e por isso deverão ser removidos, sustentado pelo pressuposto de que as depressões são raras nas paisagens naturais (Goodchild e Mark, 1987).

O interpolador ANUDEM permite processar vários e diferentes tipos de dados de entrada (*input*) e de dimensão variável. As entidades geográficas que poderão servir como dados de entrada para o método são: i) pontos cotados; ii) pontos de depressões; iii) linhas de água; iv) polígonos fronteiros ou polígonos limite; v) curvas de nível; vi) fronteira ou limite de lagos; vii) linhas de penhascos e viii) polígonos máscara de dados.

O método interpola valores de cota (pontos cotados) e impõe restrições de modo a assegurar a conectividade da rede de drenagem. Toda rede de drenagem usada no processo de interpolação deverá estar devidamente orientada de montante para jusante em todos os seus segmentos. O procedimento foi desenvolvido para tirar vantagem dos dados de entrada (*input*) normalmente disponíveis, mas também das características conhecidas das superfícies de elevação. O método utiliza a técnica de interpolação das diferenças finitas iterativas, estando otimizado para ter a eficiência computacional dos métodos de

interpolação locais, tais como, o método da Ponderação com o Inverso da Distância, sem perder a valência de continuidade da superfície inerente aos métodos de interpolação globais como os métodos de Kriging e Spline. O método impõe restrições no processo de interpolação, de modo a obter-se uma rede hidrográfica gerada com uma correta representação das linhas de crista e das linhas de escoamento. Estas imposições nas condições de drenagem permitem produzir superfícies de maior exatidão.

A metodologia desenvolvida por Hutchinson (1989) é semelhante à desenvolvida por (Gonçalves et al., 2002), este último método permite incluir outro tipo de informação topológica extraída automaticamente de uma representação altimétrica e que são as curvas de nível. O método desenvolvido usa uma grelha elástica que se ajusta às curvas de nível, com o objetivo de produzir uma superfície com curvas de nível intermédias e mais próximas entre si que as curvas de nível iniciais, ajustando assim a referida grelha às linhas morfológicas do terreno, as linhas de cumeeira e as linhas de água.

A metodologia desenvolvida na presente tese aplicou o método de interpolação ANUDEM, pois os dados disponíveis eram compatíveis com os dados de entrada do método (pontos cotados e linhas de água do OSM), para além disso, o âmbito da aplicação destinava-se a fins hidrológicos, razões que permitiram direcionar a escolha para este método de interpolação. O interpolador ANUDEM os métodos Vizinho Natural e o Kriging têm sido vastamente utilizados para extrair dados de MDEs obtidos a partir da Deteção Remota (e.g. Loyd e Atkinson, 2006, Bater e Coops, 2009).

2.3.4 Modelos Digitais de Elevação Globais

Os MDEGs obtidos através das missões Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) e Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) são também utilizados para obter dados úteis para a Hidrologia. Os primeiros são disponibilizados para todo mundo pelo Jet Propulsion Laboratory (JPL), da NASA (National Aeronautic Spatial Administration). Os dados ASTER são da responsabilidade de uma parceria entre a NASA, o Ministério de Economia, Comércio e Indústria (METI) do Japão e do Japan Space Systems (JSS).

Os MDEGs SRTM disponíveis têm resoluções espaciais de 90 e 30 m (Farr e Kobrick, 2000) e o MDEG ASTER tem uma resolução espacial de 30 m (Frey e Paul, 2012). O SRTM possui um erro vertical global de ± 16 m (e.g. Rabus et al., 2003, Miliareisis e Paraschou, 2005) e um erro horizontal global de ± 20 m. Estes MDEGs (ASTER e SRTM) são de livre acesso e disponibilizados gratuitamente. A aquisição dos dados SRTM teve início a 11 de fevereiro do ano 2000, onde durante dez dias o Space Shuttle Endeavour teve a missão de obter a cobertura de dados altimétricos para quase toda a superfície terrestre. Os radares embarcados permitiram efetuar a mais completa cobertura de dados de quase toda a superfície da Terra.

A cobertura terrestre do MDE SRTM está compreendida entre as latitudes de 56° Sul e 60,25° Norte, enquanto a cobertura do MDE ASTER vai de 83° Sul a 83° Norte (Jacobsen e Passini, 2010). Todavia, as técnicas de aquisição destes MDEGs são distintas. Os dados ASTER são obtidos a partir de imagens de satélite adquiridas por três sub-sistemas óticos, VNIR (Visible Near Infrared), SWIR (Shortwave Infrared) e TIR (Thermal Infrared), aplicando-se neste caso os métodos fotogramétricos às imagens adquiridas com cobertura estereoscópica. Já no caso do sistema SRTM, os dados são adquiridos por tecnologia InSAR (Hanssen, 2001) que recorre a duas antenas de Radar, banda C e banda X para construção do interferograma (assunto abordado na seção 2.3.1). Os MDEGs ASTER e SRTM estão georreferenciados em relação ao Datum geodésico WGS 84 (World Geodetic System - 1984) e no Datum vertical EGM 96 (Earth Gravitational Model - 1996). Os MDEGs estão disponíveis no formato de grelha ou formato matricial onde cada célula da grelha ou matriz possui o atributo altitude. A versão original do SRTM foi sujeita a um número de etapas de processamento de modo a permitir a construção de uma superfície global de elevação que se aproximasse o mais possível da superfície topográfica.

Uma das limitações presentes nos dados SRTM é o aparecimento de áreas sem valor de altitude, designados de vazios (*voids*) que correspondem a células sem dados (de altitude). O aparecimento destes vazios é devido a problemas de reflexão dos sinais de Radar em corpos de água ou em vertentes (Farr e Kobrick, 2000, Farr et al., 2007). Várias técnicas têm sido desenvolvidas para resolver o problema dos vazios através da substituição dos valores de altitude por outros dados, ou seja, o que se designa de técnicas

de reamostragem (Dowding et al., 2004, Grohman et al., 2006, Luedeling et al., 2007). A versão 3 do SRTM utilizada no estudo de caso 3 da tese inclui já este tipo de correções.

O SRTM é frequentemente utilizado nos estudos geomorfológicos, todavia, estes dados possuem ruído (Maire et al., 2003) o qual pode baixar significativamente a qualidade das análises geomorfológicas sobre ele realizadas (Stevenson et al., 2010). O ruído é propagado para os produtos derivados do MDE, como por exemplo, o declive (Holmes et al., 2000), a área da bacia (Wechsler e Kroll, 2006) e canais de drenagem (Hancock e Evans, 2006). Sun et al. (2007) desenvolveu um algoritmo para remover o ruído não correlacionado espacialmente em malhas de superfícies 3D. Uma abordagem desenvolvida por Wendi et al. (2016) que permite melhorar a exatidão do MDE SRTM recorrendo a redes neuronais e imagens multiespectrais, foi testada em áreas florestais na região de Singapura. Grohman (2015) analisou as diferenças entre os parâmetros de declive e de exposição derivados de um MDE (SRTM versão 4) reamostrado e os mesmos parâmetros extraídos de um MDE de resolução média. O estudo foi aplicado em três áreas de estudo na América do Sul. O SRTM V4 que serviu de base ao estudo foi reamostrado aplicando um método de interpolação bilinear.

Para além do ruído aleatório inerente ao MDE SRTM já mencionado, existe também o problema devido ao fato de a onda Radar da banda C não penetrar na vegetação, tendo que se corrigir este desvio (distorção). Alguns autores analisaram a importância do erro da vegetação no SRTM em algumas regiões, por exemplo, Schumann et al. (2014) verificaram que a exatidão aumentou de 25% para 94% com a modelação da extensão de área inundada numa região da Amazônia (Brasil). Carabajal e Harding (2005) utilizando um altímetro a laser (em satélite) validaram as altitudes do SRTM e concluíram que os erros no SRTM aumentam com o aumento da cobertura das árvores (copa). No domínio da modelação hidrológica, os erros devidos à vegetação têm sido ignorados com exceção em áreas com intensa vegetação, como por exemplo, a região da Amazônia (De Ruyver, 2004, Pinel et al., 2015).

Apesar das limitações apresentadas, pode afirmar-se que os diversos estudos realizados em diferentes regiões do mundo utilizando dados altimétricos SRTM, têm ido ao encontro da exatidão necessária para as aplicações hidrológicas (e.g. Zandbergen, 2008, Mendes, 2010, Sharma e Tiwari, 2014).

Os dados ASTER são também de livre acesso sendo obtidos a partir de sistemas óticos e de métodos fotogramétricos onde são utilizados pares estereoscópios de imagens e métodos de correlação. Pelo facto das imagens ASTER serem obtidas por sensores óticos, elas são afetadas pelo efeito das nuvens o que não acontece com as imagens SRTM. As imagens ASTER apresentam artefactos, tais como, algumas anomalias devido ao efeito das nuvens, elevações íngremes no limite da área coberta e também ruído associado aos corpos de água localizados no interior da imagem. Os algoritmos de aplicação de máscaras a esses corpos de água permitem tornar essas regiões perfeitamente planas (Tachikawa et al., 2011). Com a versão 2 (GDEM 2, usada nesta tese) houve uma melhoria na cobertura e resolução espacial, exatidão horizontal, assim como, na aplicação de máscaras nas zonas de água. De referir também, a inclusão de novos dados ASTER para complementar os vazios e artefactos (NASA JPL, 2011). Todavia, apesar de todo este aperfeiçoamento, continuam a aparecer alguns artefactos, sob a forma de declives abruptos e depressões, que podem produzir grande erro em termos de altitude em escalas locais (Arefi e Reinartz, 2011).

Os MDEGs SRTM e ASTER são utilizados no desenvolvimento de novos estudos e novas metodologias, nomeadamente a sua integração com outras fontes de dados, visando a melhoria da sua exatidão e da exatidão da informação deles derivada. Os MDEGs, estando disponíveis gratuitamente e possuindo uma cobertura quase global da superfície da Terra, possibilitam um maior nível de exploração por parte da comunidade científica possibilitando o desenvolvimento de um grande volume de aplicações em termos científicos, permitindo realizar análises aplicadas a diversos domínios no estudo e resolução de problemas.

2.3.5 Avaliação da qualidade da Informação Geográfica

A Informação Geográfica (IG) pode ser considerada como um produto ou como uma série de produtos que são produzidos considerando determinadas especificações técnicas com o intuito de satisfazer as necessidades de um ou vários utilizadores em variadas aplicações (Gil de La Vega et al., 2016). Os dados geográficos estão sendo cada vez mais partilhados entre utilizadores e aplicados para finalidades e objetivos diferentes dos pretendidos pelos produtores. É por isso cada vez mais importante a avaliação da

qualidade. Os métodos de avaliação da qualidade dos dados permitem decidir se estes cumprem os requisitos de qualidade exigidos para cada aplicação em concreto (Joos, 2006). Além disso, uma elevada qualidade de IG permitirá aos utilizadores ter uma maior confiança nos resultados obtidos nas diversas aplicações (Seo e O'Hara, 2009).

A publicação de linhas orientadoras sobre a avaliação da qualidade de IG é da responsabilidade de alguns comités oficiais mundiais que publicam orientações com vista a fazer a verificação da qualidade dos dados geográficos e da IG. As orientações descrevem os procedimentos de verificação, bem como a estatística recomendada em cada caso. São exemplos as normas ISO 19157 (2013) e o Geographic Information Framework Data Content Standard (FGDC, 2008) da responsabilidade de U.S. Federal Geographic Information Data Committe (FGDC) o qual estabelece que a exatidão dos dados deve ser reportada de acordo com o National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA) (FGDC, 1999).

Existe também a diretiva INSPIRE que estabelece a criação da infraestrutura europeia de Informação Geográfica e que promove a disponibilização de informação de natureza espacial, utilizável na formulação, implementação e avaliação das políticas ambientais da União Europeia. A diretiva estabelece regras para uniformização da IG, interoperabilidade de dados, correção das entidades geográficas, medidas de avaliação da qualidade, como por exemplo, a exatidão posicional, a completude dos dados, entre outros.

As principais componentes da qualidade dos dados espaciais são: 1) a exatidão posicional que permite avaliar a correção da posição espacial das entidades geográficas; 2) a exatidão temática que analisa a correção dos atributos associados à IG; 3) a exatidão temporal que avalia as características temporais dos dados e verifica se os dados estão atualizados; 4) a consistência lógica analisa problemas relativos a inconsistências geométricas que existem dentro de um determinado conjunto de dados; 5) a completude avalia se os dados estão completos, ou seja, verifica se há dados que deviam estar representados e que não estão presentes (erros de omissão) ou se há mais dados para além daqueles que deveriam estar representados (erros de comissão). A completude representa a relação entre os objetos representados e a sua respetiva conceptualização.

Relativamente à avaliação da exatidão posicional dos dados vetoriais referem-se a seguir algumas abordagens para a modelação do erro das entidades pontuais e linhas, por serem estas as relevantes para o presente trabalho.

2.5.3.1 Avaliação da exatidão posicional

Pontos

Um ponto fica geometricamente descrito pelas suas coordenadas, podendo estas ser obtidas a partir de medições, utilizando diversas tecnologias de aquisição (descritas em 2.3.1) e também várias etapas ao nível do processamento, sendo que, cada uma destas operações poderá adicionar novos erros que vão sendo acumulados. O erro posicional nos dados espaciais é definido por um vetor, comparando as coordenadas entre a posição verdadeira e as coordenadas da posição medida. Normalmente a exatidão horizontal e a exatidão vertical são analisadas de forma separada. Para a avaliação da exatidão horizontal, por exemplo, Polo e Felicísimo (2010) referem que a utilização da magnitude (ou módulo) e do azimute permite efetuar uma análise completa do erro posicional. No entanto, os testes padrão usam normalmente apenas a magnitude do vetor e omitem o azimute.

Assim, para quantificar o deslocamento horizontal entre pontos homólogos (P e P') é tipicamente utilizada a medição da distância euclidiana (equação (1)), onde P é o ponto de referência e P' é o ponto em análise. Este tipo de medição dá um único valor por par de elementos avaliados (os pontos P e P').

$$\overline{PP'} = \sqrt{(X_P - X_{P'})^2 + (Y_P - Y_{P'})^2} \quad (1)$$

A estatística circular inclui o erro quadrático médio (EQM) (e.g. Leung e Yan, 1998, Li et al., 2005, Congalton e Green, 2009, Cuartero et al., 2010, Longley et al., 2011), a média (m) e o desvio padrão (σ) (e.g. Leung e Yan, 1998, Wechsler, 2007, Cuartero et al., 2010).

Para analisar a natureza tridimensional do erro, ou seja, o seu módulo e a sua componente horizontal e vertical, pode ser utilizada estatística esférica (Cuartero et al.,

2010). Por exemplo, (Cuartero et al., 2010) apresenta uma metodologia para análise de erros posicionais de dados obtidos por sistemas de varrimento a laser terrestre, a metodologia é baseada em estatística esférica e grafos 3D. Segundo este autor, a estatística esférica é mais indicada devida à natureza vetorial tridimensional do erro espacial. Os vetores erro possuem três elementos métricos, um módulo e dois ângulos que são analisados por estatística esférica.

Linhas

Verifica-se na comunidade científica um certo consenso relativamente à modelação da análise do erro de entidades pontuais, já o mesmo não acontece na modelação do erro em linhas. As metodologias para controlar a exatidão posicional de linhas são baseadas no conceito de incerteza (Mozas-Calvache e Ariza-López, 2015).

Os métodos de avaliação da exatidão posicional de linhas e os modelos de avaliação da incerteza posicional para segmentos e linhas, são tradicionalmente tratados como elementos bidimensionais (2D), (Gil de La Vega et al., 2016). Existem diferentes métodos para avaliar a qualidade posicional dos elementos lineares. Shi e Liu (2000) estabeleceram dois tipos de modelos de erro: i) modelo de regiões de confiança, que consiste numa faixa em torno de uma linha a avaliar, onde dentro dessa banda se encontra a verdadeira localização da linha (linha de referência); ii) modelo de banda de erro, que consiste numa faixa em torno da posição verdadeira da linha (ou segmento).

Estas regiões podem ser obtidas através da geração de um *buffer* com uma determinada largura em torno das linhas. De referir que, a exatidão das linhas de água analisada na presente tese foi efetuada aplicando *buffers* em torno da linha de água de referência, de modo a incluir as linhas de água homólogas. As linhas de água em análise foram transformadas em pontos e foi calculada a distância de todos os pontos de cada linha em análise à linha de referência.

Outra metodologia para modelar a exatidão associada a elementos lineares é a banda ϵ que restringe o erro a um certo limite de confiança e considera que todos os pontos numa linha constituída por segmentos são independentes e têm a mesma distribuição

probabilística que os pontos extremos do segmento (e.g. Kronenfeld, 2011, Chrisman, 1982, Edwards e Lowell, 1996, Leung e Yan, 1998).

Uma outra metodologia para controlar a exatidão posicional de linhas, é baseada na comparação de linhas homólogas. Todavia há que referir que esta metodologia poderá levantar algumas questões pelo fato das linhas a comparar poderem ser constituídas por diferente número de segmentos (e de pontos, naturalmente), o que pode dificultar o cálculo da distância dos pontos que compõem a linha de análise à linha de referência.

2.3.6 Exatidão dos MDEs

2.3.6.1 Fatores que influenciam a exatidão

A exatidão dos MDEs está dependente de vários fatores relacionados com a sua criação tais como, os métodos de interpolação utilizados, a densidade de pontos usados, a sua resolução espacial (dimensão da célula) e também as características do terreno, nomeadamente a rugosidade da superfície terrestre. Os pontos seguintes descrevem a forma como cada um destes fatores pode influenciar a exatidão do MDE.

Métodos de interpolação

A escolha do método de interpolação para a criação do MDE é um tópico que tem merecido especial atenção dentro da comunidade científica. O assunto tem motivado diversos investigadores a desenvolverem e publicarem estudos comparativos de exatidão fazendo variar o interpolador (Kinzle, 2004, Chaplot et al., 2006, Liu et al., 2007, Erdogan, 2010). É consensual a ideia de que a influência das técnicas de interpolação na exatidão da superfície topográfica depende de alguns fatores, nomeadamente, a topografia do terreno e consequentemente da distribuição dos pontos da amostra que está diretamente relacionado com o método de levantamento dos dados (Binh, 2008).

Kinzle (2004) testou a qualidade de MDEs interpolando-os com diferentes resoluções espaciais e identificou a dimensão ótima da grelha. O impacto da densidade de pontos da amostra e dos métodos de interpolação na exatidão do MDE foi analisado por Aguilar et al. (2005).

Densidade de pontos

A densidade de pontos utilizados para criar um MDE influencia a variação dos resultados obtidos com os vários interpoladores. Por exemplo, quando a densidade de pontos da amostra é elevada, o interpolador utilizado influencia pouco o resultado, contrariamente ao que sucede quando a densidade de pontos é baixa, pois nesse caso o desempenho dos diferentes métodos de interpolação tende a variar. A densidade é um fator que também está relacionado com as características do terreno, pois para terrenos mais acidentados, serão necessários mais pontos, de modo a permitir uma melhor definição da superfície topográfica. Todavia, em zonas planas, um excesso de pontos pode traduzir-se numa redundância de dados que pode não ser benéfica, na medida em que, para definir zonas sem considerável variabilidade altimétrica, ao serem gerados novos pontos interpolados que não sejam necessários, poderá estar-se a introduzir erro.

Chaplot et al. (2006) desenvolveu um estudo cujo objetivo foi avaliar o efeito da tipologia de terreno, densidade de pontos e métodos de interpolação na exatidão do MDE obtido. O autor aplicou o seu estudo a zonas de montanha e zonas planas, tendo concluído que a elevada densidade de pontos conseguida com a tecnologia LiDAR permite uma menor dependência do método de interpolação escolhido, pois, nestas circunstâncias, há menos necessidade de interpolar, o que vai permitir uma diminuição do erro global da área modelada. O mesmo autor, também sugere que o impacto da interpolação é possivelmente mais visível nos parâmetros derivados do MDE, como por exemplo, as redes hidrográficas, do que na própria altitude (Z).

A capacidade da tecnologia LiDAR (aéreo) em adquirir grandes quantidades de pontos (nuvens de pontos 3D) permite a geração de MDEs de resolução sub-métrica com elevada exatidão vertical sobre áreas de grande extensão (Murphy et al., 2008, Luscombe et al., 2015). Muitas vezes a redução da densidade de pontos obtidos ainda permite obter MDEs de elevada exatidão, trazendo ainda benefícios no tempo de armazenamento e no processamento (Brubaker et al., 2013).

Resolução espacial

A resolução espacial do MDE é um outro fator que afeta a sua exatidão, bem como a exatidão dos parâmetros topográficos dele derivados, tais como, a rede hidrográfica e a delimitação das bacias (Florinsky e Kuryakova, 2000, Lacroix et al., 2002). A resolução do MDE deve ser combinada com a densidade de pontos da amostra. Muitas vezes sucede que a escolha da dimensão da célula é feita arbitrariamente não refletindo necessariamente a dimensão ótima para uma análise específica. Pode acontecer que perante a escolha de uma grelha grosseira, esta pode não conseguir captar pormenores ou detalhes relativos à variação da superfície, tais como, picos e canais que tendem a desaparecer, contrariamente à utilização de uma grelha muito fina que pode incluir mais ruído devido à redundância de dados e também diminuir a velocidade de processamento. Assim, a escolha da resolução espacial adequada para o MDE está também restringida pelas características do terreno, na medida em que, se na zona a representar existirem detalhes necessários ao estudo, então a escolha da resolução espacial deve ser tal que consiga captar esses mesmos detalhes. Por exemplo, recorrendo a uma alta resolução espacial do MDE, é possível representar pequenas variações da superfície terrestre, especialmente em terrenos complexos (Gong et al., 2000, Lynch, 2002). Hu (2003) propôs que a dimensão da grelha do MDE pode ser estimada utilizando (2). Onde n é o número de pontos recolhidos no terreno e A é a área coberta, sendo S a dimensão da grelha, ou seja, a resolução espacial do MDE.

$$S = \sqrt{\frac{A}{n}} \quad (2)$$

Obviamente que a escolha da resolução mais adequada para a grelha estará também sempre dependente da tipologia da aplicação. De uma forma geral, as aplicações desenvolvidas indicam que à medida que a resolução espacial diminui, a resolução dos parâmetros topográficos derivados também diminui, perdendo-se por isso, muitas características do detalhe da paisagem.

Características do terreno

Parece intuitiva a percepção de que as características do terreno são um fator que pode influenciar significativamente a qualidade do MDE obtido. Vários autores referem que a

magnitude do erro do MDE está relacionada com as características do terreno, nomeadamente com a sua rugosidade e declive (e.g. Fisher, 1998, Kyriakidis et al., 1999, Toutin, 2002). É importante por isso escolher uma resolução espacial que traduza o grau de complexidade do terreno e represente a maior parte das características geomorfológicas (Smith et al., 2006).

Na verdade, o processo de modelação de uma superfície montanhosa será mais difícil de efetuar que a modelação de uma superfície plana. Assim, o erro do MDE em zonas montanhosas torna-se muito mais elevado do que o erro na modelação em zonas planas, a razão é que em zonas de montanha o declive muda fortemente e as técnicas de interpolação não modelam essa mudança abrupta (Binh e Thuy, 2008). A densidade de pontos necessária para obtenção de um MDE de qualidade é variável consoante a complexidade do terreno, onde naturalmente as zonas mais planas necessitam de uma menor densidade de pontos contrariamente ao que sucede nas zonas montanhosas.

2.3.6.2 Avaliação da qualidade do MDE

A avaliação da exatidão de um MDE tem sido um tópico que tem merecido considerável atenção. Em muitos casos o erro na altitude (Z) é a medida utilizada para quantificar a qualidade do MDE (Torlegard et al., 1986, Gao, 1997). Para avaliar a qualidade de um MDE utilizam-se os indicadores média (m), desvio padrão (σ) e a raiz do erro quadrático médio ($REQM$) das diferenças na altitude num conjunto de pontos amostra.

Estes indicadores fornecem informação diferenciada sobre os erros. A média fornece informação sobre o erro sistemático presente no MDE e pode ser considerada um indicador da exatidão do MDE. O desvio padrão dos erros fornece informação sobre a dispersão dos valores e é um indicador da precisão. Já a raiz do erro quadrático médio ($REQM$) é um indicador que inclui ambas as componentes, a sistemática e a componente aleatória.

A amostra de pontos a considerar para avaliação da exatidão pode ser obtida com abordagens distintas, podendo corresponder a todos os *pixels* do MDE presentes na área em estudo (sendo neste caso uma amostra sistemática de grande dimensão da população, o que no caso de MDE com resolução espacial elevada pode ser considerado como representando toda a população). Outra alternativa para avaliar a exatidão do modelo é

considerar uma amostra aleatória de pontos (*pixels*), habitualmente designados de pontos de controlo.

Considerando a avaliação da exatidão usando todos os pontos da área de estudo (toda a população), interessa comparar altimetricamente o MDE em análise com outro MDE independente e com maior exatidão, sendo este tomado como MDE de referência. Considerando que toda a população em análise tem n pontos, as diferenças são calculadas nos pontos P_k ($k=1, \dots, n$). Assim, vão comparar-se os valores de altitude dos MDEs i em análise ($MDE_i(P_k)$) com os valores de altitude do MDE de referência ($MDE_{Ref}(P_k)$). A diferença de altitudes entre ambos os modelos (de referência e o MDE em análise) é dada pela equação (3). As equações (4) e (5) permitem determinar respetivamente, a média e desvio padrão do erro e a equação (6) permite calcular a raiz quadrada do erro quadrático médio das diferenças altimétricas (*REQM*).

$$MDE_Dif_i(P_k) = MDE_{Ref}(P_k) - MDE_i(P_k) \quad (3)$$

$$\overline{MDE_Dif_i} = \frac{\sum_{k=1}^n MDE_Dif_i(P_k)}{n} \quad (4)$$

$$\sigma_{MDE_Dif_i} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (MDE_Dif_i(P_k) - \overline{MDE_Dif_i})^2}{n}} \quad (5)$$

$$REQM_{MDE_Dif_i} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (MDE_Dif_i(P_k))^2}{n}} \quad (6)$$

Fazendo a avaliação da exatidão usando uma amostra de m pontos de controlo, deverão determinar-se as altitudes (cotas) nesses pontos (Z_{Ref}), garantindo que essa determinação é feita com maior exatidão do que a usada para obter as altitudes do MDE em análise, sendo por isso, esses dados considerados como referência. De seguida, determinam-se para os m pontos da amostra as diferenças de altitude entre os valores de referência (Z_{Ref}) e os valores extraídos do MDE (Z_{MDE}) usando a equação (7). A média e o desvio padrão do erro, dado pelas diferenças de altitude, podem ser obtidos, respetivamente, pelas equações (8) e a equação (9). A equação (10) permite determinar a raiz quadrada do erro quadrático médio (*REQM*) das diferenças de altitudes.

$$Dif_i = Z_{Refi} - Z_{MDEi} \quad (7)$$

$$\overline{Dif_i} = \frac{\sum_{i=1}^m Dif_i}{m} \quad (8)$$

$$\sigma_{Dif_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (Dif_i - \overline{Dif_i})^2}{m - 1}} \quad (9)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{Refi} - Z_{MDEi})^2}{m}} \quad (10)$$

De referir que, esta forma de avaliar a exatidão do MDE, não permite avaliar de forma isolada cada um dos erros que lhe estão associados, mas apenas os erros resultantes do efeito de correlação de todos eles. Para além disso, estes parâmetros estatísticos fazem uma análise do erro inerente à área de estudo, e não a cada zona específica. Subdividindo a área de estudo em zonas específicas poder-se-á aplicar o mesmo método de análise e avaliar a variabilidade espacial do erro e analisar a sua relação com outras variáveis, como por exemplo, a complexidade e a declividade do terreno. Refira-se que na presente tese, num dos estudos de caso apresentados, utilizou-se essa subdivisão da área de estudo em zonas e avaliou-se a exatidão dos MDEs, das linhas de água e do declive em cada zona.

Nos estudos desenvolvidos onde foram realizadas análises da exatidão do MDE (estudo de caso 2 e 3) considerou-se toda a população, ou seja, todos os *pixels* da área de estudo.

Em diversos estudos no domínio da Hidrologia, não tem sido possível estabelecer uma correlação entre os desvios horizontais entre diferentes MDEs de diferente exatidão, assim como, o efeito produzido nas características hidrológicas deles extraídas. Reinoso (2011) desenvolveu um algoritmo que permite medir a discrepância planimétrica entre dois MDEs que são representados por curvas de nível. O método baseia-se na determinação das áreas (regiões) incluídas entre duas curvas de nível homólogas. O principal problema do método apresentado é a identificação de duas curvas homólogas o que não é uma tarefa fácil.

2.3.6.3 Variabilidade espacial do erro

Segundo Erdogan (2010) a melhor forma de examinar a distribuição espacial do erro é conseguida com a obtenção da representação cartográfica da exatidão através de mapas de erro. Estes mapas são construídos com as diferenças altimétricas entre o MDE em análise e um MDE de referência. Este tipo de representação cartográfica do erro permite uma leitura mais simples e intuitiva inerente à área de estudo, pois indica claramente onde ocorrem os erros mais relevantes e anómalos e por isso mesmo aqueles que merecem maior atenção. A Figura 11 exemplifica um mapa de erro referente a uma região hidrográfica onde estão representadas as diferenças de altitude entre dois MDEs, podendo facilmente visualizar-se as zonas onde se localizam as diferenças de maior amplitude, as de valor positivo (cor vermelha) e as de valor negativo (cor verde).

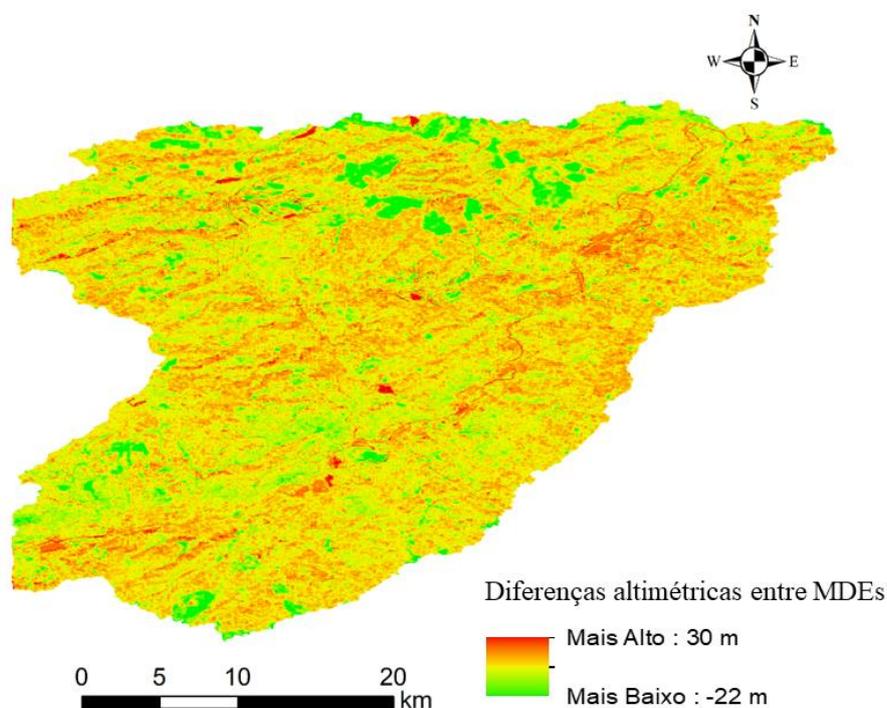


Figura 11: Mapa de erro das diferenças altimétricas entre dois MDEs, um de referência e outro em análise.

A variabilidade espacial do erro é um tópico que merece atenção, pois, como já foi referido, a distribuição espacial do erro não é uniforme. Diversos estudos provam que os

erros do MDE estão espacialmente correlacionados e também que esses erros dependem das características do terreno, (e.g. Desmet, 1997, Fisher, 1998, Chaplot et al., 2006), sendo que, a sua magnitude também está relacionada com tais características. Na verdade, é intuitiva a ideia de que certos tipos de terreno sejam mais propícios para a criação de MDEs com maior exatidão. Gao (1997) observou que os erros do MDE são mais pequenos em terrenos de menor complexidade. Hunter e Goodchild (1997) concluíram que o erro do MDE está relacionado com o declive do terreno. Assim, é mais útil analisar e visualizar a distribuição espacial dos erros, pois permitirá compreender melhor a qualidade e incerteza associada aos MDEs e aos produtos deles derivados.

2.4 Extração de parâmetros topográficos a partir de MDEs

A topografia do terreno define os percursos do movimento da água à superfície e ao longo de uma determinada bacia hidrográfica, sendo um dos principais fatores que afeta a resposta hidrológica da bacia à precipitação. Essa precipitação poderá ocorrer sob a forma de chuva, neve, granizo, orvalho, geada, entre outros. As previsões hidrológicas são realizadas tendo por base dados relativos a diversas variáveis que ajudam a caracterizar em termos fisiográficos a bacia hidrográfica. Os MDEs permitem a extração eficiente de parâmetros topográficos que permitem caracterizar a bacia hidrográfica e são utilizados na modelação hidrológica.

A designação de parâmetro é justificada pelo facto de ser uma variável de entrada no modelo hidrológico. No entanto, em literatura da especialidade são usadas terminologias diferentes como “características topográficas” (Wilson e Gallant, 2000b)), “índices topográficos” (Sorenson e Seibert, 2007, Song et al., 2010, Hage et al., 2010, Vaze et al., 2010) e “atributos topográficos” (Wu et al., 2008).

Alguns autores categorizam os parâmetros em primários e secundários (e.g. Wilson e Gallant, 2000b). Os primeiros são aqueles que derivam diretamente da superfície do MDE, já os atributos secundários envolvem combinações de atributos primários e podem ser

utilizados para caracterizar a variabilidade espacial de processos específicos que ocorrem na superfície do terreno, nomeadamente, processos de movimento superficial e sub-superficial da água (Moore et al., 1991, Gallant e Wilson, 2000). Do conjunto dos parâmetros primários, aqueles que têm importância em termos hidrológicos relativamente ao efeito causado pela resolução espacial do MDE são o declive, o comprimento das linhas de água e a área da bacia (e.g. Wilson e Gallant, 2000b), pois são aqueles que dependem diretamente da dimensão da célula.

Considerando o domínio das ciências da Terra verifica-se que é precisamente nas análises hidrológicas que se verifica a maior utilização dos MDEs (e.g. Li e Wong, 2010). Os processos de extração de parâmetros topográficos são realizados recorrendo a uma variedade de modelos matemáticos publicados na literatura (e.g. Li et al., 2005), alguns deles quando embebidos em *software* de SIG permitem realizar análises (Zhou e Liu, 2002) úteis para diversas aplicações. São vários os parâmetros topográficos que se podem extrair a partir dos MDEs, nomeadamente os relativos à bacia hidrográfica, tais como a área, o perímetro ou o coeficiente de forma da bacia, as redes hidrográficas, o comprimento de rios, a densidade de drenagem, densidade de rios, mas também o declive, a orientação de vertentes, entre outros.

2.4.1 Bacia hidrográfica

No passado os hidrologistas definiam as bacias hidrográficas recorrendo à altimetria representada em mapas topográficos através de curvas de nível e de pontos cotados, bem como as redes hidrográficas. Com o avanço das tecnologias, a delimitação da bacia hidrográfica é efetuada com ferramentas de SIG que operam sobre os MDEs (Maidment, 1999), onde as linhas divisórias das bacias são traçadas ao longo das células (no caso do MDE matricial) que definem as linhas de cumeada. Apesar do processo de automatização na delimitação de bacias se ter tornado numa alternativa mais atrativa em relação aos processos tradicionais, continua a existir incerteza no processo de delimitação (e.g. Oksanen e Sarjakoski, 2005). A área da bacia é obtida a partir do MDE, sendo determinada a partir da dimensão e do número de células da grelha que drenam para um determinado ponto do curso de água. A incerteza inerente ao valor obtido para a área é influenciada quer pela resolução do MDE (bacias de menor dimensão) mas também variabilidade da

topografia do terreno (e.g. Wu et al., 2008). Alguns autores avaliaram o efeito da variação da dimensão da grelha do MDE no cálculo da área (e.g. Vieux e Needham, 1993). A área de uma bacia é um parâmetro relevante na determinação de características hidrológicas do terreno, pois irá influenciar a previsão do escoamento na bacia hidrográfica.

Vários autores desenvolveram metodologias para determinar o valor da área da bacia (e.g. O'Callaghan e Mark, 1984, Costa-Cabral e Burges, 1994). Todavia, a metodologia desenvolvida por Quinn et al (1991) efetua o cálculo da área distribuindo o escoamento de forma proporcional pelos *pixels* localizados a jusante de acordo com a declividade local.

A área contributiva (A) define-se como a área que contribui para cada *pixel* e pode ser estimada como o produto do número total de *pixels* que para ele drenam (N) pela área do *pixel* (Δd^2). Assim, para um determinado *pixel*, a área contributiva a montante (A) é dada pela equação (11), onde, N é o número de *pixels* a montante e Δd é o espaçamento da grelha, ou seja, a resolução espacial do MDE.

$$A = N\Delta d^2 \quad (11)$$

2.4.2 Declive

Os mapas de declive são habitualmente utilizados para descrever a estrutura de drenagem numa determinada região ou bacia hidrográfica (e.g. Isidoro et al., 2010). O declive é uma propriedade topográfica fundamental utilizada em todos os algoritmos para gerar linhas de água. O declive em conjunto com a orientação das vertentes permite determinar as direções do escoamento. O declive extraído dos MDEs varia em função da sua resolução espacial. Vários estudos indicam que as variáveis derivadas da morfologia do terreno, como por exemplo, o declive médio do terreno, estão correlacionadas com o aumento do erro global da superfície modelada (Toutin, 2002).

O declive e a curvatura são parâmetros derivados do MDE extraídos através do cálculo das derivadas da função elevação de primeira e segunda ordem, respetivamente. Tratando-se de um MDE matricial a superfície reconstruída é discreta (não contínua), ou seja, não derivável. Por essa razão, o declive não é definido matematicamente e a sua avaliação na

forma discreta, a qual depende da escala de representação (resolução espacial do MDE) pode conduzir a artefactos (Florinsky, 1998, Florinsky, 2016). Num estudo recente, Hirt (2018) desenvolveu um método que utiliza o declive para detetar e localizar artefactos no MDE (SRTM), podendo após essa localização serem efetuadas correções que permitirão melhorar a exatidão do MDE.

A extração das variáveis morfométricas a partir de um MDE pela determinação das derivadas parciais da função altitude (Z), assim como, a interpolação, generalização e remoção do ruído do MDE, englobam os principais problemas associados à modelação e à análise de superfícies topográficas (Florinsky, 2012). Habitualmente todos estes problemas são resolvidos de forma separada através de procedimentos implementados em diferentes métodos e algoritmos. No entanto, Mitasova e Mitas (1993) desenvolveram um método para interpolação local do MDE recorrendo a interpoladores splines regularizados com tensão, permitindo também a estimação simultânea das derivadas parciais da elevação, ou seja, obtendo as características geomorfométricas do terreno. Florinsky (2016) desenvolveu um método que permite resolver todos esses problemas em simultâneo. O método foi desenvolvido por forma a transformar o gradiente do declive e a curvatura numa distribuição próxima da gaussiana. O método foi testado e demonstrou um bom desempenho podendo ser utilizado como uma ferramenta para tratamento analítico de MDEs.

No âmbito da análise estatística dos MDEs, publicações recentes mostram a vantagem em normalizar o declive (e.g. Florinsky, 2016, Csillik et al., 2015). Csillik et al. (2015) desenvolveu um método para normalização do declive e a curvatura da superfície, baseando-se na minimização da assimetria na distribuição de frequências do gradiente do declive. O método desenvolvido mostrou que é robusto quando aplicado a MDEs de diferentes origens, dimensão, resolução espacial e tipos de relevo. O mesmo autor propõe a utilização do conceito de vetor erro e consequentemente a estatística circular nos indicadores estatísticos usuais, como por exemplo, média (m), desvio padrão (σ), e erro quadrático médio (EQM) (Leung e Yan, 1998, Cuartero et al., 2010).

Um dos algoritmos utilizados no cálculo do declive a partir de MDEs foi desenvolvido por Burrough e McDonnell (1998) e é baseado no método de Horn (Horn, 1981). Este método calcula o declive ao longo da grelha (matriz), considerando em cada célula a

direção de maior variação de declive em relação às oito células vizinhas, calculando o declive como sendo a magnitude (ou o módulo) do vetor gradiente, vetor que é tangente à superfície apontando na direção do declive mais acentuado. O declive na posição (x, y) é calculado pela equação (12). Onde $\frac{\partial f}{\partial x}$ e $\frac{\partial f}{\partial y}$, são as derivadas parciais de f (função altitude) segundo as direções coordenadas x e y e D é o declive (Horn, 1981, Neteler e Mitasova, 2002).

$$D = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (12)$$

Num MDE definido sobre uma grelha, as derivadas parciais são estimadas utilizando as diferenças finitas considerando uma janela 3×3 centrada em (x, y) , com valores de altitude Z_i que mover-se-á sobre toda a grelha. A Figura 12 representa a janela 3×3 com três linhas e três colunas e com os valores do atributo altitude (Z_i) em cada célula.

Z_1	Z_2	Z_3
Z_4	Z_5	Z_6
Z_7	Z_8	Z_9

Figura 12: Esquema exemplificando a numeração das elevações numa janela 3×3 .

(Fonte: adaptado Gonçalves e Santos, 2002)

As equações (13) e (14) permitem estimar o valor das derivadas parciais da célula central (x, y) , onde Δx e Δy representa a dimensão da célula da grelha do MDE (resolução espacial) segundo as duas direções coordenadas no plano e os valores de Z_1, Z_2, \dots, Z_9 , representam a altitude em cada célula.

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{(Z_1 + 2Z_4 + Z_7) - (Z_3 + 2Z_6 + Z_9)}{8\Delta x} \quad (13)$$

$$\frac{\delta f}{\delta y} = \frac{(Z_1 + 2Z_2 + Z_3) - (Z_7 + 2Z_8 + Z_9)}{8\Delta y} \quad (14)$$

Outro método para o cálculo do declive é o que recorre à variação percentual da altitude ao longo de uma determinada distância (Burrough e McDonnell, 1998). É um método baseado em trigonometria, sendo o cálculo do declive dado pela equação (15). O valor Z_5 representa a altitude da célula central da janela 3×3 (Figura 12) e Z_i é cada uma das restantes células posicionadas em torno da célula central, L é a distância medida em metros, entre o ponto médio da célula central e cada uma das suas oito células vizinhas, sendo D (%) o declive em percentagem.

$$D(\%) = \max \frac{|Z_5 - Z_i|}{L} \times 100 \quad (15)$$

Este foi o método utilizado na presente tese. Na Figura 13 pode ver-se um exemplo de um mapa de declive gerado a partir de um MDE (ASTER de 30 m de resolução espacial) numa região inserida na bacia hidrográfica do rio Mondego na zona de Gouveia (Guarda).

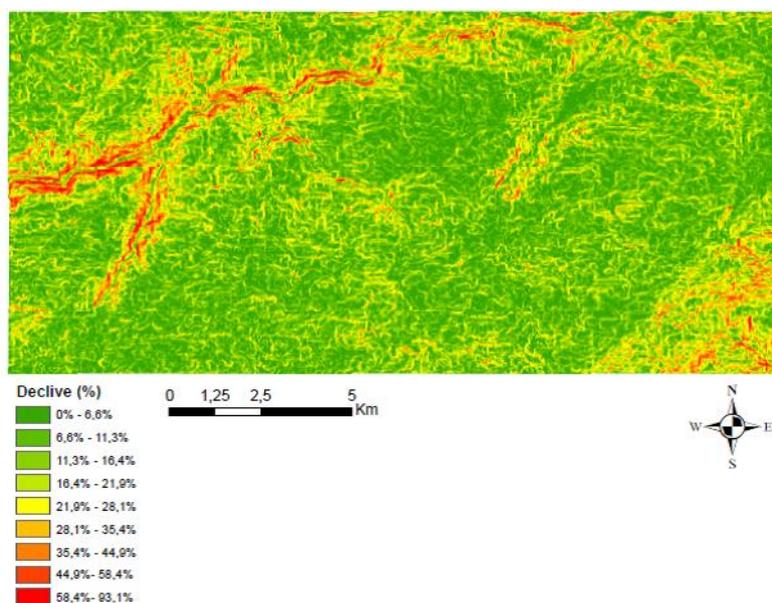


Figura 13: Mapa de declive gerado a partir de um MDE (ASTER) numa zona inserida na bacia hidrográfica do rio Mondego (Portugal).

Consegue-se facilmente perceber através do referido mapa que as zonas de maior valor de declive correspondem ao traçado do rio principal, pois é uma zona montanhosa, sendo que as linhas de água fluem por entre vales encaixados apresentando declives acentuados.

Refira-se também que na presente tese o principal objetivo era a extração a partir dos MDEGs transformados de linhas de água com maior exatidão planimétrica e altimétrica em relação à exatidão das linhas de água extraídas dos MDEGs originais. Para além disso, analisou-se também a exatidão dos modelos transformados em toda a sua extensão e fez-se uma análise preliminar do parâmetro declive. Por conseguinte, não foi explorada a aplicação de algumas metodologias já referidas para a extração do declive, como por exemplo, os métodos de normalização (e.g. Florinsky, 2016, Csillik et al., 2015), tendo sido realizada apenas a análise preliminar que, no caso dos modelos reconstruídos, permitiu verificar possíveis incorretas orientações na rede hidrográfica do OSM.

2.4.3 Rede hidrográfica

A extração de redes hidrográficas desempenha um papel importante e significativo nos estudos hidrológicos (Moore et al., 1991, Garbrecht e Martz, 2000, Wilson, 2012). A abordagem mais comum para extrair linhas de água é baseada no desenvolvimento de um modelo para acumulação de escoamento superficial. Este método, designado por algoritmo *D8* (Deterministic Eight Neighbors) foi introduzido por O'Callaghan e Mark (1984), tendo sido muito utilizado (O'Callaghan e Mark, 1984, Jenson e Domingue, 1988, Tarboton, 1997, Martz e Garbrecht, 1998, Liu, 2008, Sujatha et al., 2015). A Figura 14 apresenta uma representação esquemática do algoritmo. Em cada *pixel* do MDE, a água irá tomar uma das oito direções possíveis correspondentes às oito células vizinhas (Tarboton, 1997).

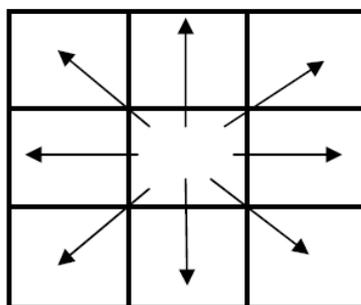


Figura 14: Esquema do algoritmo D8. (Fonte: Adaptado de Jenson e Domingue, 1988).

Pelo fato de poderem existir imperfeições no MDE, como por exemplo, a existência de poços artificiais, imperfeições essas decorrentes do seu processo de construção e que influenciam de forma artificial o escoamento, então, será conveniente corrigir tanto quanto possível essas imperfeições, usando algoritmos que permitem o preenchimento desses poços ou depressões artificiais (*fill sinks*). De seguida, será gerada a matriz de direção do escoamento em que cada célula tem um código que indica a direção de escoamento da água para uma das oito direções possíveis. A direção a ser escolhida é a correspondente ao *pixel* vizinho que possui menor altitude (*Z*). Os códigos indicam as direções geográficas Norte (64), Sul (4), Este (1), Oeste (16), Nordeste (128), Sudeste (2), Sudoeste (8) e Noroeste (32). A Figura 15 ilustra a geração da matriz da direção do escoamento.

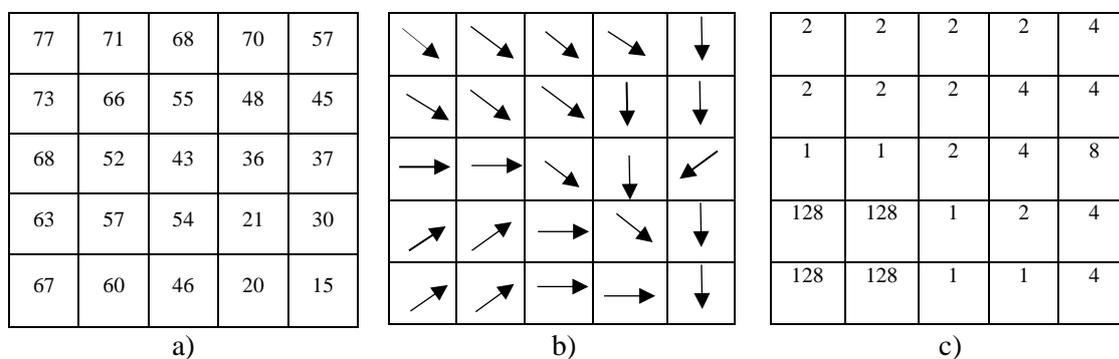


Figura 15: Esquema representativo da direção do escoamento (b) e do código associado à direção (c) do MDE indicado em (a) onde estão presentes os valores de altitude. (Fonte: Ruichao et al., 2010).

O processo seguinte é a geração da matriz de acumulação de escoamento. Esta matriz é composta por *pixels* onde o valor de cada um corresponde ao número de *pixels* que para ele drenam, ou seja, cada *pixel* tem o valor de escoamento nele acumulado. A Figura 16 ilustra o processo de geração da matriz de acumulação de escoamento.

De modo a gerar a rede hidrográfica é necessário definir um nível crítico (*NC*) que traduz o valor de acumulação de escoamento a partir do qual a célula é considerada como pertencente a uma linha de água. É assim necessário para a célula pertencer à rede hidrográfica verificar a condição (16).

$$\text{valor da célula} > NC \quad (16)$$

As células que têm valores de acumulação de escoamento inferior ao NC , não pertencerão à rede hidrográfica. Consequentemente a definição de níveis críticos mais baixos permitirá gerar redes mais ramificadas, porque mais células serão inseridas na rede. A escolha deste valor deverá ter em conta a resolução espacial do MDE e a extensão da área de estudo.

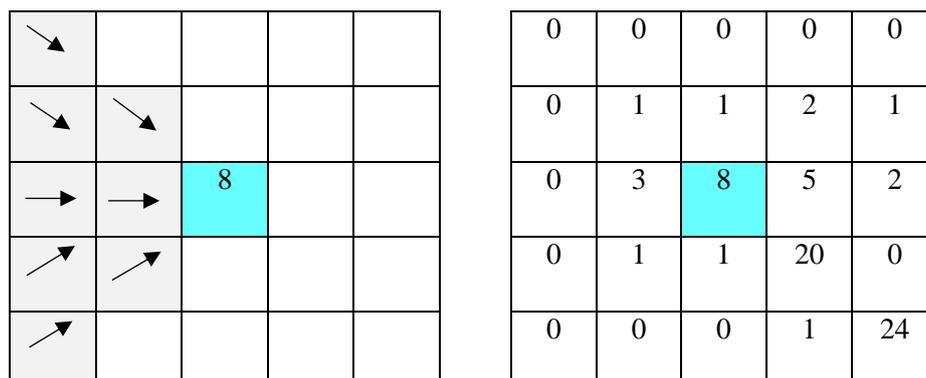


Figura 16: Esquema representativo da geração da matriz de acumulação de escoamento.

(Fonte: Ruichao et al., 2010).

Após a definição da matriz de escoamento, são identificadas as células com valor de escoamento superior ao NC e a rede hidrográfica é gerada. A Figura 17 b) mostra uma rede hidrográfica extraída do MDE ASTER com 30 metros de resolução espacial (Figura 17 a).

Após a extração da rede hidrográfica o comprimento da rede hidrográfica (L_t) pode ser calculado ao longo de todos os *pixels* que a definem, ou seja, desde o *pixel* onde a rede hidrográfica tem início até uma determinada seção transversal a jusante (onde a rede hidrográfica termina). O comprimento total da rede hidrográfica virá em função da dimensão do *pixel* (resolução espacial do MDE) e será igual à soma dos comprimentos de todos os segmentos de rio (cursos de água) que a compõem.

Outros parâmetros topográficos são determinados com base no comprimento total, por exemplo, a densidade de drenagem que é expressa pelo quociente entre o comprimento total da rede (L_t) e a área da bacia (A), ou o parâmetro densidade de rios (D_r) que é definida

pelo quociente entre o número total de cursos de água (ou segmentos de rios) e a área da bacia (A). A Figura 18 mostra uma parte da uma rede hidrográfica extraída de um MDE (esquerda) e um detalhe da mesma podendo visualizar-se os *pixels* (à direita).

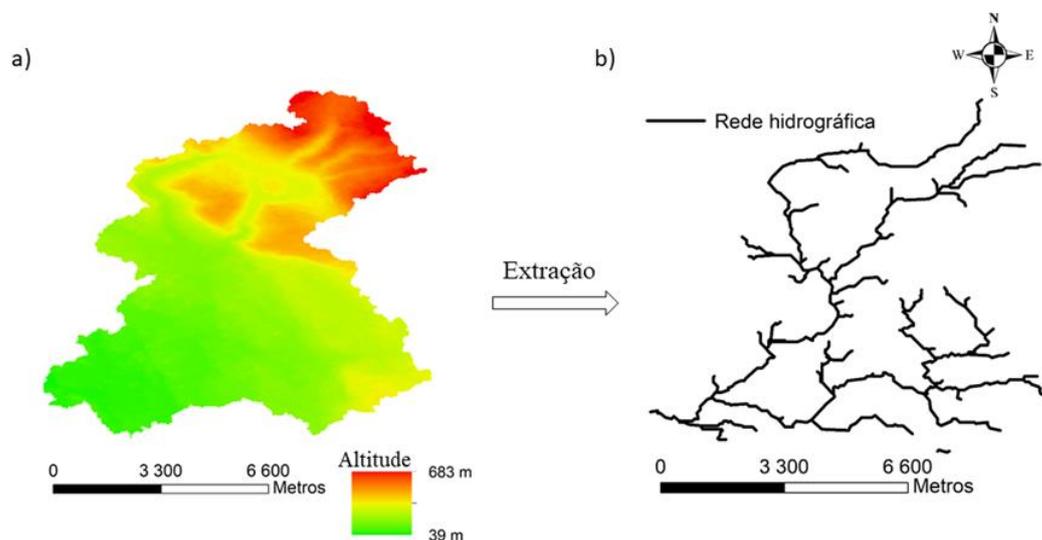


Figura 17: a) MDE ASTER da bacia hidrográfica e b) a rede hidrográfica extraída.

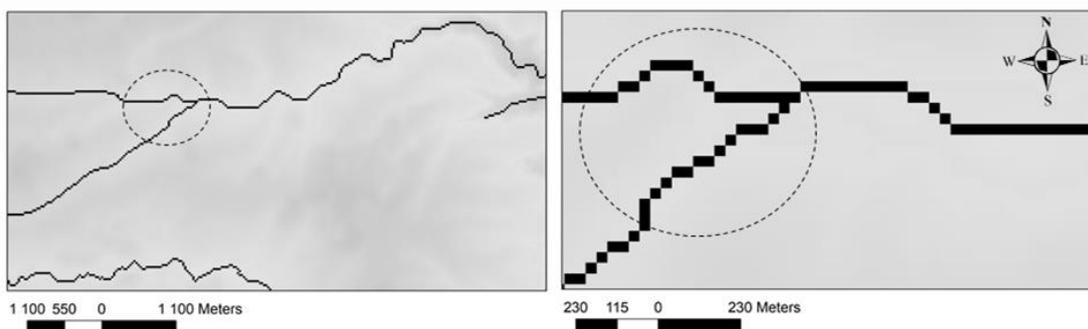


Figura 18: Rede hidrográfica extraída de um MDE (à esquerda) e detalhe da rede ao nível do *pixel* (à direita).

2.4.4 Hierarquização fluvial

A hierarquização fluvial estabelece a classificação de um determinado curso de água (Strahler, 1952, Shreve, 1967) integrado na sua rede hidrográfica. Após essa classificação o curso de água terá um valor associado que é o número de ordem (n). O método de Strahler

é baseado num conjunto de três regras. A primeira regra diz que, os cursos de água que não possuem tributários (as nascentes) são classificados de primeira ordem ($n=1$). A segunda regra diz que a junção de dois ou mais cursos de igual ordem (n) originam um curso de água de ordem de mais uma unidade ($n+1$). A terceira e última regra diz que, a junção de dois ou mais cursos de água de ordem distinta, produz um curso de água de ordem igual à do tributário de maior ordem.

Após a classificação da rede hidrográfica, pode também quantificar-se o número total de segmentos ou cursos de água de cada ordem (N_{So}) e também o comprimento total dos segmentos de cada ordem (Lo). A Figura 19 mostra uma rede hidrográfica classificada (ou ordenada) segundo o método de Strahler.

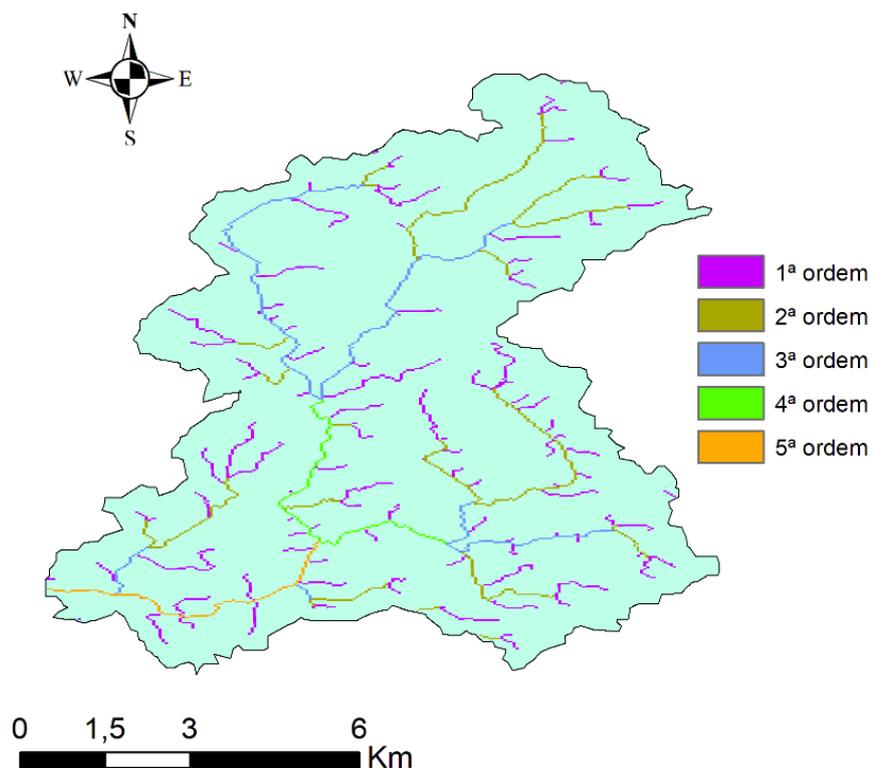


Figura 19: Exemplo de uma rede hidrográfica classificada, utilizando o método de Strahler (Strahler, 1952).

Capítulo III - INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA VOLUNTÁRIA

3.1 Introdução

Goodchild (2007) estabeleceu um termo para descrever o que se designa de Informação Geográfica Voluntária (IGV), fazendo-o como resposta ao crescente fenómeno de criação e partilha via *web* de informação com geolocalização associada. A IGV é criada por voluntários que tendo ou não conhecimentos no domínio da Informação Geoespacial criam e partilham dados geográficos.

A IGV conduz-nos para o conceito de *crowdsourcing* que é um conceito baseado num modelo onde os indivíduos e as organizações obtêm bens e serviços, sendo esses bens e serviços abertos a toda a comunidade, envolvendo grupos de utilizadores de *Internet* que colaboram para a sua disponibilização. As tarefas são distribuídas por todos os participantes (colaboradores), com vista a alcançar um objetivo final cumulativo. Por conseguinte, a IGV está assim relacionada com o conceito de *crowdsourcing*, na medida em que, em alguns projetos mesmo não tendo como principal objetivo a recolha de Informação Geoespacial, a informação recolhida encontra-se georreferenciada, como é o caso das fotografias do projeto *Flickr*.

A contribuição por parte dos voluntários pode ser categorizada em termos de complexidade da tarefa (Haklay, 2013). A IGV é considerada como uma verdadeira fonte de informação geográfica (Goodchild, 2007, Kuhn, 2007). Em diversas localizações do mundo, têm-se realizado várias iniciativas para fornecer diversos tipos de dados, tais como, fotografias, descrições de localizações, classificação da cobertura do solo e dados vetoriais

(e.g. Haklay, 2013), os quais correspondem a uma vasta quantidade de dados disponíveis e acessíveis a qualquer utilizador.

Este tipo de dados pode ser proveniente de diversas fontes tais como, topónimos, itinerário GPS (Global Positioning System), fotografias geo-localizadas no Flickr, aplicações ou *posts* com geolocalização em redes sociais como *Facebook* ou *Twitter*, *blogs*, medições adquiridas por sensores, mapas de completagem topográfica, entre outros (Antoniou e Skopeliti, 2015). A atenção deverá ser direcionada para a origem da informação, para a motivação dos voluntários na recolha e partilha, para o âmbito da IGV e também para o modo como se cria IGV de uma forma implícita ou explícita e em que contexto. A contribuição implícita é feita em sítios da *web* ou em aplicações onde o seu foco é em atividades não relacionadas com o domínio geoespacial. Já as fontes de IGV criadas de forma explícita incentivam os utilizadores a preocuparem-se com questões relativas a localização, sendo esta, uma forma motivacional e organizacional para o assunto. Ambas as fontes de IGV desempenham um papel fundamental na qualidade e valor deste tipo de informação (Antoniou e Skopeliti, 2015).

A IGV é obtida por um vasto número de participantes com diferentes níveis educacionais, níveis de conhecimento e de capacidades (Haklay et al., 2014). O espectro de voluntários sintetizando a discussão apresentada em diversos trabalhos publicados, aponta para cinco categorias (Coleman et al., 2009) listadas a seguir.

- O principiante, ou seja, alguém sem conhecimento formal no assunto, mas possuindo interesse, tempo e vontade de dar a sua opinião sobre o assunto;
- O amador interessado, alguém que descobriu interesse no assunto, começou a ler bibliografia específica e consultou os colegas e especialistas sobre o assunto, experimentou e aplicou e ganhou experiência na apreciação do assunto;
- O especialista amador, alguém que pode conhecer e lidar com um assunto, o pratica apaixonadamente embora, apenas de vez em quando, mas continua a não depender dele para viver;
- O especialista profissional, alguém que estudou e praticou um assunto, depende desse conhecimento para viver e pode ser processado se os seus produtos, opiniões

e/ou recomendações forem comprovadas como sendo incorretas, inadequadas e ou difamatórias;

- Uma autoridade especializada, alguém que estudou vastamente e praticou durante um longo período temporal um assunto até ao ponto em que é reconhecido como sendo um fornecedor de produtos e serviços, e/ou opiniões, consultoria de alta qualidade, podendo perder essa credibilidade mesmo que seja temporariamente.

As questões sobre a privacidade também merecem especial atenção. Privacidade que é definida como “qualquer informação relacionada com um identificador ou pessoa identificada”. De algum modo relacionado com este assunto, Janssen (2011) define o exemplo do “cidadão como sensor”, onde os voluntários são localizados e seguidos. A localização pode também estar relacionada com a localização de outras pessoas. Uma boa forma de contornar esta questão é informar os voluntários sobre os dados que partilham. Estes assuntos considerados de âmbito legal são importantes, no entanto, em muitos casos, não estão claramente especificados, podendo até serem tratados de modo diferente de país para país. É importante por isso que os criadores das plataformas de IGV especifiquem claramente a forma como os dados recolhidos são usados e também se esses dados poderão ser utilizados em outros contextos.

A qualidade de dados geoespaciais é um tópico que merece muita atenção e interesse por parte de académicos e profissionais do domínio da Informação Geoespacial. A principal razão é o fato de a informação geográfica poder eventualmente ser o *input* base para aplicações que operam sobre o espaço físico terrestre.

Quando se procede à avaliação da qualidade dos dados espaciais, a componente base são as características ou elementos que compõem essa qualidade. Esses elementos são fatores que podem ser medidos. A avaliação da qualidade de dados espaciais é baseada na norma ISO 19157 (ISO, 2013), onde inclui especificações em relação à completude, consistência lógica, exatidão posicional, exatidão temática, qualidade temporal e uso ou utilização. A norma é atualmente seguida por muitas fontes não abertas de Informação Geoespacial e tem sido rigorosamente desenvolvida pela comunidade da Geomática. No entanto, esta norma foi desenvolvida num contexto totalmente diferente, pois foi desenvolvida para dados criados por profissionais. É por isso, necessário investigar e explorar formas de determinar a qualidade da IGV utilizando os métodos existentes e, em

paralelo, encontrar novas formas e métodos que se adaptem melhor à natureza da IGV (Antoniou e Skopeliti, 2015).

Apesar das suas limitações a IGV é uma fonte de informação revolucionária que permite aumentar o conhecimento e o comportamento espacial de diferentes fenómenos que ocorrem todos os dias, tais como fenómenos ou eventos políticos, ambientais ou culturais, como por exemplo, a localização de pontos de interesse ou mesmo catástrofes naturais (Capineri, 2016). De referir também que, como uma grande parte desta informação é aberta e está acessível a qualquer cidadão, pode ser útil para fins académicos e de investigação, onde esta poderá ser utilizada na resolução de problemas específicos. O fato de ser informação sem custos e em grande quantidade é outra vantagem. De referir também que, este tipo de informação (IGV) pode alcançar regiões do mundo remotas onde é difícil recolher dados *in loco*. A IGV combina tecnologia, práticas sociais e relações entre cidadãos. Uma das plataformas de IGV mais famosas é o OpenStreetMap (Arsanjani et al., 2015), cujos dados relativos a linhas de água (entidade geográfica “*waterway*”) foram usados na presente tese e que será descrito na seção seguinte (3.2).

3.2 OpenStreetMap

3.2.1 O Projeto OSM

O OSM é um projeto colaborativo que cria e distribui dados geográficos de todo o mundo em acesso aberto. Foi idealizado para criar e fornecer conjuntos de dados geográficos a partir dos contributos de cidadãos voluntários (e.g. Al-Bakri e Fairbairn, 2010). O projeto OSM tornou-se numa iniciativa de mapeamento que cresceu rapidamente (Haklay e Weber, 2008) e que atraiu a atenção de vários investigadores (Mooney, 2015).

A comunidade OSM é atualmente composta com quase 5 milhões de utilizadores registados em todo mundo (https://www.openstreetmap.org/stats/data_stats.html).

Foi fundado em 2004 com base numa ideia lançada por um aluno de mestrado, Steve Coast, que viria a ser incluída na sua tese e que consistiu no seguinte: Se um cidadão começar a mapear a zona onde reside, zona que bem conhece, e se um outro cidadão proceder da mesma forma, então esta ideia poderá ser extrapolada a todos os cidadãos e desta forma se conseguirá mapear o mundo. Desde então, os dados OSM foram usados em diversas aplicações localizadas em distintas regiões do mundo.

3.2.2 Os dados OSM

A base de dados OSM inclui uma coleção de objetos em formato vetorial, baseados na geometria de ponto, linha e relação (Fonte et al., 2016). Esta base de dados tornou-se assim, a maior e a mais diversificada do mundo (Brovelli et al., 2016), ela inclui centenas de objetos que são criados e atualizados diariamente por milhares de voluntários distribuídos por todo mundo. E esta dimensão de dados de acesso livre fez com que a sua exploração e uso crescesse e até fosse aplicada em áreas onde não existia qualquer tipo de mapas.

A informação OSM é adquirida por cidadãos voluntários que recolhem e editam entidades geográficas em formato vetorial e que representam objetos do mundo real, tais como: estradas, redes hidrográficas, edifícios, zonas verdes, pontos de interesse, entre outros. Os voluntários podem criar diversos tipos de entidades, recorrendo a uma lista disponível em: http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map_Features, podendo no entanto, acrescentar outros elementos para além dos incluídos na lista. O OSM utiliza o modelo de dados vetorial, sendo as entidades representadas por pontos, linhas e relações. Por exemplo, um ponto representa uma entidade geográfica pontual e é posicionado com as suas coordenadas geográficas, latitude e longitude. Uma linha é constituída por uma lista ordenada de nós, ela pode ser aberta ou uma linha fechada. O primeiro tipo de linha pode representar objetos como estradas, cursos de água e linhas férreas, já as linhas fechadas poderão representar rotundas, percursos circulares, entre outros. A relação é um dos principais elementos dos dados e consiste em uma ou mais *tags* e também uma lista de um ou mais nós, linhas e/ou relações, sendo usadas para definir as relações lógicas ou relações geográficas entre outros elementos, por exemplo, na representação de um edifício que na parte interior tem um vazio. Nesta situação serão usadas duas linhas fechadas, uma para representar o limite exterior do edifício e outra para representar o limite interior do edifício.

Cada objeto deve ter pelo menos um atributo ou *tag* que contem uma *key* e um *value* que permite descrever as suas características. A Figura 20 exemplifica a lista de elementos sugeridos no OSM para a representação de cursos de água naturais, utilizados nesta tese, correspondendo à *key waterway* e aos respetivos *values*, como por exemplo, *rivers*, *riverbank* e *streams*.

A criação de dados OSM é conseguida principalmente através de três formas:

- i) Digitalização sobre imagens aéreas e de satélite;
- ii) Através de trilhos (itinerários) feitos com equipamento de posicionamento por satélite, ou outro tipo de equipamento de levantamento topográfico de aquisição de dados;
- iii) Através do carregamento de conjuntos de dados geográficos abertos (importação em massa).

Key	Value	Element	Description	Image	Count
waterway	river		The linear flow of a river, in flow direction.		2 420  1 201 659  16 579 
waterway	riverbank		A wide river as defined by its area.		44  264 016  49 261 
waterway	stream		A naturally-forming waterway that is too narrow to be classed as a river.		6 235  11 746 257  19 851 
waterway	tidal_channel		A natural intertidal waterway in mangroves, salt marshes and tidal flats with water flow in the direction of the tide		0  947  0 

Figura 20: Exemplo da *key* e *value* da entidade *waterway* do OSM. (Fonte: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map_Features#Natural_watercourses)

3.2.3 Qualidade dos dados OSM

Os dados OSM contêm erros e esses erros provêm de múltiplas origens. Sendo criados por voluntários utilizando abordagens que podem ser de vários tipos (por exemplo, digitalização sobre imagens de satélite ou recolha de dados em campo utilizando um *smartphone* ou o GNSS (Sehra et al., 2016), estes possuem diversos erros. Alguns desses

erros são, por exemplo, áreas que não se encontram fechadas, caminhos sem nós, pontos de interesse sem nome, entre outros. Outros tipos de situações que podem ocorrer e que influenciam a qualidade da informação OSM são:

- ✓ Existência de vandalismo (Truong et al., 2018) com inserção errada de dados de forma propositada;
- ✓ Divergência de interpretações;
- ✓ Falta de qualidade e/ou baixa resolução das imagens usadas para digitalização de elementos visíveis;
- ✓ Baixa resolução das imagens utilizadas para fazer a digitalização;
- ✓ Enganos ou falhas, entre outros.

Assim, observam-se inconsistências e heterogeneidade de dados, principalmente em relação à completude e qualidade posicional (e.g. Haklay, 2010, Zielstra e Zipf, 2010, Ribeiro e Fonte, 2015, Antoniou e Skopeliti, 2017).

A qualidade de dados do OSM é um tópico que tem merecido interesse e atenção em muitos estudos. Assiste-se a um crescimento ao longo dos anos do número de publicações científicas produzidas pela comunidade académica no domínio do OSM. Até as agências de produção cartográfica estão atentas à qualidade dos dados do OSM (Olteanu-Raimond et al., 2017), em virtude do seu grande potencial de utilização, nomeadamente para resolução de problemas emergentes na sociedade atual, e pelo facto do OSM ter atualmente, um significativo grau de atratividade de voluntários e colaboradores. Vários aspetos relacionados com a qualidade de dados do OSM (e.g. erros posicionais, erros de natureza temática e outros) têm sido estudados em diferentes regiões do mundo, principalmente na zona central da Europa e algumas regiões da América do Norte (Goodchild e Li, 2012, Ali et al., 2016, Mooney e Minghini, 2017).

Os métodos de avaliação da qualidade dos dados OSM podem ser subdivididos em dois grupos: os de validação interna e os de validação externa. A validação interna pode ser baseada em verificações ao nível do utilizador ou poderá ser baseada em regras automatizadas e pré-definidas, as quais permitem detetar e corrigir enganos e erros. Foram introduzidas dezassete regras (Pourabdollah et al., 2013) que manualmente verificam a

qualidade da geometria dos dados e dos atributos do OSM. Estas regras são baseadas em pressupostos lógicos sobre a informação geográfica, por exemplo, ao cruzar uma estrada com uma linha de água terá de haver uma ponte ou um túnel. Existe ainda um número de ferramentas para elaboração de relatórios de erros, onde as mais conhecidas são a “Notes” (<https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Notes>).

Os métodos de validação externa baseiam-se na comparação dos dados OSM com bases de dados de referência. Vários investigadores têm analisado a qualidade dos dados do OSM utilizando essa metodologia (e.g. Zielstra e Zipf, 2010, Haklay, 2010, Girres e Touya, 2010). Haklay (2008) desenvolveu uma comparação detalhada dos dados OSM no Reino Unido com os dados do Ordnance Survey. Na Irlanda foi comparada a exatidão do OSM com *Google Maps* e *Bing Maps* (Cipeluch et al., 2010). Zielstra e Zipf (2010) conduziu na Alemanha uma comparação dos dados OSM com os dados *TeleAtlas*, produzindo métricas para a completude, exatidão posicional, exatidão dos atributos (ou exatidão temática) e desigualdade na participação.

Em termos gerais a literatura evidencia uma heterogeneidade ao nível da qualidade dos dados do OSM ao longo das regiões do mundo, podendo esta até exceder a qualidade de dados de acesso fechado (Brovelli et al., 2016).

Na presente tese a avaliação da qualidade dos dados do OSM usados foi realizada utilizando a segunda abordagem, onde a posição das linhas de água do OSM foi comparada com a posição das linhas de água produzidas por entidades oficiais, que serviram de referência, nomeadamente o CIGeoE (Centro de Informação Geoespacial do Exército) em Portugal e o Ordnance Survey no Reino Unido.

A cobertura de dados OSM é como se pode visualizar pelos dois exemplos da Figura 21 diferente de região para região do mundo, sendo que, são as zonas urbanas as que apresentam as maiores percentagens de cobertura (Neis e Zipf, 2012), o que se percebe pois, é nas zonas urbanas que residem mais voluntários para recolher e criar informação OSM e também para motivarem novos voluntários. Na Figura 21 a) e b) podem visualizar-se duas regiões urbanas que foram acedidas na página do OSM respetivamente: a) uma cidade portuguesa (Guarda) e b) a cidade de Londres. Facilmente se destaca a diferença

em termos de cobertura de dados numa e noutra cidade, onde Londres apresenta uma cobertura muito superior à observada na cidade portuguesa.

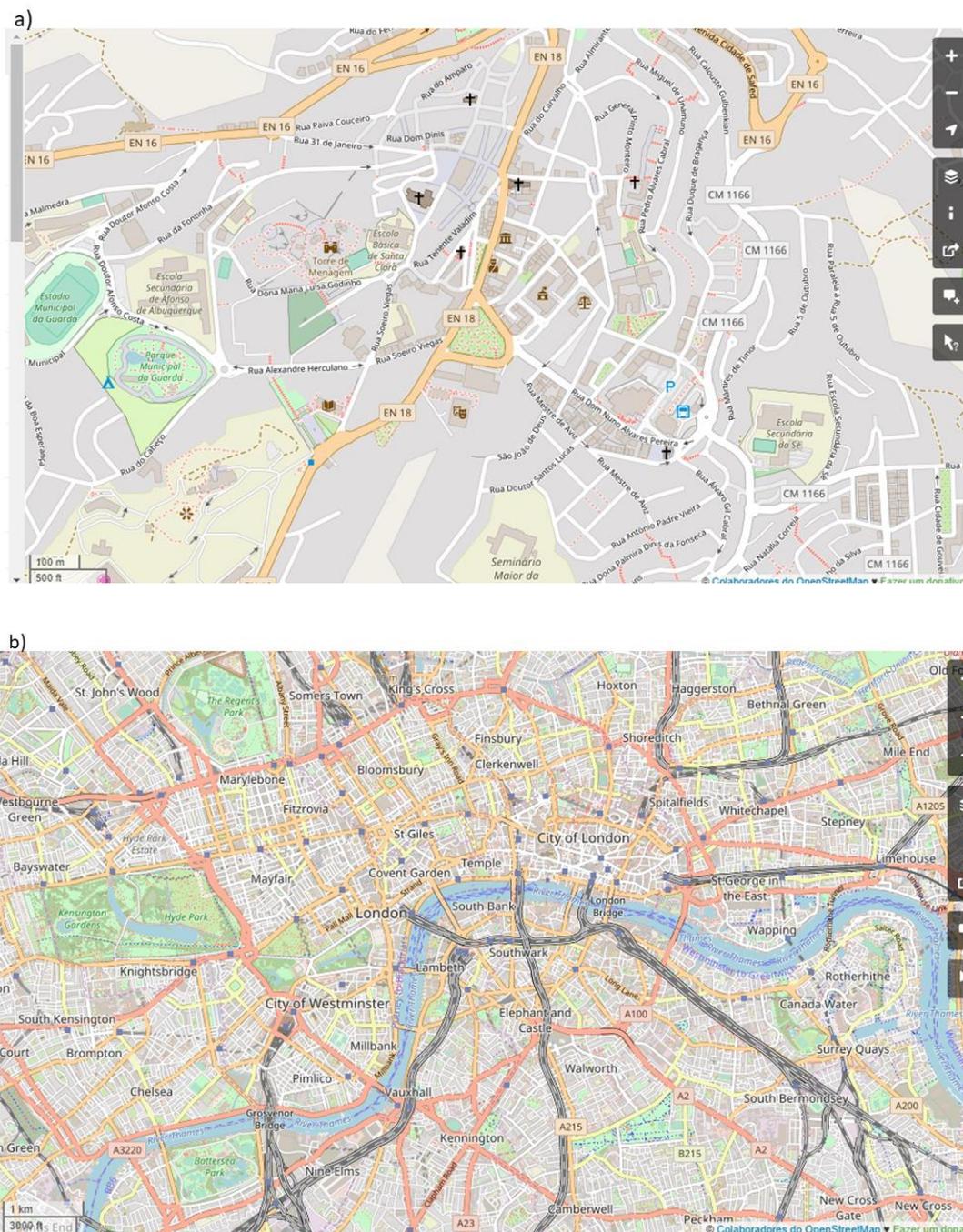


Figura 21: Cobertura de dados OSM em duas zonas urbanas de duas cidades europeias: a) a cidade da Guarda, em Portugal a) e na cidade de Londres, na Inglaterra b).

Em determinadas regiões remotas do mundo a cobertura de dados OSM é escassa, sendo que, as linhas de água aparecem como os primeiros objetos representados nessas regiões. Isto provavelmente é devido ao facto de as linhas de água serem entidades geográficas mais fáceis de identificar na imagem de satélite, mas também pela extensão que ocupam. A Figura 22 representa dois exemplos dessas regiões: a) localizada no Brasil (América do Sul) e b) localizada em Angola (Africa).

Tanto num como noutro caso observa-se que as linhas de água são uma das poucas entidades geográficas representadas.

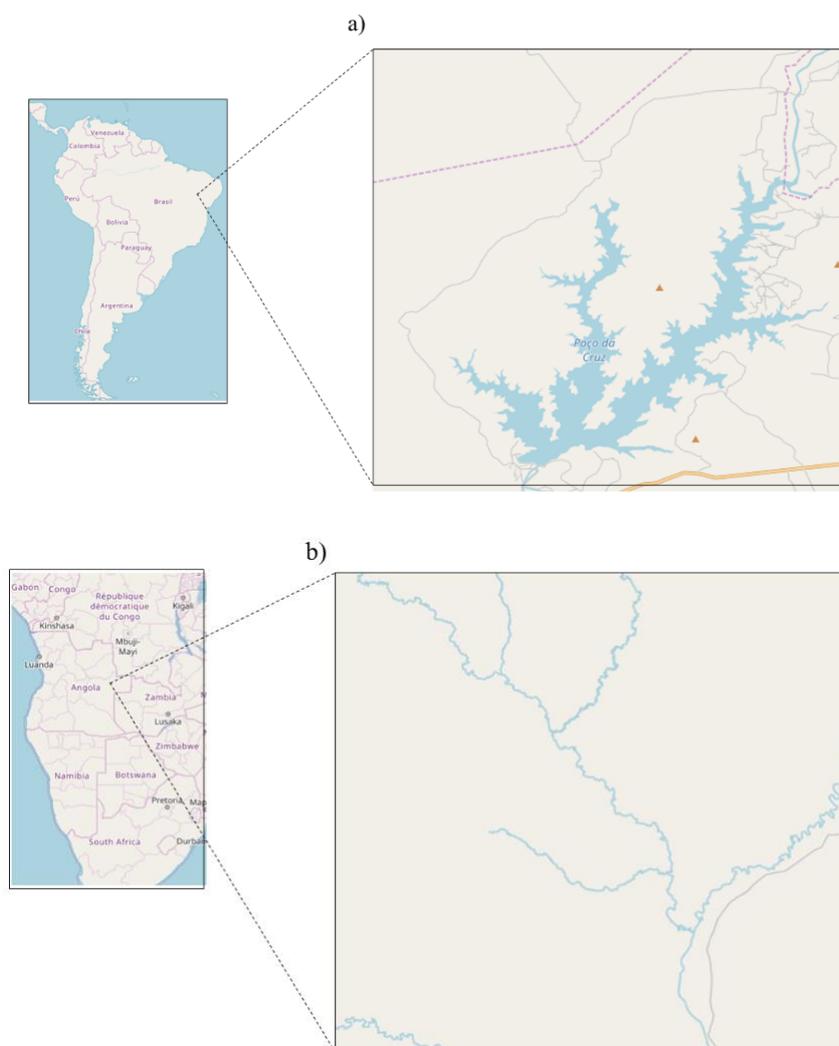


Figura 22: Exemplos de regiões do mundo de baixa cobertura de informação OSM: a) Brasil (América); b) Angola (Africa).

Tem-se verificado que a completude dos dados OSM está de certa forma correlacionada com o volume de dados recolhidos na plataforma que está por sua vez relacionada com a densidade populacional da região. Assim, a densidade populacional está positivamente correlacionada com a completude, bem como, com a exatidão posicional dos dados (Girres e Touya, 2010, Neis et al., 2013, Mullen et al., 2014). No entanto, o OSM é uma plataforma dinâmica, portanto a sua qualidade está em constante mutação.

A heterogeneidade da cobertura de dados do OSM, assim como o facto de não existirem especificações técnicas para a sua recolha, leva a que a completude dos dados do OSM não seja uma tarefa simples de analisar (avaliar). Habitualmente o que se faz é, analisar os dados do OSM seguindo normas (especificações técnicas) dos dados geográficos produzidos pelas agências oficiais de produção cartográfica.

Capítulo IV - METODOLOGIA PARA MELHORAR A EXATIDÃO DE MDEGs E DE PARÂMETROS DERIVADOS

4.1 Introdução

A metodologia desenvolvida tem como objetivo principal a criação de novos MDEs utilizando altimetria derivada dos MDEGs e de IGV, a partir dos quais é possível extrair linhas de água com maior exatidão planimétrica e altimétrica em relação às linhas de água extraídas dos modelos originais, permitindo também melhorar a exatidão de alguns parâmetros topográficos, como por exemplo, o limite da bacia hidrográfica. Assim, recorrendo a informação planimétrica extraída do OSM (linhas de água) e pontos cotados derivados dos MDEGs originais, utilizando um método de interpolação adequado (ANUDEM), serão criados novos modelos a partir dos quais serão extraídos novos parâmetros, e.g. linhas de água, limite da bacia, declive, entre outros.

A metodologia pode ser dividida em quatro passos: 1) a preparação dos dados OSM; 2) geração do novo MDE recorrendo a pontos cotados derivados do MDE original e as linhas de água do OSM; 3) extração das redes hidrográficas, declive e limites de bacias do MDE original e do MDE reconstruído; 4) avaliação da exatidão do novo MDE, das redes hidrográficas, do declive e delimitação de bacias extraídas do MDE original e do MDE reconstruído, seguido da comparação dos resultados obtidos com o MDE original e com o MDE modificado com os resultados obtidos utilizando o MDE de referência e os dados deles extraídos com os dados de referência. A Figura 23 apresenta o fluxograma global

que integra a sequência de todos os processos. Nas secções seguintes deste capítulo far-se-á uma descrição detalhada das fases incluídas na metodologia.

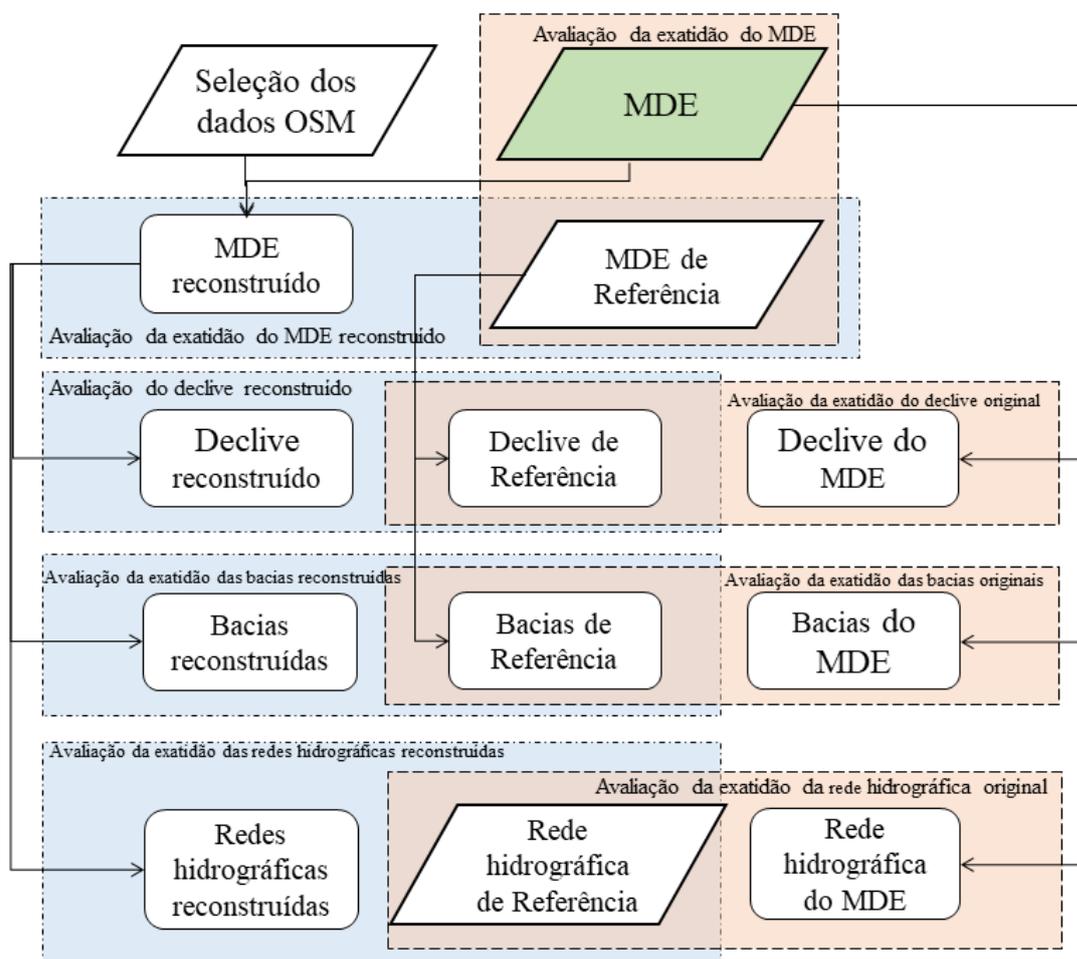


Figura 23: Fluxograma geral dos processos para obtenção dos MDEs reconstruídos, para análise da exatidão do MDE original e dos MDEs reconstruídos, bem como da exatidão das redes hidrográficas, do declive, da delimitação das bacias extraídas dos MDEs originais e dos MDEs modificados.

4.2 Reconstrução do MDE

4.2.1 Preparação dos dados OSM

A metodologia inicia-se com a preparação dos dados do OSM, selecionando os *values rivers* e *streams* da *key waterway* que são os que correspondem a linhas de água. De acordo com o descrito na seção 3.2.2, os dados OSM, sendo recolhidos por voluntários, poderão apresentar determinadas incorreções de ordem geométrica e/ou temática. Assim, pode acontecer que estejam inseridas nas bases de dados do OSM linhas que, apesar de conectadas com a rede principal como é o caso da Figura 24 a) e c), não existam na verdade. Na Figura 24 a) e c) pode ver-se assinalado com setas de cor branca dois exemplos claros dessa situação. Na Figura 24 b) e d) pode ver-se a imagem de satélite da zona apenas com a localização da rede de referência (azul). A ocorrência de tais linhas no OSM que embora conectadas com a rede principal OSM, não correspondendo a linhas de água, deverão ser detetadas e posteriormente removidas. Nos dois exemplos mostrados (Figura 24 a) e c)) pode ver-se que essas linhas são caminhos que atravessam campos agrícolas ou são confundidas com os limites das propriedades agrícolas.

Uma outra situação que pode acontecer é a existência de linhas OSM isoladas da rede existente no OSM, em zonas (locais) que indicam que dificilmente poderá existir aí uma linha de água. A Figura 25 a) e c) ilustra dois exemplos evidentes onde se vê que as linhas aí representadas não poderão definir cursos de água. No primeiro caso a) pode ver-se uma linha fechada, que poderá ter sido digitalizada incorretamente sobre uma zona florestal. De referir que, eventualmente o voluntário poderia estar a querer representar outro tipo de objeto e poderia tê-lo inserido, classificando-o como sendo uma linha de água, sendo este um outro tipo de erro que pode suceder.

No segundo caso da Figura 25 c), embora esteja aí representado uma linha, ela localiza-se transversalmente aos limites da própria propriedade agrícola, o que leva a crer que de fato, não se trata de uma linha de água. Na Figura 25 b) e d) podem ver-se as duas situações sobre a imagem de satélite.

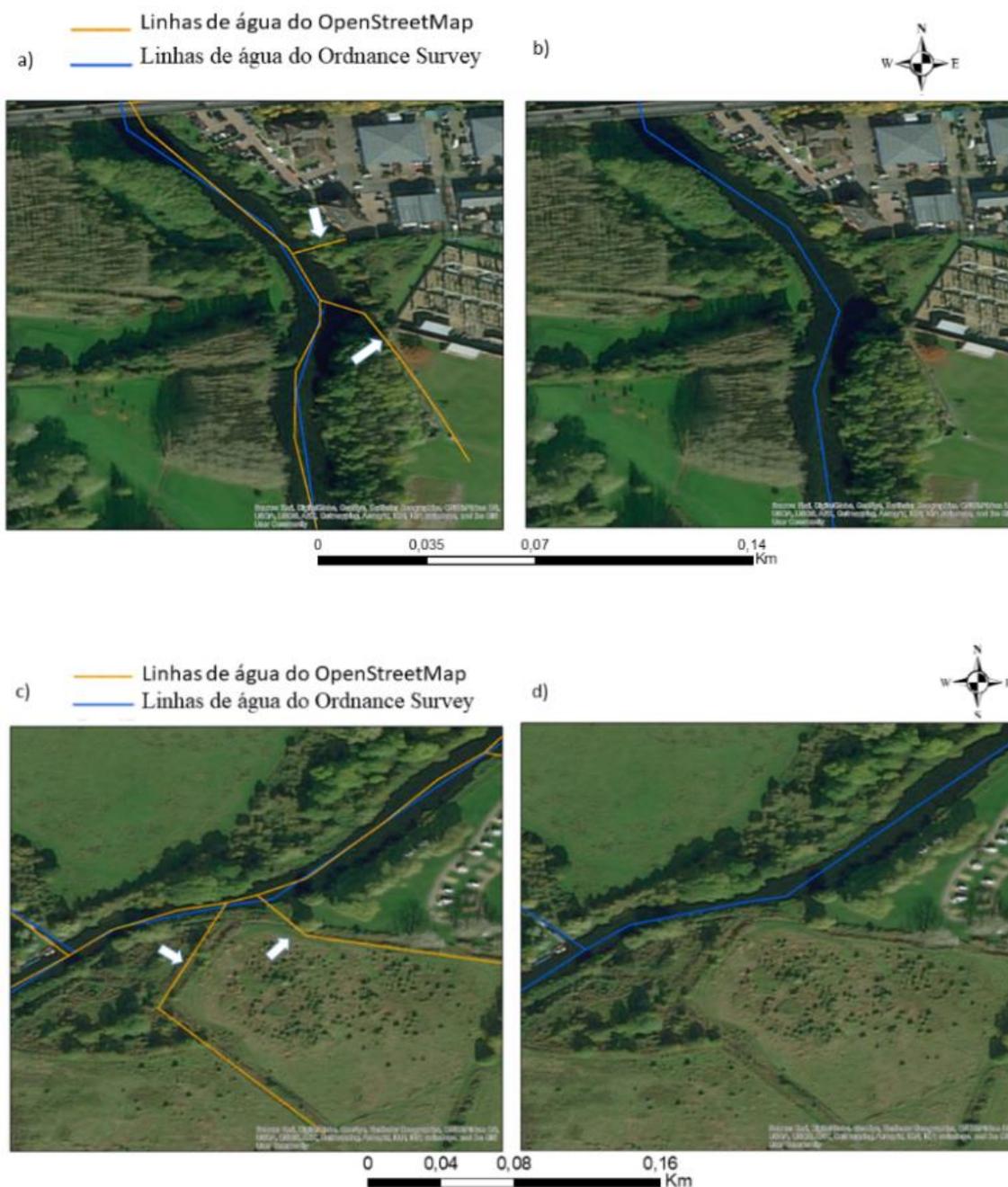


Figura 24: a) e c) linhas de água do OSM que foram removidas (assinaladas com setas de cor branca); b) e d) imagem de satélite já sem as linhas do OSM.



Figura 25: a) e c) linhas de água do OSM que foram removidas da rede hidrográfica usada para criar o novo MDE; b) e d) imagem de satélite das zonas referentes à localização dessas linhas do OSM.

Um outro aspeto relevante a referir para esta aplicação e presente nas linhas de água do OSM é a sua orientação, que pode não estar definida de montante para jusante. De referir que, os processamentos realizados com as ferramentas hidrológicas, nomeadamente o método de interpolação utilizado, ANUDEM, exige que a rede esteja devidamente orientada de montante para jusante. Como esta restrição não é contemplada nos protocolos de aquisição de dados do OpenStreetMap, em toda a área de estudo, as linhas OSM deverão ser verificadas e corrigidas em termos de orientação.

A verificação e correção da orientação das linhas de água pode ser feita com ferramentas do *software* de SIG. Caso se utilizem as ferramentas do *software* ArcGIS, recorre-se a simbologia específica que define a orientação dos segmentos que compõem a rede. Se a orientação estiver incorreta, utiliza-se a ferramenta *flip* disponível no *Editor toolbar* para fazer a respetiva correção. A Figura 26 a) mostra um exemplo de uma linha de água que tinha orientação de jusante para montante e que foi reorientada de montante para jusante.

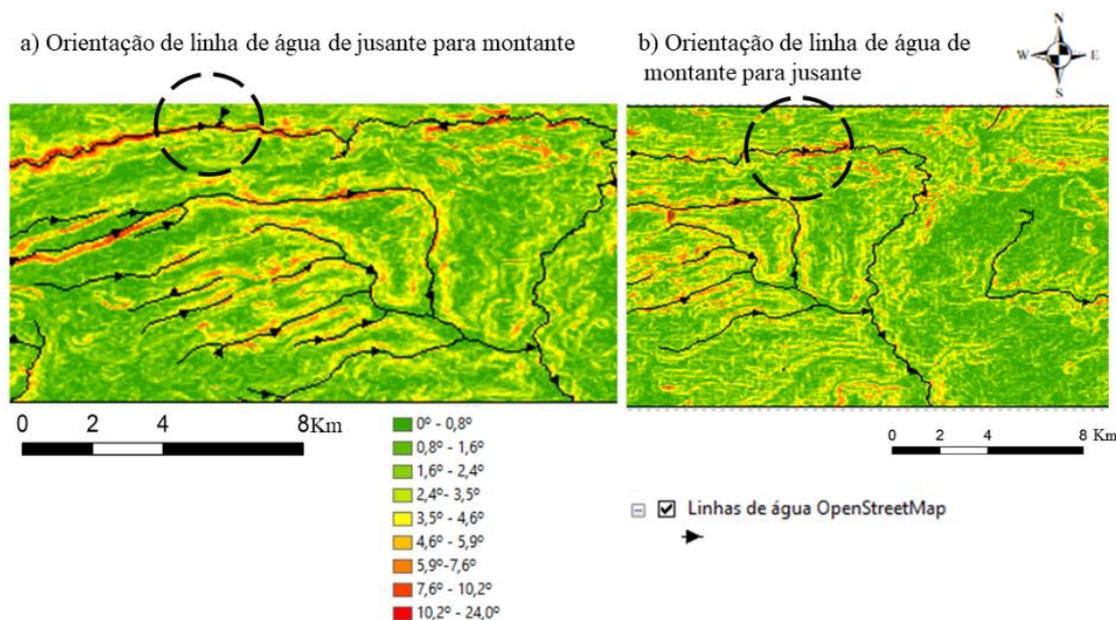


Figura 26: a) Exemplo de uma linha de água do OSM com orientação invertida, envolvida no retângulo a traço interrompido e b) linha de água do OSM já com a orientação correta e como fundo o declive gerado a partir do MDE reconstruído utilizando a rede OSM retificada.

Pode ver-se sobre o mapa de declive gerado a partir do MDE reconstruído utilizando essa linha de água orientada de jusante para montante, um declive anormalmente abrupto (artefacto de cor avermelhada). Já na Figura 26 b) pode ver-se a mesma linha de água do OSM já com a orientação corrigida de montante para jusante, assim como, o mapa de declive (gerado a partir do MDE usando essa linha de água do OSM) onde esse efeito (artefacto) já não é visível.

Todo o processo de preparação dos dados do OSM pode ser ilustrado no fluxograma apresentado na Figura 27.

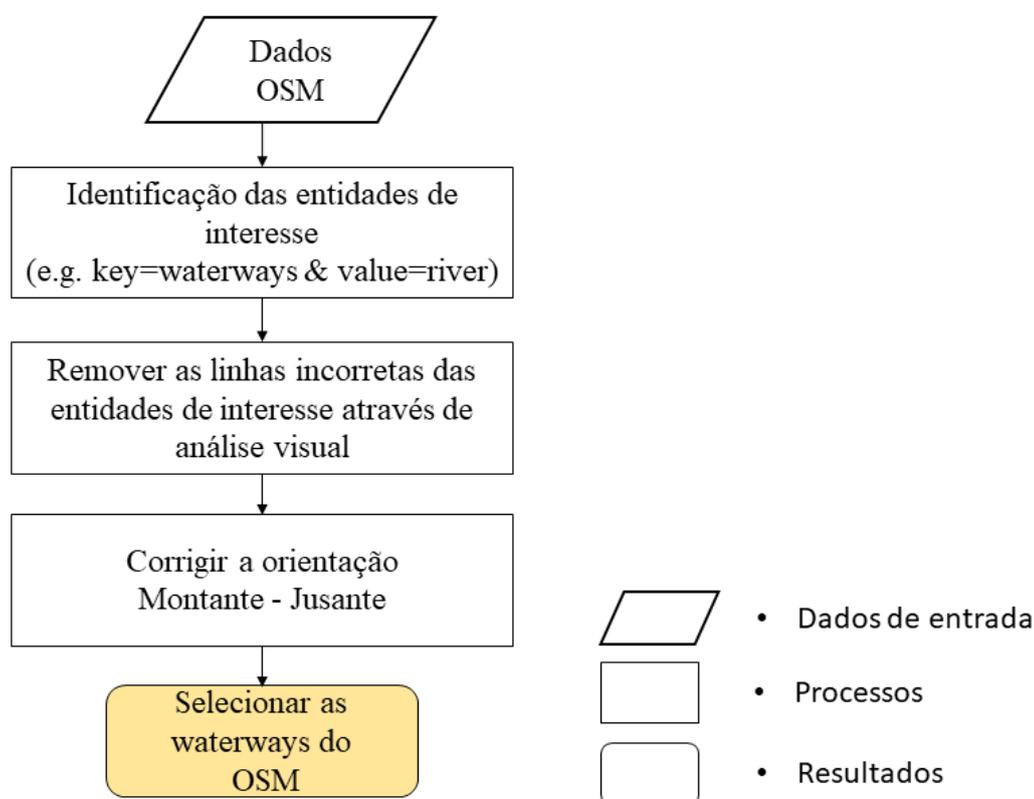


Figura 27: Fluxograma que inclui os processos de processamento da rede do OSM a ser utilizada na criação do novo MDE.

Se este procedimento de orientação das linhas de água não for feito para todas elas, geram-se zonas com morfologia errada no modelo criado (artefactos) quando as mesmas são utilizadas com orientação invertida. No entanto, gerando o mapa de declives a partir desse modelo, é muitas vezes possível identificar as zonas onde existiam orientações

incorretas, pois coincidem com zonas de declives anormalmente abruptos. Por isso, se no processo de verificação da orientação da rede, alguma linha com incorreta orientação não tiver sido detetada, este problema poderá ser identificado utilizando o mapa de declive e observando as zonas de declive acentuado.

4.2.2 Criação dos novos MDEs

A metodologia utilizada para a criação dos novos MDEs a partir dos MDEGs usando a rede hidrográfica do OSM foi apresentada em Monteiro et al. (2018a). O processo tem início com a transformação (conversão) do MDE original em formato matricial em pontos cotados. Esta conversão é realizada com ferramentas de *software* de SIG *raster to points*. O processo de conversão gera para cada *pixel* (célula) um ponto cotado, posicionado no centro de cada *pixel*. Estes pontos cotados e as linhas de água do OSM, bem como o limite da área de estudo constituem os dados de entrada (*input*) para o método de interpolação ANUDEM (Hutchinson et al., 2011) que foi aplicado para a criação de uma nova superfície topográfica. A ferramenta do *software* ArcGIS utilizada para realizar o método de interpolação foi *Topo to raster*. O fluxograma apresentado na Figura 28 inclui os procedimentos para a criação dos novos MDEs. Tendo em conta que poderá haverá menor exatidão na digitalização de *streams*, do que na digitalização dos *rivers* devido à sua mais difícil identificação na imagem de satélite, num dos estudo de caso a apresentar (estudo de caso 3), foram assim criados dois novos MDEs, um utilizando *rivers* e *streams* outro utilizando apenas *rivers*. A Figura 28 mostra o fluxograma relativo à construção dos novos MDEs.

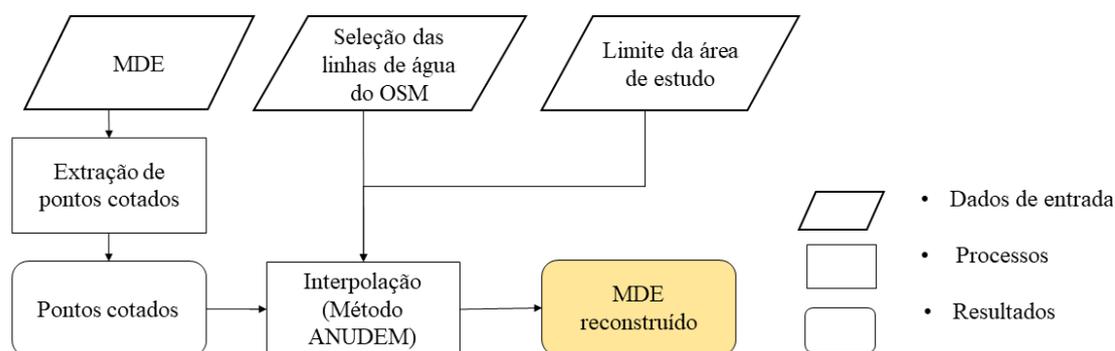


Figura 28: Fluxograma que inclui os processos de criação dos novos MDEs.

4.2.3 Extração das redes hidrográficas a partir dos MDEs

As redes hidrográficas são extraídas dos MDEs originais e dos MDEs reconstruídos com base no exposto em 2.4.3 e recorrendo ao algoritmo D8 (Pelletier, 2013, Monteiro et al., 2015, Azeredo Freitas et al., 2016, Shrivastava et al., 2017, Monteiro et al., 2018a). Inicialmente tratam-se as imperfeições do modelo (*fill sinks*) para depois extrair a direção do escoamento e o valor do escoamento acumulado. Selecionando o nível crítico (NC) tendo por base a descrição efetuada em 2.4.3, extraem-se as redes hidrográficas do MDE original e do MDE reconstruído. Todos os processamentos podem ser efetuados com *software* de SIG, sendo que, na presente tese utilizaram-se as ferramentas do *software* ArcGIS. A Figura 29 mostra o fluxograma que inclui os processos necessários para a extração das redes hidrográficas.

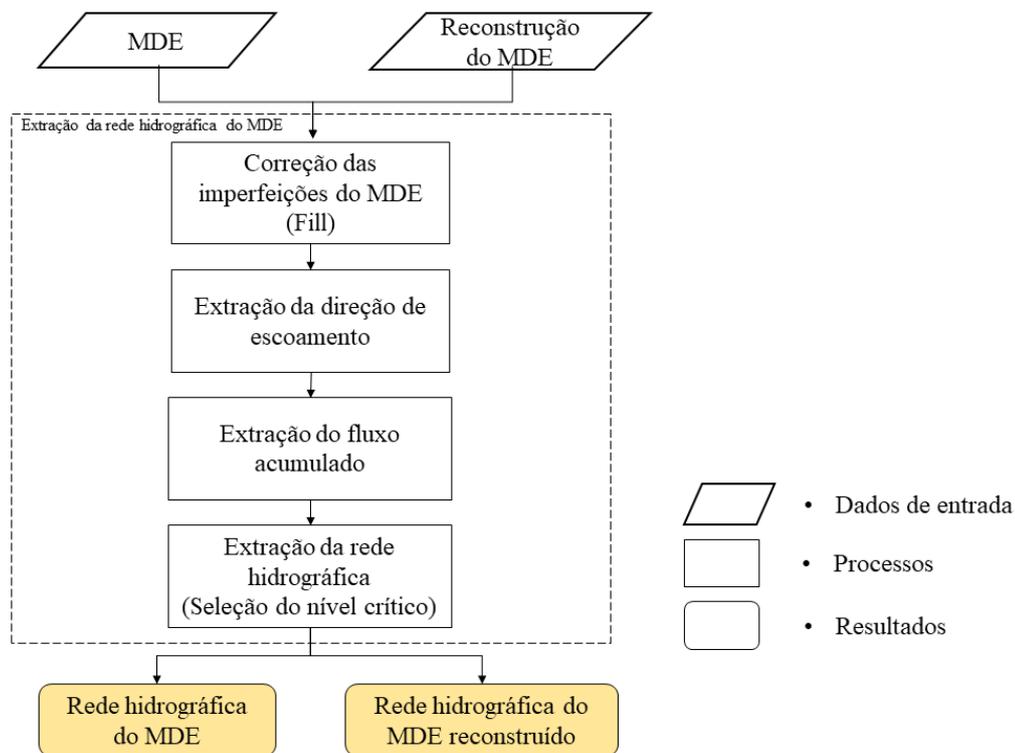


Figura 29: Fluxograma que inclui os processos para extração das redes hidrográficas a partir dos MDEs.

4.3 Cálculo do declive e geração da bacia hidrográfica

O mapa de declive foi calculado para cada MDE utilizando a ferramenta *slope* do software ArcGIS. O mapa gerado pode ser calculado em percentagem ou em graus.

As bacias hidrográficas foram geradas a partir do MDE de referência, e dos outros MDEs em análise (os MDEs ASTER, SRTM 90, SRTM 30 e SRTM 30 reconstruídos usando *rivers* e *streams* e o MDE SRTM 30 reconstruído utilizando apenas *rivers*). Para a geração de áreas contributivas a montante de determinados pontos (*pour points*), estes foram definidos sobre a matriz de acumulação de escoamento e de seguida, recorrendo à ferramenta *watershed*, são geradas as bacias.

A Figura 30 ilustra o processo da geração da bacia, utilizando a matriz de direção de escoamento e o conjunto de *pour points* que necessita de ser definido sobre as linhas de água o que é conseguido através da ferramenta *Snap pour points* e da matriz de acumulação de escoamento. Os processamentos foram realizados no software ArcGIS.

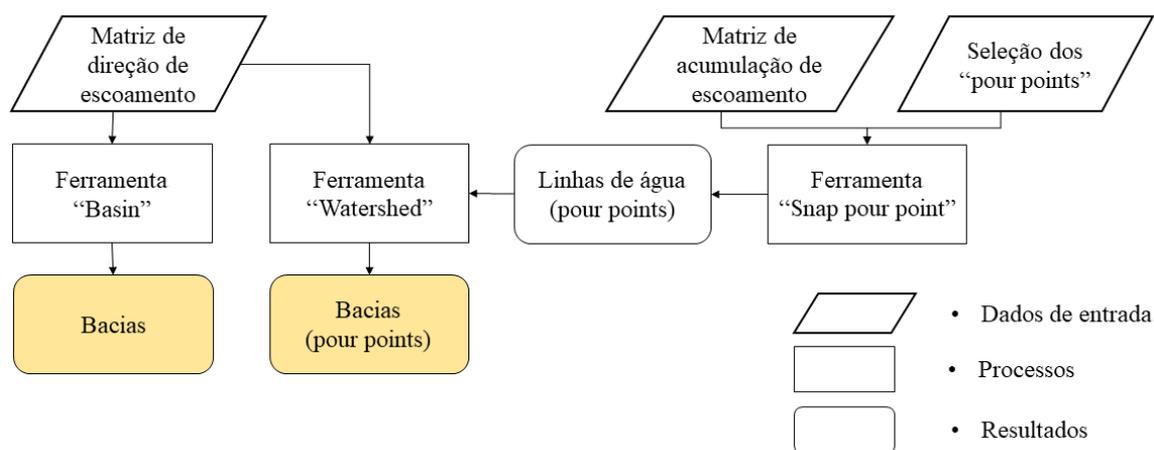


Figura 30: Fluxograma que inclui os processos para geração de bacias dos *pour points* e das respectivas áreas contributivas.

4.4 Avaliação da exatidão do MDE e do declive

A exatidão dos MDEs original e do MDEs reconstruídos foi avaliada calculando as diferenças de elevação para todos os n pixels P_k onde ($k = 1, \dots, n$) entre o MDE de referência (MDE_{Ref}) e cada um dos MDEs em análise ($MDE_i(P_k)$). Esta análise foi feita utilizando a ferramenta *Minus* que faz a subtração dos dois modelos de acordo com a equação (3) do Capítulo II (pag. 45).

A média ($\overline{MDE_Dif_i}$) é calculada assim como o desvio padrão ($\sigma_{MDE_Dif_i}$) e a raiz quadrada do erro quadrático médio ($REQM_{MDE_Dif}$) das diferenças entre o MDE de referência e cada um dos outros MDEs em análise, utilizando as equações (4), (5) e (6) do Capítulo II (pag. 45) respetivamente, onde n é o número de pixels (células). A exatidão dos mapas de declive gerados, foi obtida pelo mesmo procedimento, ou seja, calculando as diferenças entre o declive obtido a partir do modelo de referência e o declive obtido a partir dos vários MDEs em análise, utilizando a equação (16).

$$Declive_Dif_i(P_k) = Declive_{Ref}(P_k) - Declive_i(P_k) \quad (16)$$

A média, desvio padrão e a raiz quadrada do erro o quadrático médio das diferenças de declive obtidas é calculado utilizando as equações (17), (18) e (19).

$$\overline{Declive_Dif_i} = \frac{\sum_{k=1}^n Declive_Dif_i(P_k)}{n} \quad (17)$$

$$\sigma_{MDE_Dif_i} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (MDE_Dif_i(P_k) - \overline{MDE_Dif_i})^2}{n}} \quad (18)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (Declive_Dif_i(P_k))^2}{n}} \quad (19)$$

4.5 Avaliação da exatidão das redes hidrográficas

Exatidão horizontal

O procedimento utilizado para avaliar a exatidão horizontal da rede hidrográfica extraída do MDE original e dos MDEs reconstruídos é o método descrito em Monteiro et al. (2018b), onde a comparação é feita com a rede hidrográfica de referência. Para essa comparação é gerado um *buffer* em torno da rede hidrográfica de referência, cuja largura necessita de ser identificada para cada região, de modo a identificar as secções de rede hidrográfica em análise que pode ser considerada como correspondente às secções da rede hidrográfica de referência. De seguida, as redes hidrográficas em análise são transformadas em pontos e determina-se a distância horizontal (D_i) de cada ponto da rede em análise à rede de referência, dentro da área considerada para o *buffer*. Por fim, calcula-se a média (m), o desvio padrão (σ) e a raiz quadrada do erro quadrático médio ($REQM$) das distâncias horizontais. A Figura 31 ilustra o cálculo da distância de pontos da rede hidrográfica gerada a partir de um MDE à rede hidrográfica de referência. A Figura 32 mostra o fluxograma do processo de avaliação da exatidão posicional. A média, o desvio padrão e a raiz quadrada do erro quadrático médio das distâncias horizontais são calculadas.

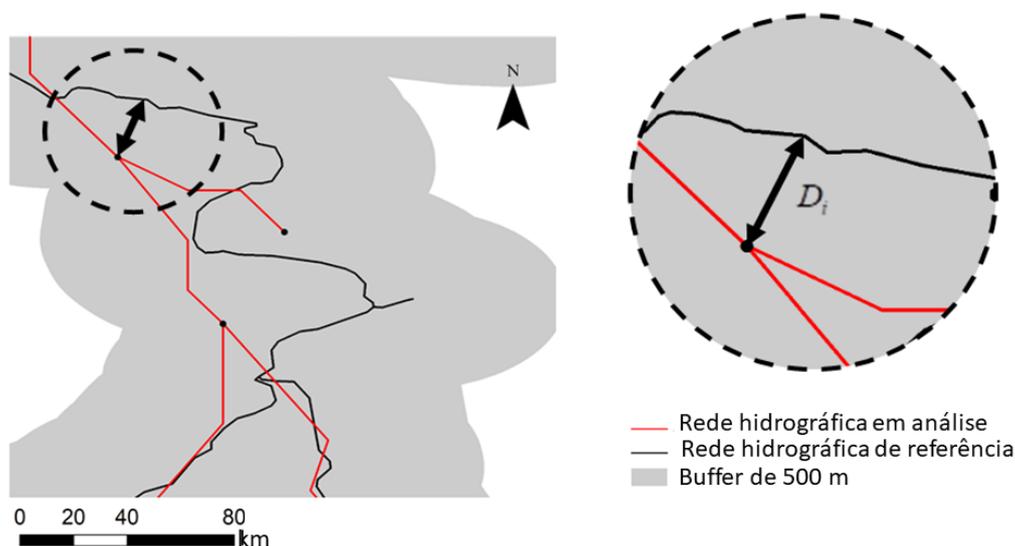


Figura 31: Cálculo da distância de um ponto da rede hidrográfica extraída de um MDE à rede hidrográfica de referência.

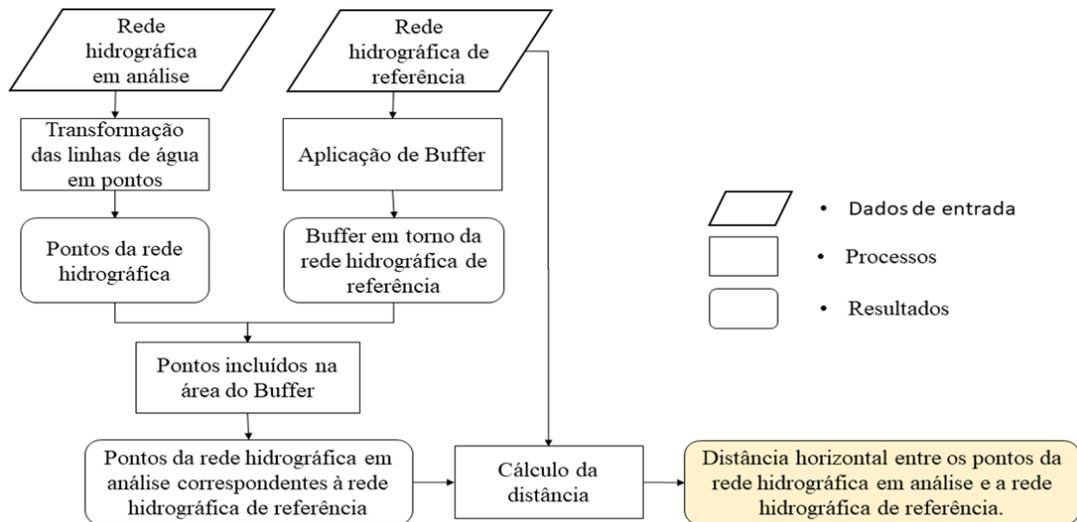


Figura 32: Fluxograma que inclui os processos para avaliação da exatidão horizontal das redes hidrográficas.

Exatidão vertical

A exatidão vertical das redes hidrográficas em estudo foi analisada considerando a seguinte metodologia. Após a conversão das redes hidrográficas em m pontos Q_j , onde $j = 1, \dots, m$, associa-se a cada um dos m pontos a altitude extraída do MDE de referência e dos MDEs em análise (nomeadamente o MDE original e o MDE reconstruído). Tal permite calcular nos pontos Q_j as diferenças de altitude DN_Dif_i , entre o modelo de referência (MDE_{Ref}) e os MDEs em análise (original e reconstruído) (MDE_i), de acordo com o indicado na equação (20), onde o i representa cada MDE em estudo. Esta análise poderá ser efetuada para toda a área em estudo, ou apenas em determinadas zonas com diferentes características de modo a poder entender-se a variabilidade espacial da exatidão vertical das redes.

$$DN_Dif_i(Q_j) = MDE_{Ref}(Q_j) - MDE_i(Q_j) \quad (20)$$

A média, desvio padrão e a raiz quadrada do erro quadrático médio das distâncias verticais obtidas são então calculadas recorrendo às equações (21), (22) e (23).

$$\overline{DN_{Dif_i}} = \frac{\sum_{j=1}^m DN_{Dif_i}(Q_j)}{m} \quad (21)$$

$$\sigma_{DN_{Dif_i}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (DN_{Dif_i}(Q_j) - \overline{DN_{Dif_i}})^2}{m}} \quad (22)$$

$$REQM_{DN_{Dif_i}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (DN_{Dif_i}(Q_j))^2}{m}} \quad (23)$$

A Figura 33 mostra o fluxograma com os procedimentos para o cálculo da exatidão vertical das redes hidrográficas.

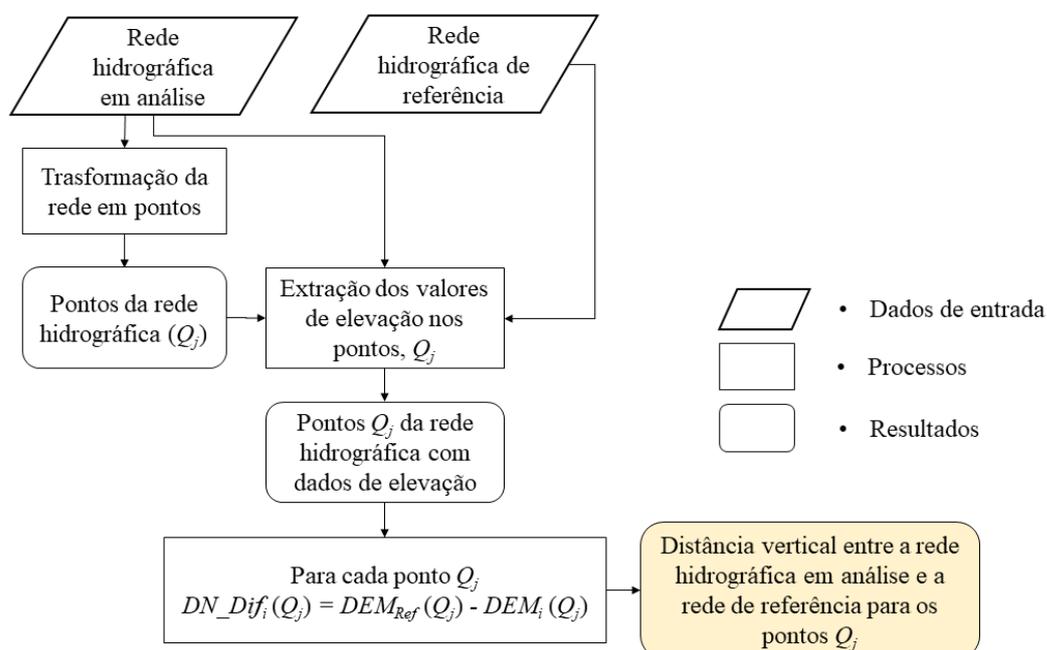


Figura 33: Fluxograma que inclui os processos para avaliação da exatidão vertical das redes hidrográficas.

4.6 Avaliação da exatidão da bacia hidrográfica

Para analisar a exatidão na delimitação da bacia hidrográfica, são geradas as áreas contributivas dos *pour points* considerando o MDE de referência e o MDE reconstruído. Os resultados obtidos são comparados calculando a área total de cada bacia gerada e avaliando as diferenças entre a área das bacias obtidas a partir do MDE de referência e a área das bacias obtidas a partir do MDE reconstruído, ($A_{Dif_i}(B_j)$). A equação (24) permite determinar a diferença de áreas das bacias correspondentes, obtidas a partir de cada MDE. As equações (25), (26) e (27) permitem determinar a média, desvio padrão e a raiz quadrada do erro quadrático médio dessas diferenças.

$$A_{Dif_i}(B_j) = Area_{Refj} - Area_{DEMj} \quad (24)$$

$$\overline{A_{Dif_i}(B_j)} = \frac{\sum_{j=1}^m A_{Dif_i}(B_j)}{m} \quad (25)$$

$$\sigma_{A_{Dif_i}(B_j)} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (A_{Dif_i}(B_j) - \overline{A_{Dif_i}(B_j)})^2}{m}} \quad (26)$$

$$REQM_{A_{Dif_i}(B_j)} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (A_{Dif_i}(B_j))^2}{m}} \quad (27)$$

4.7 Avaliação da exatidão do perímetro da bacia

A delimitação da bacia além de influenciar a área também influencia o perímetro (P). O perímetro é o comprimento horizontal do limite da bacia.

Os resultados obtidos para o perímetro das bacias geradas pelos MDEs em análise são comparados com o valor obtido para o perímetro da bacia gerada pelo MDE de referência,

sendo calculadas essas diferenças $(P_{Dif_i}(B_j))$, utilizando a equação (28). É também calculado a média $(\overline{P_{Dif_i}(B_j)})$, o desvio padrão $(\sigma_{P_{Dif_i}(B_j)})$ e a raiz quadrada do erro quadrático médio $(REQM_{P_{Dif_i}(B_j)})$ das diferenças, dadas pelas equações (29), (30) e (31), respetivamente.

$$P_{Dif_i}(B_j) = Perim_{Refj} - Perim_{DEMj} \quad (28)$$

$$\overline{P_{Dif_i}(B_j)} = \frac{\sum_{j=1}^m P_{Dif_i}(B_j)}{m} \quad (29)$$

$$\sigma_{P_{Dif_i}(B_j)} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (P_{Dif_i}(B_j) - \overline{P_{Dif_i}(B_j)})^2}{m}} \quad (30)$$

$$REQM_{P_{Dif_i}(B_j)} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (P_{Dif_i}(B_j))^2}{m}} \quad (31)$$

4.8 Número de ordem, número de segmentos e comprimento total da rede hidrográfica

De acordo com o descrito em 2.4.4, a hierarquização fluvial estabelece uma ordem para o curso de água inserido na rede hidrográfica. Após a extração da rede hidrográfica do MDE, é possível obter a ordem do curso de água, o número de segmentos e o comprimento total de segmentos de cada ordem, podendo obter-se o comprimento total da rede. No estudo de caso apresentado em 5.2 foram extraídas as redes hidrográficas de MDEs originais e MDEs reconstruídos para duas áreas de estudo com diferente dimensão e relevo, onde se analisaram estes parâmetros extraídos dos MDEs. Foi utilizada a ferramenta do *software ArcGIS stream order* onde se escolheu o método de Strahler para a classificação da rede hidrográfica. De seguida, a rede hidrográfica foi vetorizada utilizando a ferramenta

do *software* ArcGIS *stream to feature* e são calculados os comprimentos dos cursos de água podendo calcular-se de seguida, o comprimento total da rede. A Figura 34 apresenta o fluxograma de classificação da rede hidrográfica e de determinação do comprimento dos cursos de água.

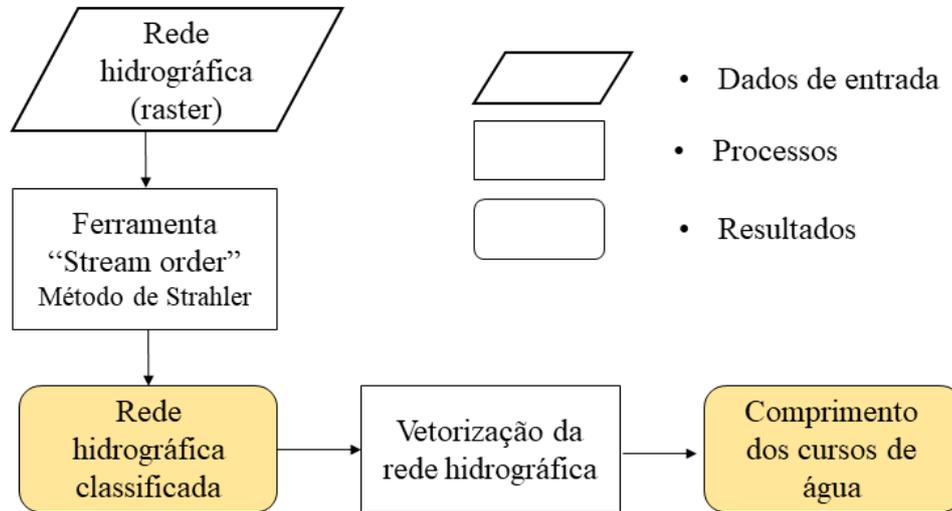


Figura 34: Processo de classificação da rede hidrográfica e determinação dos comprimentos dos cursos de água.

Capítulo V - ESTUDOS DE CASO

5.1 Avaliação da exatidão posicional das redes hidrográficas extraídas dos MDEs

5.1.1 Apresentação, área de estudo e dados

Este estudo pretende avaliar a exatidão posicional ou planimétrica e comparar a completude das redes hidrográficas extraídas de três fontes de dados geográficos gratuitos e de livre acesso, nomeadamente os MDEs ASTER com resolução espacial de 30 m e SRTM de resolução espacial de 90 m e as linhas de água disponíveis no projeto colaborativo OSM. O estudo foi aplicado a uma região inserida na bacia hidrográfica do Rio Mondego, concelho de Gouveia, Guarda, Portugal que é uma região caracterizada por relevo acentuado com vales encaixados e montanhas irregulares. A Figura 35 mostra a localização geográfica da área de estudo e os dados utilizados como referência.

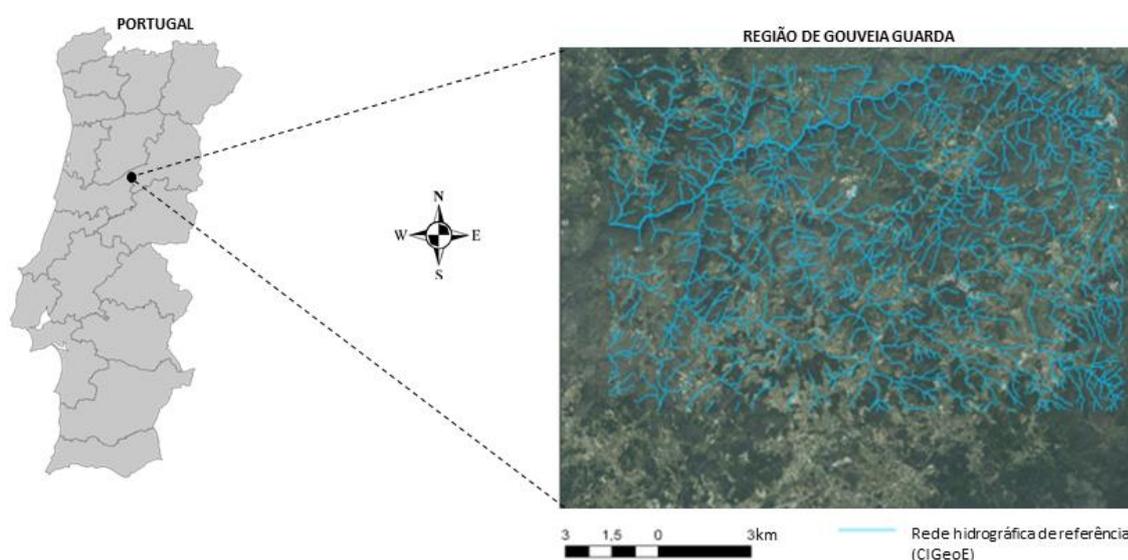


Figura 35: Localização da área de estudo com a rede hidrográfica de referência do CIGeoE sobreposta em imagem de satélite.

Para avaliação da exatidão planimétrica das redes hidrográficas em análise, foi utilizada a rede hidrográfica correspondente à folha 201 da série cartográfica M888 do Centro de Informação Geoespacial do Exército (CIGeoE) à escala 1/25 000.

5.1.2 Completude das linhas de água OSM

Na Figura 36 observa-se que as linhas de água do OSM apenas cobrem os rios principais da área de estudo (*rivers*). Observando de uma forma mais detalhada, vê-se que existem linhas de água não conectadas com a rede hidrográfica principal. Isto acontece no local da área de estudo como está evidenciado na Figura 36 com um círculo vermelho. Quando observámos em termos gerais a completude na área total da bacia hidrográfica do rio Mondego, verifica-se que, o que ocorre nesta área de estudo, também se observa na restante bacia hidrográfica.

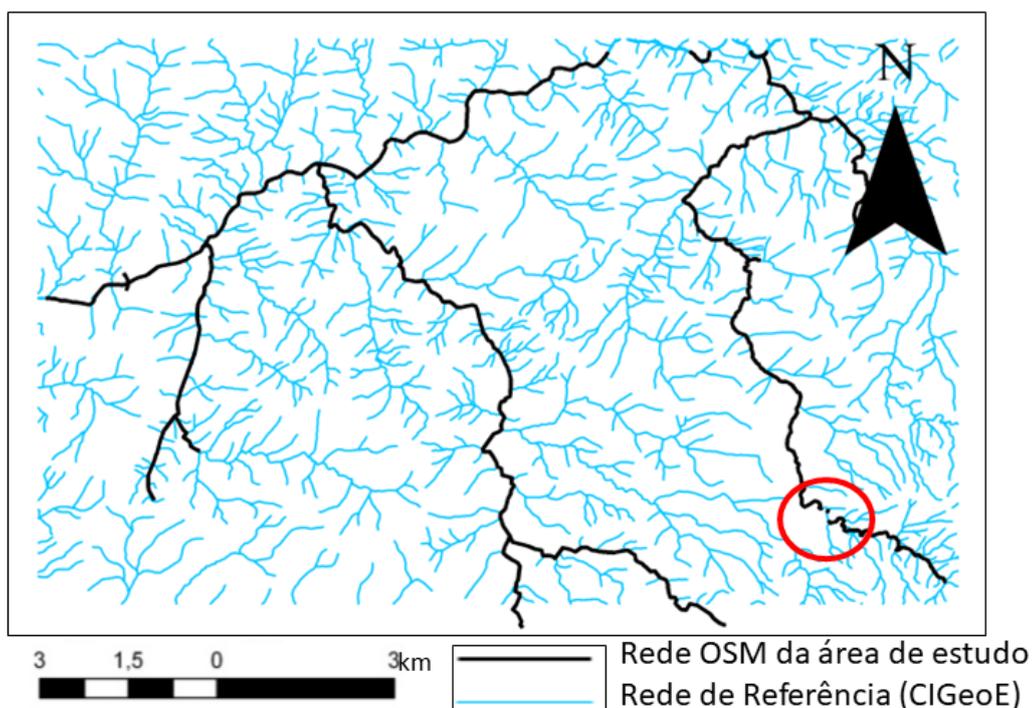


Figura 36: Rede hidrográfica do OSM sobreposta à rede hidrográfica de referência do CIGeoE.

5.1.3 Exatidão posicional das linhas de água

A escolha do nível crítico (NC) é feita em função da extensão da área de estudo e da resolução de cada um dos MDEs em análise. Foram testados alguns níveis críticos para geração de rede hidrográfica e calculou-se o seu comprimento total (L_t) e também a diferença entre o comprimento total da rede de referência (L_{CIGeoE}) e cada uma das redes geradas para o MDE ASTER e para o MDE SRTM 90. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 6: Diferenças entre o comprimento total da rede de referência (L_{CIGeoE}) e de cada uma das redes hidrográficas geradas para os diferentes níveis críticos.

<i>Nível crítico</i> (<i>NC</i>)	$L_{CIGeoE}-L_{ASTER}$ (<i>km</i>)	<i>Nível crítico</i> (<i>NC</i>)	$L_{CIGeoE}-L_{SRTM}$ (<i>km</i>)
ASTER		SRTM	
90	93,2	10	152,4
63	-6,5	7	64,6
45	-110,8	5	-36,3

Observando a Tabela 6, verifica-se que o menor valor da diferença foi obtido para o MDE ASTER (-6,5 km) com o nível crítico de 63 *pixels*. Já para o MDE SRTM 90 o menor valor da diferença obtido é -36,3 km para o nível crítico de 5 *pixels*. Assim, foram os níveis críticos de 63 e 5 *pixels* que permitem obter as menores diferenças para, respetivamente, o MDE ASTER e SRTM 90, relativamente à rede de referência e foram portanto, os níveis críticos escolhidos para gerar as redes hidrográficas usadas na restante análise.

A exatidão posicional (horizontal) das linhas de água do OSM e das linhas de água extraídas dos MDEs ASTER e SRTM 90 foi avaliada recorrendo à metodologia descrita em 4.5.

A Tabela 7 mostra os valores da média e a raiz quadrada do erro quadrático médio ($REQM$) das distâncias horizontais entre as linhas de água da rede hidrográfica de referência e as linhas de água de cada rede em análise (rede do OSM e redes extraídas dos MDEs ASTER e SRTM 90). Observando a Tabela 7 pode ver-se que as linhas de água do OSM apresentam melhores valores de exatidão (menor distância média à rede de referência e a raiz quadrada do erro quadrático médio) em relação às redes extraídas dos MDEs

ASTER e SRTM 90, sendo que, a rede extraída do SRTM 90 apresenta melhores valores que a rede extraída do MDE ASTER, apesar deste último MDE ter maior resolução espacial (30 m).

Tabela 7: Média e a raiz quadrada do erro quadrático médio (*REQM*) das distâncias horizontais entre a rede de referência e cada uma das redes em análise (a rede do OSM, a rede extraída do SRTM 90 e a rede extraída do ASTER).

<i>Origem das redes hidrográficas</i>	<i>média (m)</i>	<i>REQM (m)</i>
OSM	7	15
SRTM	26	27
ASTER	40	36

A Figura 37 (esquerda) mostra a rede hidrográfica extraída do MDE SRTM 90 e a rede extraída do MDE ASTER (direita), ambas sobrepostas à rede de referência (gentilmente cedida pelo CIGeoE), usando os níveis críticos de 5 e 63 *pixels*, respetivamente.

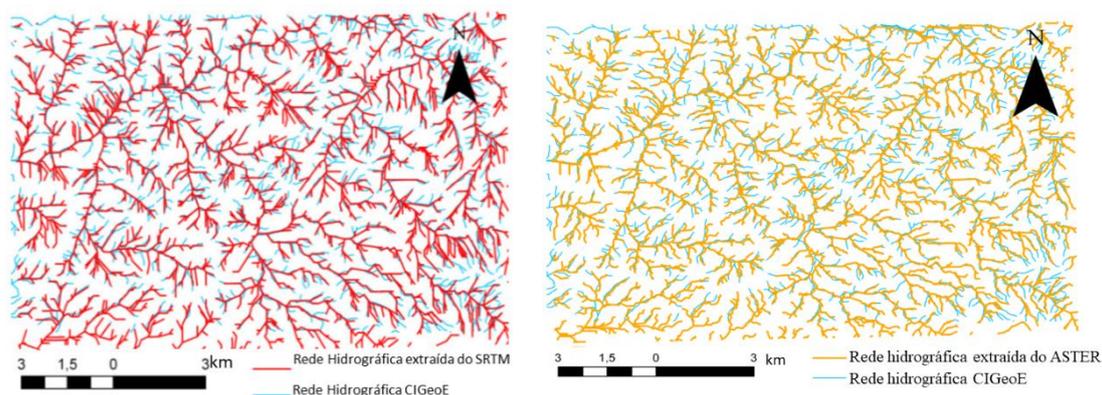


Figura 37: Redes hidrográficas extraídas dos MDEs SRTM 90 (esquerda) e ASTER (direita) sobrepostas à rede hidrográfica de referência do CIGeoE.

Observando as redes hidrográficas extraídas dos MDEs, verifica-se que a rede extraída do modelo ASTER é mais suavizada que a rede extraída do SRTM 90, isto possivelmente é devido à diferente resolução espacial dos dois MDEs, pois, o MDE ASTER apresenta maior resolução espacial (30 m) favorecendo por isso a visualização mais detalhada.

5.1.4 Resultados e discussão

Em termos de exatidão posicional (ou planimétrica) das redes hidrográficas, o estudo permitiu concluir que a rede do OSM possui uma maior exatidão posicional que as redes derivadas dos MDEs, sendo que, a rede extraída do SRTM 90 atinge maior exatidão posicional ($REQM = 27\text{ m}$) que a rede extraída do MDE ASTER ($REQM = 36\text{ m}$), apesar de este possuir uma maior resolução espacial (30 m).

Então uma vez que se observou que a exatidão posicional das linhas de água disponíveis no OSM possuíam melhor exatidão posicional que as linhas de água extraídas dos MDEs ASTER e SRTM 90, passou-se a averiguar se novos MDEs obtidos a partir da altimetria dos MDEs originais (pontos cotados) e das linhas de água do OSM, teriam maior exatidão, permitindo obter também uma maior exatidão dos parâmetros topográficos deles extraídos, sendo este o estudo de caso 2 que se apresenta na seção 5.2.

Importa referir o seguinte, a completude das linhas de água do OSM foi analisada com mais enfoque neste estudo de caso (1). A Análise foi feita visualmente sobre imagem de satélite. Observou-se que os rios (linhas de água do OSM) aí representados eram apenas os rios principais (*rivers*), ou seja, a cobertura de linhas de água do OSM era baixa, apresentando muito menos linhas de água que a rede hidrográfica de referência. Os resultados mostraram que a exatidão posicional das linhas de água do OSM era superior à exatidão das linhas de água extraídas dos MDEGs ASTER e SRTM com 30 e 90 m de resolução espacial, respetivamente.

Estes resultados motivaram e foram de certo modo o embrião que esteve na base do desenvolvimento da metodologia que permitiu reconstruir modelos, combinando as linhas de água do OSM com a altimetria extraída dos MDEGs, por forma a se gerarem linhas de água com maior exatidão que a obtida para as linhas extraídas dos MDEs originais.

5.2 Melhoria da exatidão posicional de redes hidrográficas extraídas de MDEs reconstruídos usando dados do OSM

5.2.1 Apresentação, área de estudo e dados

Este estudo tem como objetivo melhorar a exatidão posicional (ou planimétrica) das redes hidrográficas extraídas dos MDEs reconstruídos utilizando dados dos MDEGs ASTER e SRTM (com 90 m de resolução espacial) e IGV disponível no projeto colaborativo OSM. São usados apenas dados de acesso livre, podendo esta metodologia ser aplicada a qualquer região do mundo. A metodologia utiliza pontos cotados derivados dos MDEs originais e as linhas de água extraídas do OSM para a construção de novos modelos, a partir dos quais se poderão extrair novas linhas de água.

A estudo é aplicado a duas áreas de estudo de diferente dimensão e relevo, localizadas no Reino Unido, designadas de Área de Estudo 1 (AE1), localizada na Escócia (Figura 38 b) e Área de Estudo 2 (AE2), localizada na região Sudeste de Inglaterra (Figura 38 c). A exatidão posicional das redes hidrográficas em análise foi obtida utilizando como referência a rede hidrográfica da Grã-Bretanha disponibilizada pelo Ordnance Survey (Figura 40).

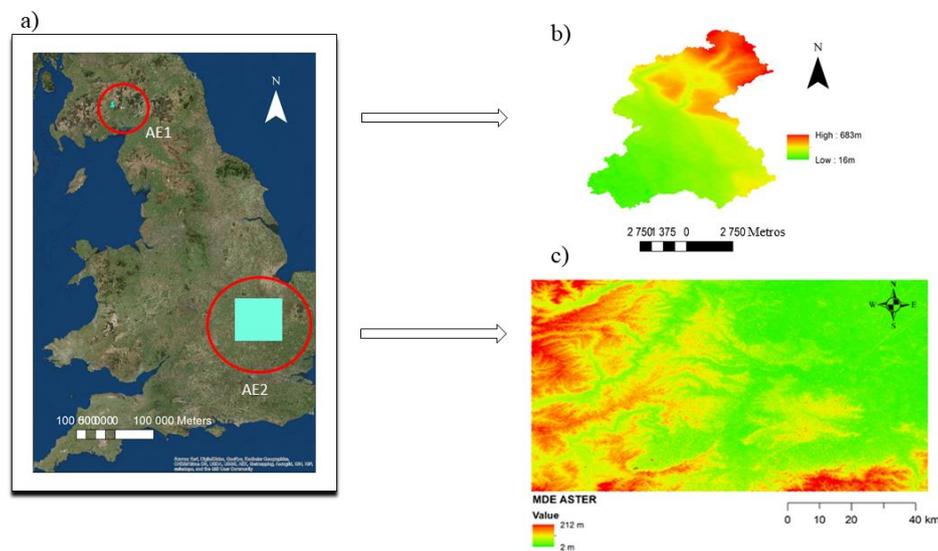


Figura 38: a) Localização das áreas de estudo: área localizada na Escócia (AE1) b) e área localizada a Sudeste de Inglaterra (AE2) c).

Foi avaliada a exatidão horizontal das redes hidrográficas extraídas dos MDEs ASTER e SRTM originais e reconstruídos, com resoluções espaciais de 30 e 90 m, respetivamente, para as duas áreas de estudo, AE1 e AE2. Foi também avaliada a exatidão posicional da rede extraída do OSM constituída pelas entidades correspondentes aos valores *rivers* e *streams* da *key waterway* do OSM para a AE1 (Figura 39 a)) e para AE2 (Figura 39 b)).

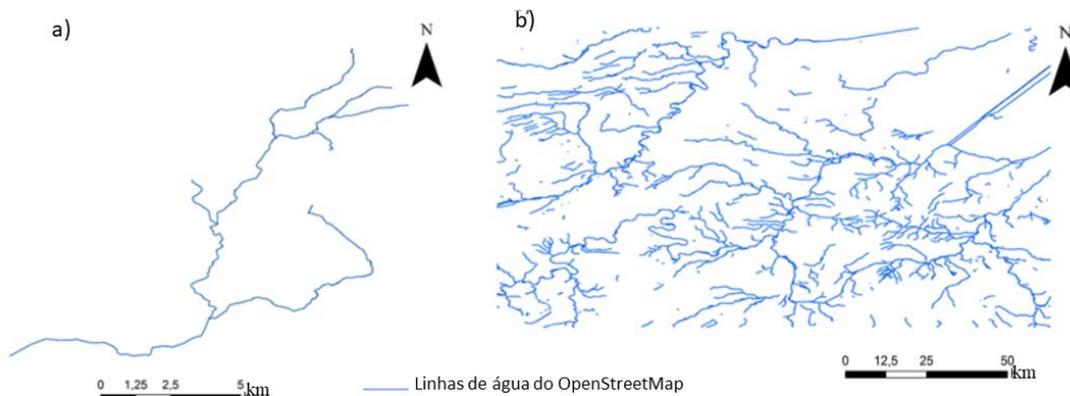


Figura 39: Rede hidrográfica disponível no OSM com os valores *rivers* e *streams* para AE1 a) e para AE2 b).

Na avaliação da exatidão posicional das redes hidrográficas em análise, foi usada como referência a rede hidrográfica de rios da Grã-Bretanha disponível na página do Ordnance Survey (Figura 40). A posição planimétrica das redes hidrográficas extraídas dos MDEs originais e reconstruídos ASTER e SRTM 90 e da rede do OSM foi comparada com a rede hidrográfica do Ordnance Survey.

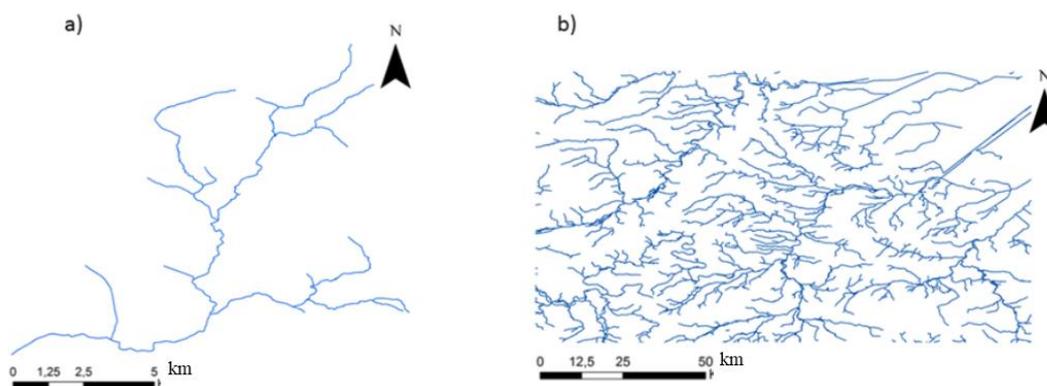


Figura 40: Rede hidrográfica de referência de AE1 a) e de AE2 b).

5.2.2 Resultados e discussão

De acordo com a metodologia descrita em 4.2.3, as redes hidrográficas foram extraídas dos MDEs originais e reconstruídos ASTER e SRTM 90 com os níveis críticos de 445 e 4000 *pixels* para o MDE ASTER para a AE1 e para a AE2. Utilizaram-se os níveis críticos de 14 e 126 *pixels* para o MDE SRTM 90, respetivamente para as áreas de estudo AE1 e AE2. A Figura 41 apresenta as redes hidrográficas geradas a partir dos MDEs originais e reconstruídos ASTER e SRTM 90 para as duas áreas de estudo AE1 e AE2.

Após a extração das redes hidrográficas foram calculadas as distâncias horizontais entre a rede de referência e cada uma das redes em análise situadas dentro da região definida por *buffers* de 200 e 500 m para as áreas de estudo AE1 e AE2, respetivamente. A Figura 42 apresenta os *buffers* gerados em torno da rede hidrográfica de referência para as duas áreas de estudo.

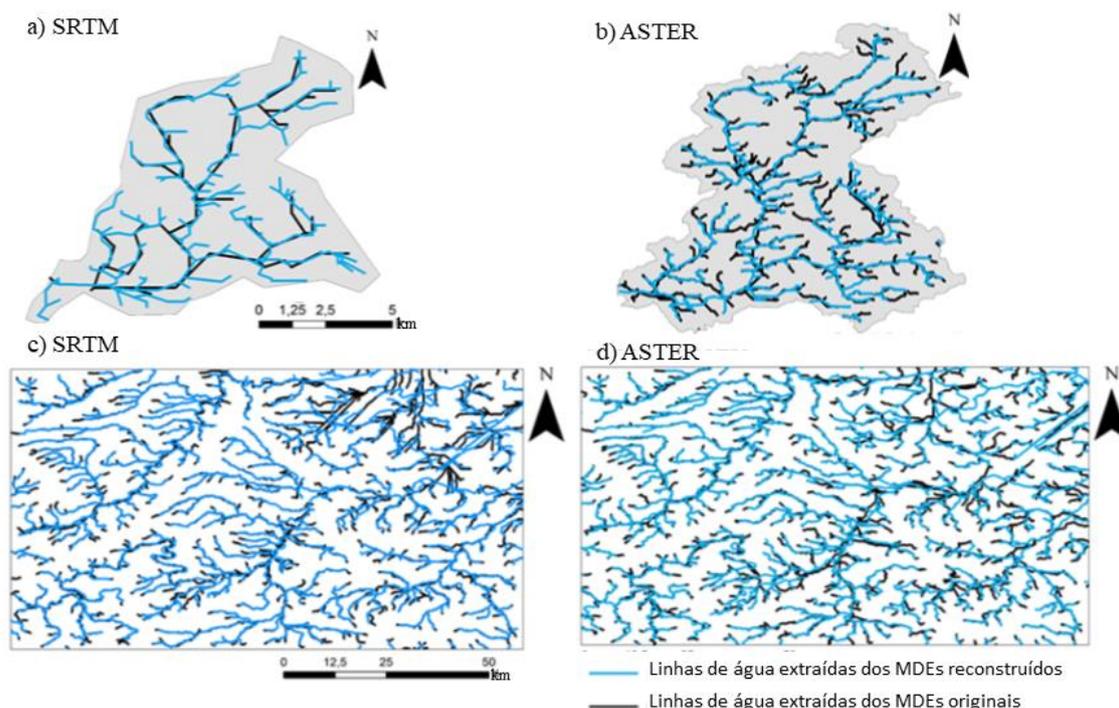


Figura 41: Redes hidrográficas extraídas dos MDEs originais e MDEs reconstruídos: a) redes extraídas do MDE SRTM 90 na AE1; b) redes extraídas do MDE ASTER na AE1; c) redes extraídas do SRTM 90 na AE2; d) redes extraídas do MDE ASTER na AE2.

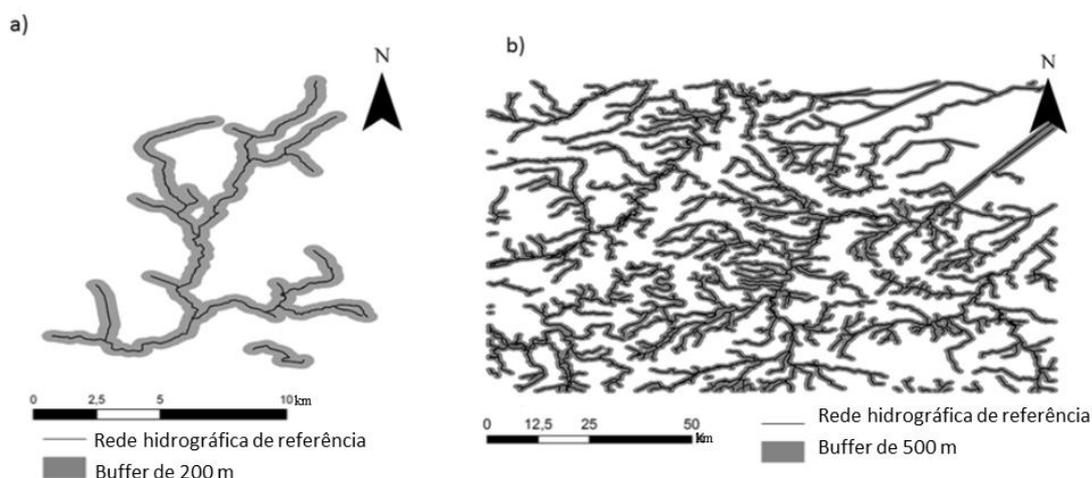


Figura 42: a) *Buffer* de 200 m em torno da rede de referência na AE1; b) *Buffer* de 500 m em torno da rede de referência na AE2.

Foram também calculados alguns parâmetros topográficos derivados das redes hidrográficas, tais como a ordem da bacia (O), o número de ordem i do curso de água (O_i), o número de segmentos (cursos de água) de ordem i (N_{si}) e o comprimento total dos cursos de água de ordem i (L_i). A Tabela 8 e a Tabela 9 mostram os resultados obtidos para estes parâmetros para as redes hidrográficas extraídas dos MDEs originais e MDEs reconstruídos ASTER e SRTM 90 para a área AE1.

Tabela 8: Ordem da bacia (O), ordem i do curso de água (O_i), número de segmentos de ordem i (N_{si}) e comprimento total dos segmentos de ordem i (L_i), extraídos das redes hidrográficas derivadas dos MDEs ASTER e SRTM 90 originais para a AE1.

<i>MDEs</i> <i>ORIGINAIS</i>		<i>AE1</i>	
	O_i	N_{si}	L_i (km)
SRTM 90 (O = 3)	1	18	21,2
	2	10	11,4
	3	6	5,9
Total =		34	38,5
ASTER (O = 5)	1	170	62,5
	2	68	24,4
	3	51	17,3
	4	35	11,9
	5	6	1,7
Total =		330	117,8

Tabela 9: Ordem da bacia (O), ordem i do curso de água (O_i), número de segmentos (N_{si}) e comprimento total dos segmentos de ordem i (L_i), extraídos das redes hidrográficas derivadas dos MDEs ASTER e SRTM reconstruídos para a AE1.

<i>MDEs RECONSTRUÍDOS</i>		<i>AEI</i>	
	O_i	N_{si}	L_i (km)
SRTM 90 (O = 5)	1	73	30,6
	2	34	18,9
	3	16	10,3
	4	9	4,5
	5	8	5,4
Total =		140	69,7
ASTER (O = 5)	1	111	34,9
	2	44	25,3
	3	34	9,2
	4	12	5,0
	5	10	1,7
Total =		211	76,1

Observando a Tabela 8 e a Tabela 9 pode ver-se que em relação ao MDE SRTM a ordem da bacia aumentou de 3 para 5. Já para o MDE ASTER este parâmetro manteve o mesmo valor (5). O número total de segmentos também aumentou para as redes hidrográficas extraídas do SRTM de um total de 34 para o MDE original para 140 no MDE reconstruído, já para as redes extraídas do MDE ASTER este valor diminuiu de 330 para 211 segmentos. O parâmetro comprimento total da rede hidrográfica teve a mesma variabilidade para as redes extraídas dos MDEs em análise, ou seja, com a reconstrução dos modelos, o comprimento total da rede hidrográfica sobe para o SRTM e desce para o modelo ASTER, sendo que, também se pode ver que o comprimento total das redes hidrográficas extraídas dos modelos ASTER é sempre superior ao comprimento das redes extraídas dos modelos SRTM 90, eventualmente devido à diferente resolução espacial que no primeiro caso é de 30 m e no caso do SRTM é de 90 m.

A Figura 43 apresenta um gráfico de barras onde se pode ver a variabilidade dos parâmetros de ordem da bacia, número total de segmentos e comprimento total da rede hidrográfica na área de estudo AE1.

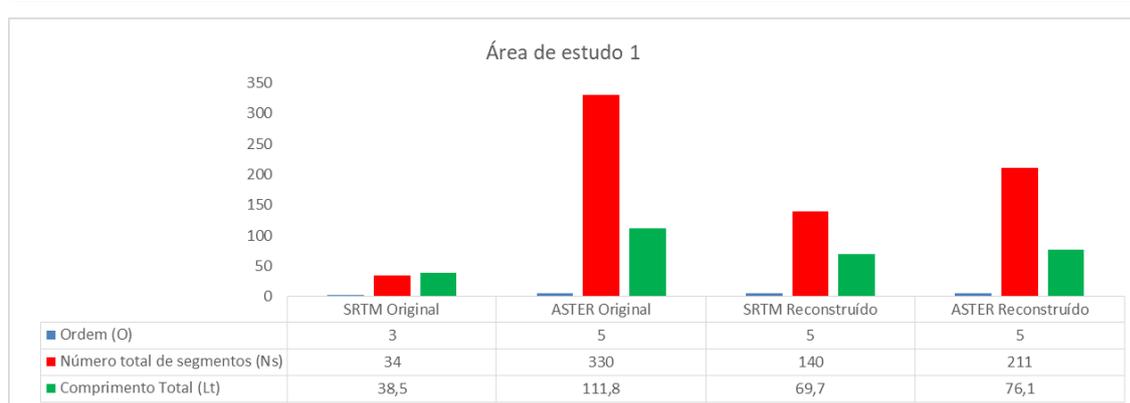


Figura 43: Variabilidade da ordem da bacia, número total de segmentos e comprimento total das redes hidrográficas para a área de estudo AE1.

Para a área de estudo 2 (AE2) fez-se o cálculo dos mesmos parâmetros, cujos resultados se apresentam na Tabela 10 e Tabela 11, respetivamente para as redes hidrográficas extraídas dos MDEs originais e dos MDEs reconstituídos.

Tabela 10: Parâmetros topográficos ordem da bacia, número de ordem do curso de água, número de segmentos e comprimento total dos segmentos de ordem i , extraídos das redes hidrográficas derivadas dos MDEs ASTER e SRTM originais para AE2.

<i>MDEs ORIGINAIS</i>		<i>AE2</i>	
	O_i	Número de segmentos	Comp. (km)
SRTM 90 (O = 4)	1	603	1 436,7
	2	299	665,5
	3	173	330,5
	4	75	149,0
Total =		1 150	2 581,7
ASTER (O = 5)	1	637	1 484,4
	2	316	721,7
	3	163	312,3
	4	59	204,4
	5	43	75,7
Total =		1 218	2 627,5

Tabela 11: Parâmetros topográficos ordem da bacia, ordem do curso de água, número de segmentos e comprimento total dos segmentos de ordem i , extraídos das redes hidrográficas derivadas dos MDEs ASTER e SRTM reconstruídos para a AE2.

<i>MDEs</i> RECONSTRUÍDOS		<i>AE 2</i>	
	O_i	Número de segmentos	Comp (km)
SRTM 90 ($O = 5$)	1	401	1 117,1
	2	202	523,1
	3	73	213,2
	4	63	215,4
	5	33	69,5
Total =		772	2 138,3
ASTER ($O = 5$)	1	407	1 206,7
	2	213	605,7
	3	62	157,4
	4	64	214,8
	5	30	77,3
Total =		776	2 265,1

A ordem da bacia na área de estudo AE2 aumentou de $O = 4$ para $O = 5$ com a reconstrução do modelo SRTM 90, já para o MDE ASTER este parâmetro manteve o mesmo valor ($O = 5$). Relativamente ao número de segmentos, este valor diminuiu para as redes hidrográficas extraídas a partir dos dois modelos (ASTER e SRTM 90). O comprimento total da rede também sofreu uma diminuição para os dois MDEs, como se pode ver nas Tabela 10 e Tabela 11. A Figura 44 mostra a variabilidade desses parâmetros na AE2.

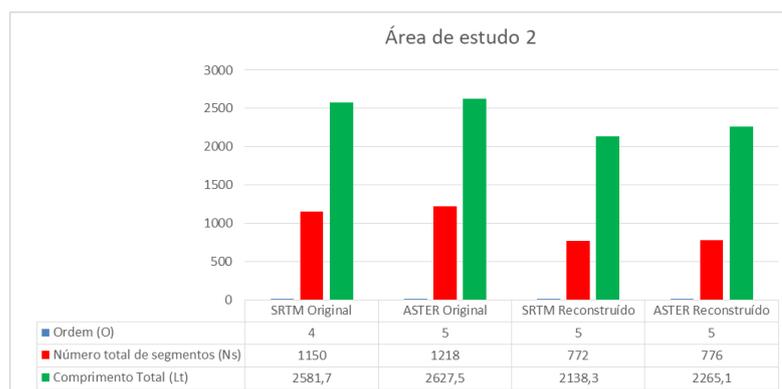


Figura 44: Variabilidade dos parâmetros topográficos, ordem da bacia, número total de segmentos e comprimento total da rede para a área de estudo 2 (AE2).

A exatidão posicional das redes hidrográficas foi determinada de acordo com o descrito em 4.5, tendo sido calculada a média (m), o desvio padrão (σ) e a raiz quadrada do erro quadrático médio ($REQM$) das distâncias horizontais entre cada ponto da rede hidrográfica em estudo e a rede hidrográfica de referência (Tabela 12).

Tabela 12: Média, desvio padrão e a raiz quadrada do erro quadrático médio das distâncias horizontais entre a rede de referência e cada uma das redes hidrográficas em análise.

Área de estudo	MDE	NC (pixels)	Largura do Buffer (m)	MDEs Originais (O)			MDEs Reconstruídos (R)		
				Média (m)	σ (m)	REQM (m)	Média (m)	σ_R (m)	REQM (m)
AE1	SRTM	14	200	45,4	47,0	65,3	27,2	42,5	50,5
	ASTER	126	200	38,7	55,4	67,4	27,8	49,4	56,7
AE2	SRTM	445	500	92,8	116,6	149,0	54,4	89,5	104,8
	ASTER	4 000	500	104,9	127,8	165,3	56,0	102,0	116,4

Observando a Tabela 12 verifica-se que a média das distâncias entre as redes hidrográficas obtidas e a rede hidrográfica de referência diminui com a reconstrução dos modelos, para ambas as áreas de estudo e para os dois MDEs (ASTER e SRTM 90). O desvio padrão para as duas áreas de estudo (AE1 e AE2) também diminui com a reconstrução para os dois MDEs (ASTER e SRTM). Em consequência, a raiz quadrada do erro quadrático médio também diminui, com a reconstrução dos modelos.

Foram também calculadas as diferenças entre o comprimento total da rede hidrográfica extraída dos MDEs originais e a rede hidrográfica extraída do MDEs reconstruídos e também a diferença entre as duas redes e a rede de referência. Os resultados são apresentados na Tabela 13. Verifica-se que o comprimento total das redes hidrográficas obtidas a partir dos MDEs reconstruídos se afastaram mais do comprimento total da rede hidrográfica de referência que as redes extraídas dos MDEs originais, a única exceção aconteceu na área de estudo 1 (AE1) em que a diferença dos comprimentos entre a rede de referência e rede extraída de MDE ASTER original apresenta o valor -79,0 km e a correspondente diferença considerando a rede extraída do MDE reconstruído apresenta uma diferença de -37,3 km.

Tabela 13: Comprimento total da rede extraída do MDE original (L_O) e a rede extraída do MDE reconstruído (L_R) e a sua diferença ($L_O - L_R$), a diferença entre o comprimento da rede hidrográfica de referência (L_{OS}) e o comprimento das redes extraídas dos MDEs originais ($L_{OS} - L_O$) e dos MDEs reconstruídos ($L_{OS} - L_R$).

Área de estudo	L_{OS} (km)	MDE	NC (pixels)	L_O (km)	L_R (km)	$L_O - L_R$ (km)	$L_{OS} - L_O$ (km)	$L_{OS} - L_R$ (km)
AE1	38,8	SRTM	14	38,5	69,7	-31,2	0,3	-30,9
		ASTER	126	117,8	76,1	41,7	-79,0	-37,3
AE2	2 733,8	SRTM	445	2 581,7	2 138,3	443,4	152,1	595,5
		ASTER	4 000	2 722,8	2 261,5	461,3	11,0	472,3

Analisando estes resultados segundo uma perspetiva hidrológica e verificando-se que a metodologia permitiu melhorar a exatidão posicional das redes transformadas não permitindo melhorar o seu comprimento total, teria sido mais útil para fins hidrológicos que o comprimento da rede melhorasse, pois, este parâmetro é mais importante para a determinação de estimativas relativas a escoamento e caudais na bacia hidrográfica relativamente à posição planimétrica da rede hidrográfica. De referir também que, a densidade de drenagem da bacia depende do comprimento total da rede hidrográfica, sendo um índice da tendência para ocorrência de cheias na bacia hidrográfica.

Os resultados no geral mostram que a exatidão posicional ou planimétrica das redes hidrográficas melhora para as duas áreas de estudo consideradas e também para os dados extraídos dos dois MDEGs, o que prova a utilidade desta metodologia. Também podemos verificar que a exatidão posicional é sempre melhor para o MDE SRTM 90 reconstruído. Assim, os dados extraídos deste MDE tiram mais vantagem do processo de transformação do modelo que os dados extraídos do MDE ASTER.

A metodologia pode ter particular interesse para regiões do mundo onde não existe cartografia topográfica precisa e disponível, pois, aqui todos os dados utilizados são de acesso livre. De realçar que, para que a metodologia produza bons resultados, é necessário eliminar os erros presentes na informação extraída do OSM, de acordo com o exposto em 4.2.1. Todavia, este estudo deixa assuntos em aberto, como por exemplo, se com esta metodologia, para além da melhoria da exatidão planimétrica das redes hidrográficas, se conseguem produzir MDEs com maior exatidão e que permitam a extração de redes hidrográficas com maior exatidão altimétrica. Ou seja, se tal metodologia poderia melhorar

em planimetria e em altimetria as redes hidrográficas extraídas dos novos MDEs. Isto conduziu ao estudo de caso a seguir descrito (5.3).

De referir que, se escolheram áreas de estudo localizadas no Reino Unido, tanto neste estudo como no seguinte pois, existe aí maior cobertura de dados do OSM e também porque há disponibilidade de dados oficiais de forma facilmente acessível e gratuita (página do Ordnance Survey – a agência oficial de cartografia do Reino Unido).

5.3 Utilização de dados OSM para aumentar a exatidão do MDE derivado do SRTM 30 e dos parâmetros derivados

O estudo foi aplicado a uma região retangular com 13 899 km² de área, localizada no Reino Unido, zona que coincide com a designada área de estudo 2 (AE2) referente ao estudo de caso apresentado na seção 5.2. A área de estudo tem uma altitude máxima e mínima de 198 m e -26 m, respetivamente. A região caracteriza-se por ter zonas com diferentes características em termos de relevo como mostra a visualização tridimensional apresentada na Figura 45. Pode ver-se que existem na área de estudo, zonas acidentadas com variabilidade de declive e zonas de transição para uma zona mais plana, sendo esta ocupada essencialmente por campos agrícolas.

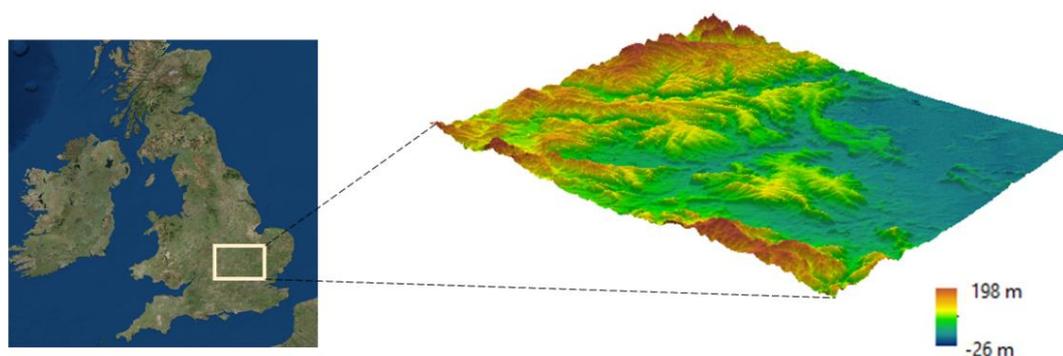


Figura 45: Localização da área de estudo e visualização tridimensional do relevo.

5.3.1 Dados altimétricos - MDEs

Para este estudo, os dados altimétricos utilizados foram o MDE SRTM 30, descarregado em formato grelha a partir da página *web* do United States Geological Survey (USGS) (<http://dds.cr.usgs.gov/srtm/>), estando disponível em coordenadas geográficas no World Geodetic System (WGS 84) e no Datum vertical EGM 96 (Earth Gravitational Model 1996).

O MDE de referência utilizado foi descarregado a partir da página do Ordnance Survey (<http://www.ordnancesurvey.co.uk/>), que é a Agência Nacional de Cartografia do Reino Unido. Este MDE foi disponibilizado também em formato grelha (matricial), com uma resolução espacial de 50 metros e tem como Datum vertical associado o Ordnance Datum Newlyn 1915 (ODN 15). A Figura 46 mostra os dois MDEs e identifica algumas diferenças entre os dois, nomeadamente nas regiões numeradas de 1) a 4) com círculo de cor preta.

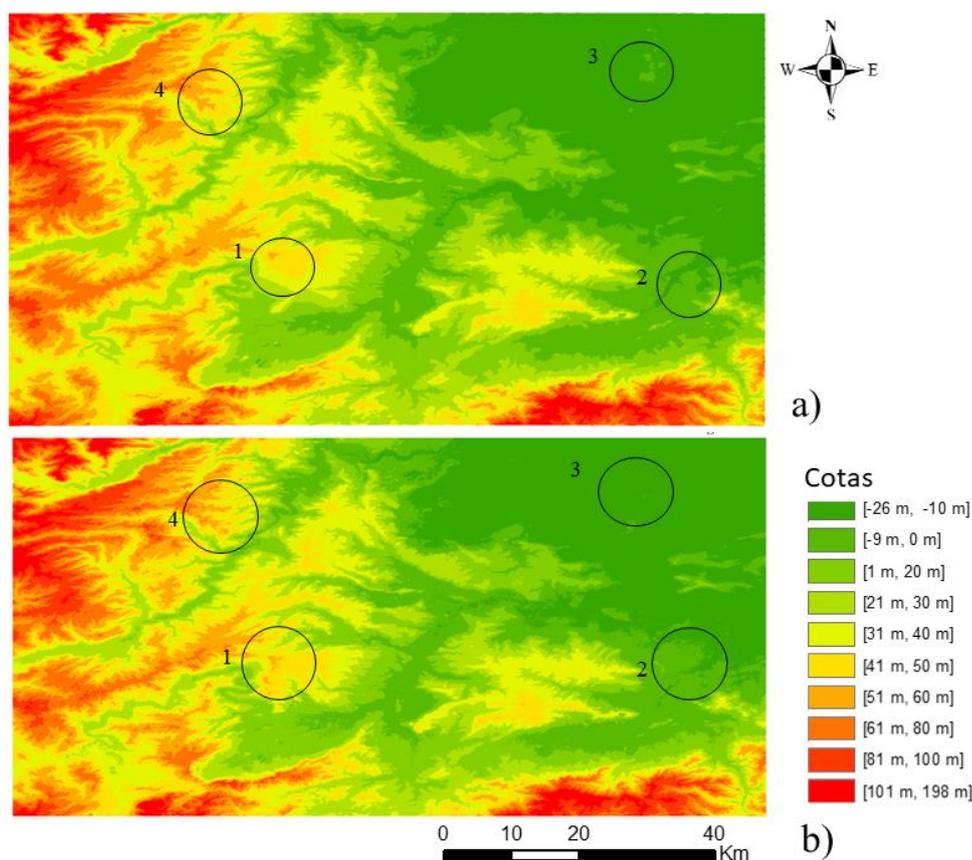


Figura 46: MDEs da área de estudo: a) MDE do Ordnance Survey; b) MDE SRTM 30.

De referir que, apesar da menor resolução espacial (50 m) em relação ao MDE SRTM 30 o MDE do Ordnance Survey foi escolhido como modelo de referência para comparação dos modelos em análise, pois, segundo informação disponível na página *web* do Ordnance Survey, foi obtido a partir de métodos fotogramétricos, utilizando imagens aéreas de alta resolução e, tem um erro quadrático médio (*EQM*) de 4 m. Assim, o erro quadrático médio (*EQM*) é inferior ao do MDE SRTM 30, onde segundo alguns autores é na ordem dos 10 m (Mukul et al., 2015, Santillan e Makinano-Santillan, 2016 e Elkhachy, 2018).

Essa variabilidade altimétrica dos modelos pode visualmente observar-se ao longo de toda a área de estudo e encontra-se distribuída quer pelas zonas mais acidentadas quer pelas zonas mais planas.

5.3.2 Dados planimétricos – redes hidrográficas

A Figura 47 a) mostra as linhas de água do OSM que correspondem às *tags* “*waterways=rivers*” e “*waterways=streams*”. Figura 47 b) mostra apenas as linhas de água a que corresponde à *tag* “*waterways=rivers*” e na Figura 47 c) pode ver-se a rede hidrográfica do Ordnance Survey, que foi utilizada como rede de referência.

Os dados do OSM foram descarregados em formato *shapefile* a partir do projeto Geofabrick a 8 de setembro de 2015. Os dados OSM descarregados contêm todas as entidades disponíveis para a área de estudo. A partir desse conjunto de entidades selecionaram-se as que correspondem à *key waterway* e aos *values rivers* e *streams*, isto porque correspondem a linhas de água naturais. As entidades com outros valores, tais como *canal*, ou *ditch* ou *riverbank* não foram consideradas no estudo desenvolvido. Como se pode observar na Figura 47 a) a rede hidrográfica do OSM apresenta muitos ramos incompletos e desconectados da rede principal, enquanto em b) os rios são na maior parte dos casos representados por linhas contínuas, correspondendo aos rios principais da rede, ou seja, aqueles que nas imagens de satélite se identificam mais facilmente, também devido à sua dimensão e talvez por isso apresentem uma melhor cobertura que os rios mais secundários (*streams*).

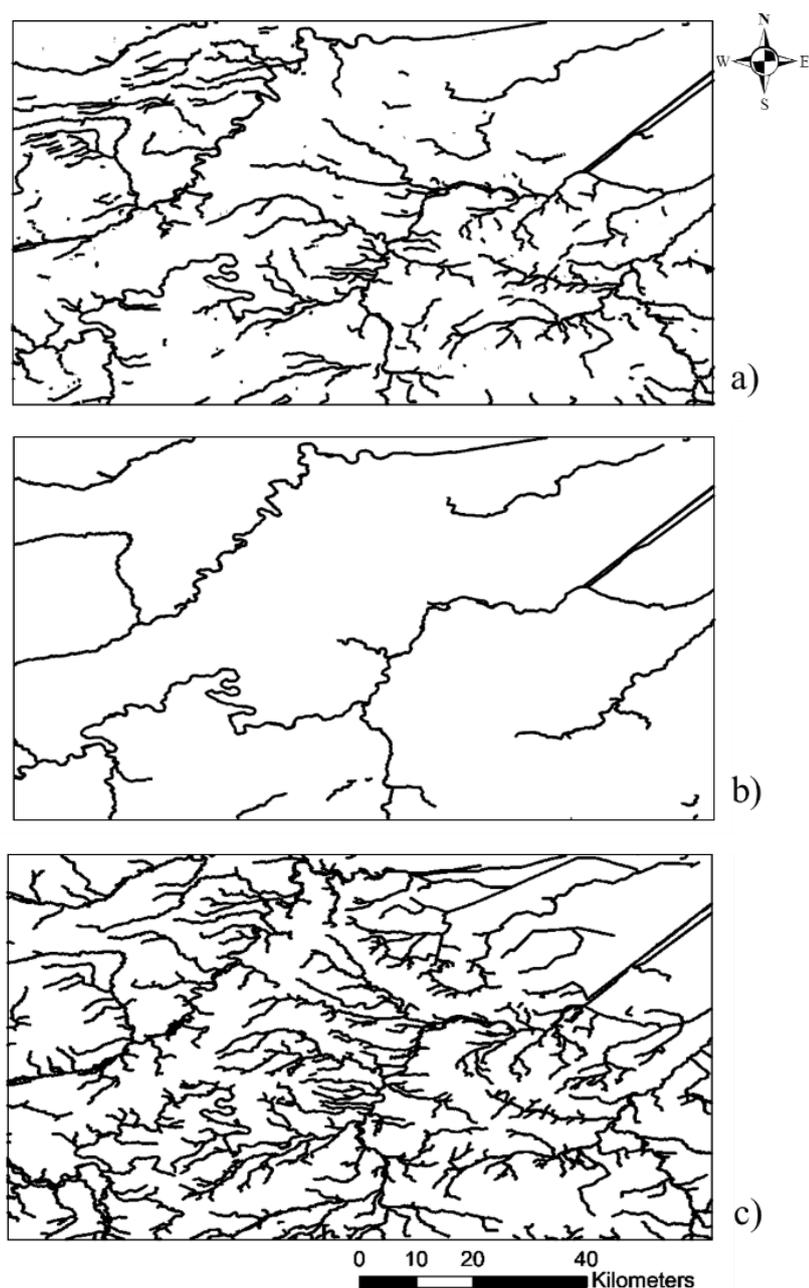


Figura 47: Redes hidrográficas na área estudo: a) rede do OSM com *rivers* e *streams*, b) rede do OSM com *rivers* e c) rede de referência do Ordnance Survey.

A rede hidrográfica de referência da área de estudo mostrada na Figura 47 c) foi descarregada da página do Ordnance Survey. A rede é formada por 144 000 km de linhas de água. Os dados estão no formato *shapefile* da ESRI, em escalas que variam de 1/15 000

a 1/30 000. A opção de utilizar a rede hidrográfica disponível na página do Ordnance Survey como referência, em vez de utilizar a rede hidrográfica extraída do MDE de referência (Ordnance Survey), justifica-se devido à influência que a resolução espacial do MDE (50 m) tem sobre a exatidão da posição horizontal da rede de drenagem. Como se pode ver na Figura 48 onde é mostrado sobre uma imagem de satélite um detalhe da rede extraída do MDE de referência e da rede disponível na página do Ordnance Survey, sendo a posição da segunda rede mais exata.

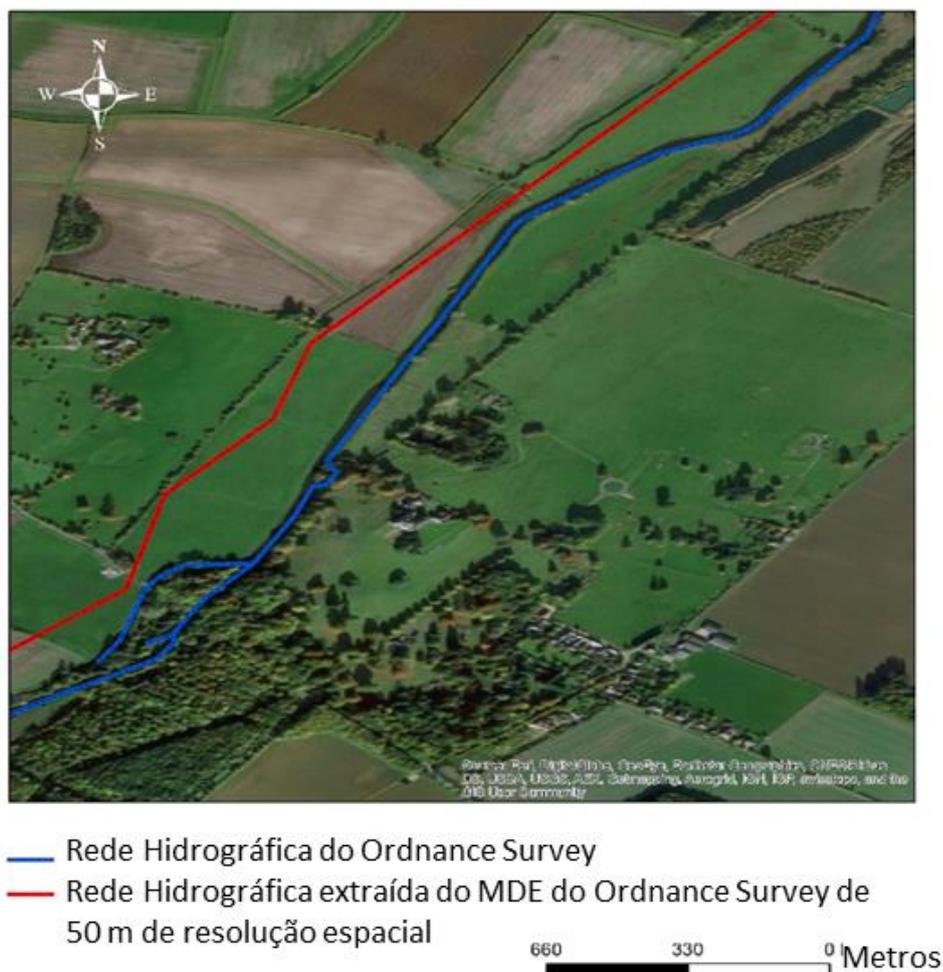


Figura 48: Detalhe da rede hidrográfica da Grã-Bretanha extraída da página do Ordnance Survey (cor azul) e da rede hidrográfica extraída do MDE do Ordnance Survey com uma resolução espacial de 50 m (cor vermelha) sobrepostas a uma imagem de satélite.

5.3.3 Resultados e discussão

5.3.3.1 Exatidão dos MDEs

A metodologia seguida para a avaliação da exatidão dos MDEs foi analisada e explicada na secção 4.4. A Tabela 14 mostra a média ($\overline{MDE_Dif_i}$), o desvio padrão ($\sigma_{MDE_Dif_i}$), a raiz quadrada do erro quadrático médio ($REQM_{MDE_Dif_i}$), o valor máximo e valor mínimo das diferenças MDE_{Dif_i} de altitude entre o MDE de referência e o MDE original (SRTM 30), o MDE reconstruído considerando *rivers* e *streams* e o MDE reconstruído considerando apenas os *rivers* do OSM. Observando a Tabela 14 destaca-se o valor obtido para a média da diferença entre o MDE de referência e o MDE reconstruído usando *rivers* e *streams* pois, é o que apresenta o menor valor (-4,5 m) em relação aos valores obtidos para o MDE original (SRTM 30) e para o MDE reconstruído usando *rivers* (-6,0 m para ambos). Os valores da raiz quadrada do erro quadrático médio diminuíram ligeiramente para os MDEs transformados, sendo que, a diminuição foi ligeiramente maior para o MDE reconstruído com *rivers* (27,46 m), em virtude de também se ter verificado uma maior diminuição do desvio padrão para este modelo.

Tabela 14: Média, desvio padrão, a raiz quadrada do erro quadrático médio, valores máximo e mínimo das diferenças entre o MDE de referência e cada MDE i em análise.

MDE i	$\overline{MDE_Dif_i}$ (m)	$\sigma_{MDE_Dif_i}$ (m)	$REQM_{MDE_Dif_i}$ (m)	$\max(MDE_{Dif_i})$ (m)	$\min(MDE_{Dif_i})$ (m)
SRTM 30	-6,0	27,5	28,14	43	-53
MDE reconstruído (<i>rivers+streams</i>)	-4,5	27,7	28,06	43	-52
MDE reconstruído (<i>rivers</i>)	-6,0	26,8	27,46	40	-52

Isto mostra que a exatidão do MDE reconstruído considerando *rivers* e *streams* aumenta quando comparado com os dados de referência (MDE do Ordnance Survey). O desvio padrão, bem como, os valores máximo e mínimo das diferenças não mostram mudanças significativas, exceto um ligeiro decréscimo do desvio padrão e do valor máximo para o MDE obtido considerando apenas os valores *rivers*.

A Figura 49 mostra a distribuição espacial dessas diferenças para o MDE SRTM 30 (a), para o MDE reconstruído, considerando *rivers* e *streams* (b) e para o MDE reconstruído, considerando apenas os valores *rivers* (c). Pode ainda observar-se que existe

um maior número de *pixels* em a) e c) de cor vermelha, que correspondem às maiores diferenças positivas entre o MDE de referência e o MDE em análise (neste caso o SRTM 30 e o MDE reconstruído usando apenas os *rivers*). Estas diferenças estão compreendidas entre 21 m e 40 m. Na Figura 49 b) pode ver-se que existem mais regiões com cor amarela e laranja claro, a que correspondem as diferenças próximas de zero metros e aparecem menos regiões com cor vermelha. As regiões com diferenças negativas (ilustradas a cor verde) correspondem a regiões onde o MDE reconstruído é mais elevado do que o MDE de referência e essas regiões mantêm-se mais ou menos inalteradas em a), b) e c). Uma análise mais detalhada mostra que estas regiões estão localizadas nas áreas mais elevadas, onde a rede hidrográfica utilizada para reconstruir o MDE SRTM 30 tem menor influência.

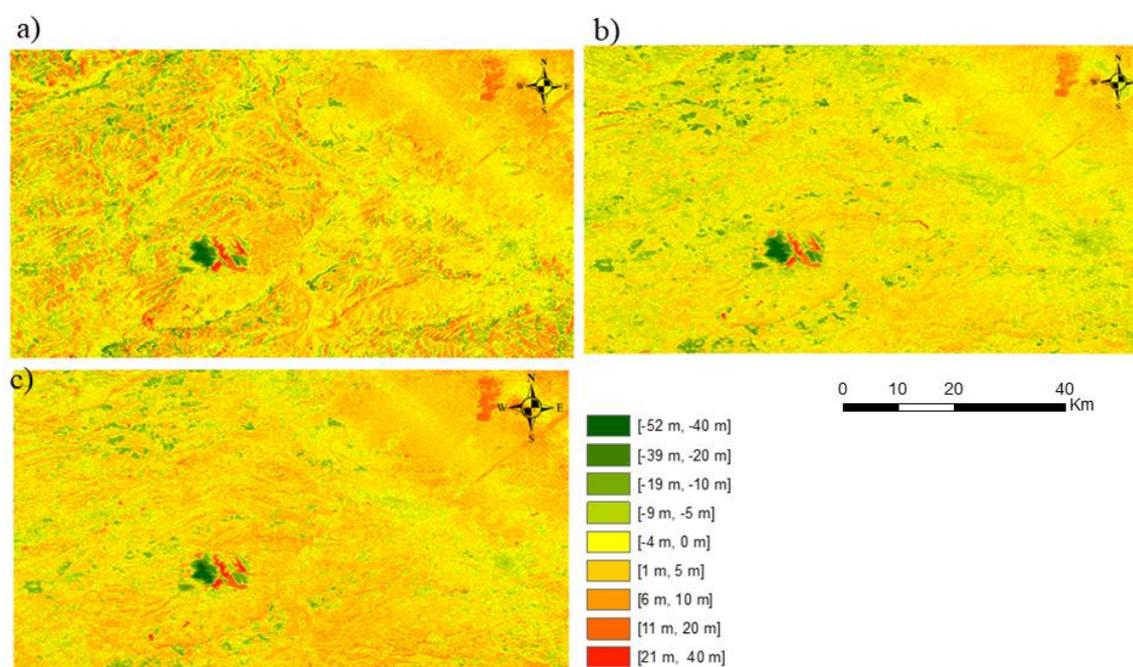


Figura 49: Diferenças de elevação entre o MDE de referência e: a) MDE SRTM 30 original; b) MDE reconstruído usando *rivers* e *streams* e c) MDE reconstruído usando apenas *rivers*.

5.3.3.2 Exatidão do declive

A Figura 50 mostra o declive extraído do MDE de referência (a), do SRTM 30 original (b) e do MDE reconstruído utilizando *rivers* e *streams* (c). Podem observar-se algumas

diferenças, em particular nas regiões envolvidas por círculos de cor preta. Refira-se por exemplo, na zona 1) podem ser identificados facilmente triângulos nos dados provenientes do MDE de referência, o que indica claramente que este MDE resultou de um MDE utilizando uma estrutura de rede irregular de triângulos (TIN – *Triangulated Irregular Network*).

Os resultados estatísticos das diferenças de declive são apresentados na Tabela 15. É apresentado o valor da média ($\overline{Declive_{Dif_i}}$), desvio padrão ($\sigma_{Declive_{Dif_i}}$), a raiz quadrada do erro quadrático médio ($REQM_{Declive_{Dif_i}}$), valores máximo e mínimo das diferenças ($Declive_{Dif_i}$) entre o mapa de declive derivado do MDE de referência e os mapas de declive derivados do MDE SRTM 30 original e do MDE reconstruído considerando *rivers* e *streams*.

Tabela 15: Média, desvio padrão, a raiz quadrada do erro quadrático médio, valores máximo e mínimo das diferenças entre o declive derivado do MDE de referência e os mapas de declive extraídos a partir do MDE original e do MDE reconstruído utilizando *rivers* e *streams*.

Declive extraído do DEM i	$\overline{Declive_{Dif_i}}$ (graus)	$\sigma_{Declive_{Dif_i}}$ (graus)	$REQM_{Declive_{Dif_i}}$ (graus)	$max(Declive_{Dif_i})$ (graus)	$min(Declive_{Dif_i})$ (graus)
SRTM 30	2,4	10,0	10,28	19	-15
MDE reconstruído (<i>rivers</i> + <i>streams</i>)	-0,4	10,5	10,51	18	-18

Analisando a Tabela 15 pode ver-se que a média da diferença do declive obtido a partir do MDE de referência e o declive obtido a partir do MDE reconstruído considerando *rivers* e *streams* decresce, apresentando o valor de -0,4 graus quando comparado com o declive extraído a partir do MDE SRTM 30 original, que apresenta um valor de 2,4 graus. No entanto, a raiz quadrada do erro quadrático médio aumenta ligeiramente de 10,28 graus para 10,51 graus o que mostra que a metodologia não permite melhorar o declive para o MDE que foi criado com os *rivers* e *streams* extraídos do OSM.

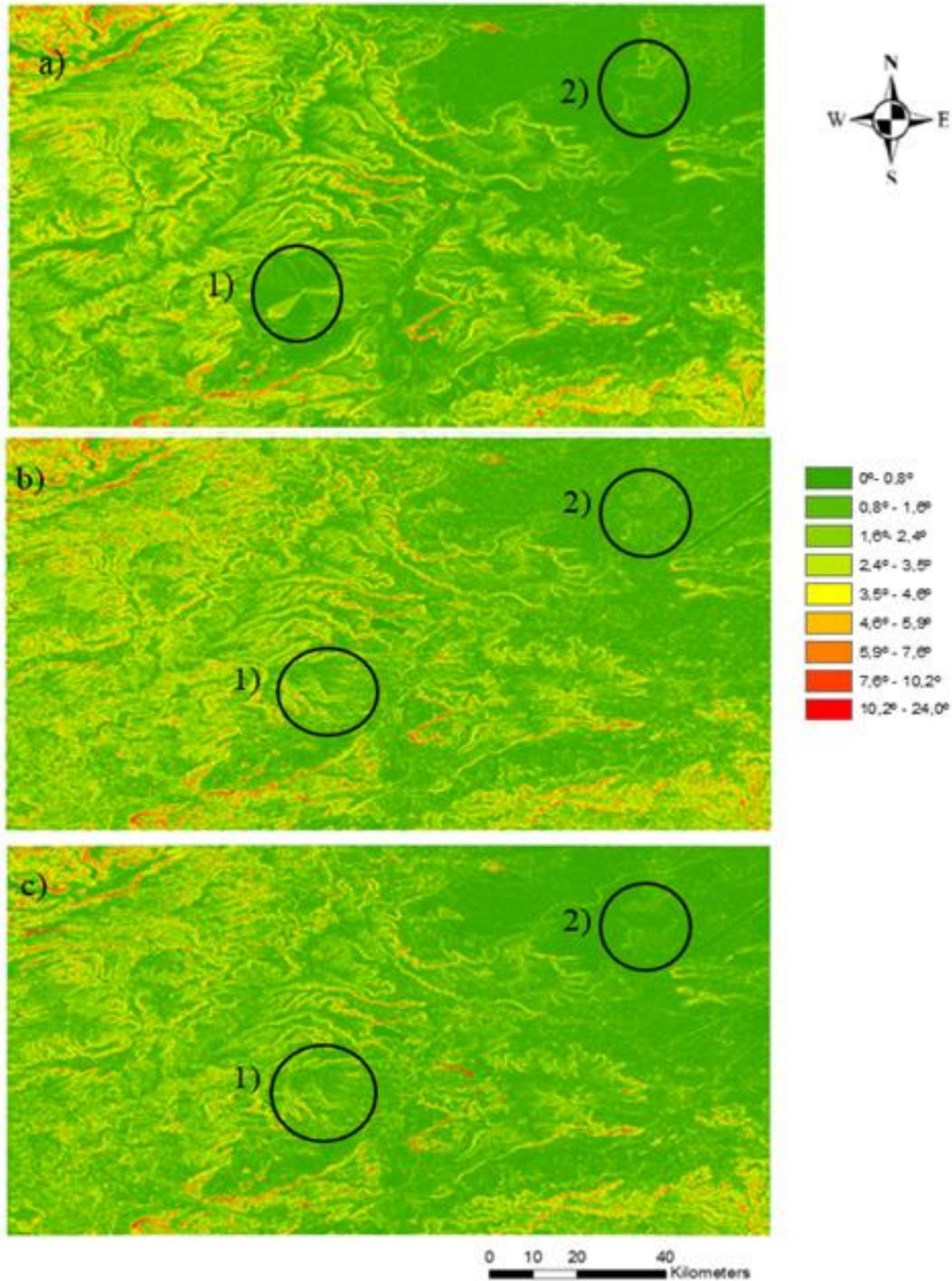


Figura 50: Declive da área de estudo extraído de: a) MDE de referência do Ordnance Survey; b) MDE SRTM 30 original e c) MDE reconstruído utilizando *rivers* e *streams*.

5.3.3.3 Exatidão das redes hidrográficas

Exatidão horizontal

A Figura 51 mostra a rede hidrográfica de referência (a), a rede hidrográfica obtida a partir do MDE SRTM 30 original (b), a rede hidrográfica obtida a partir do MDE reconstruído utilizando *rivers* e *streams* (c) e a rede hidrográfica obtida a partir do MDE reconstruído utilizando apenas *rivers* (d). Analisando visualmente observam-se algumas diferenças entre a rede de referência e as redes geradas a partir do MDE original e dos MDEs reconstruídos, nomeadamente na zona de mais baixa altitude correspondente à região Nordeste da área de estudo. Embora se observem algumas linhas desconectadas na rede hidrográfica de referência nesta região, também se nota que é nesta zona mais plana da área de estudo que as redes derivadas dos MDEs reconstruídos estão mais perto da rede hidrográfica de referência, comparando com a rede extraída do MDE SRTM 30 original.

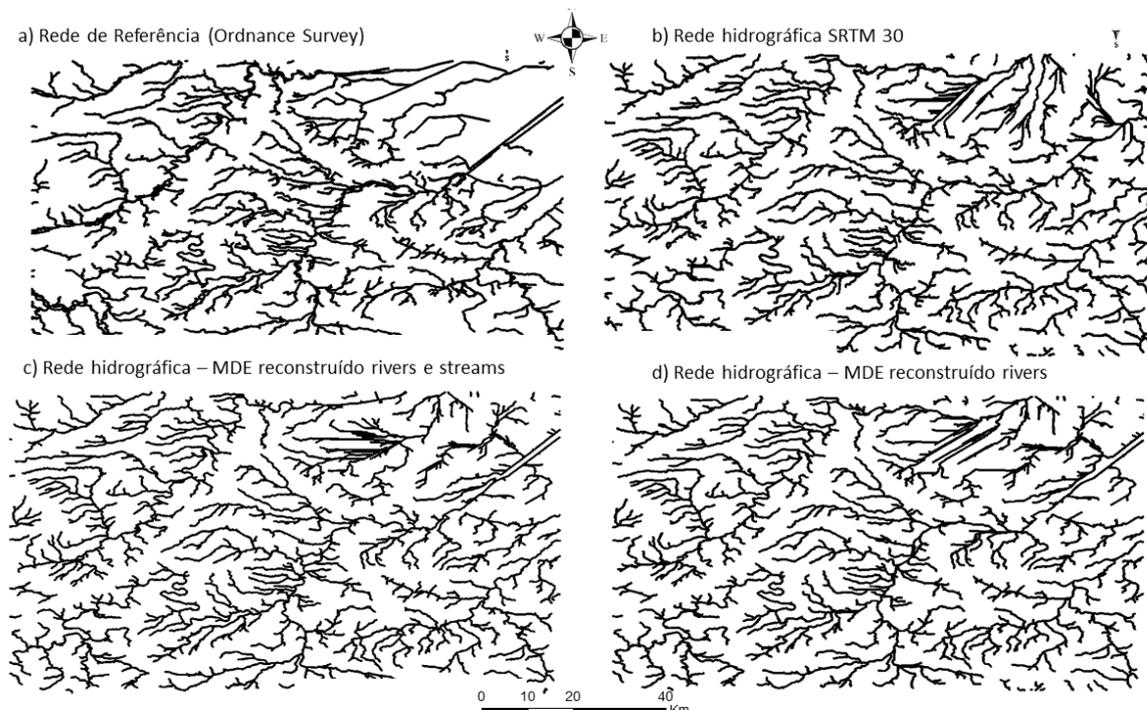


Figura 51: Rede hidrográfica de referência do Ordnance Survey, b) rede hidrográfica extraída do MDE SRTM 30 original, c) rede hidrográfica extraída do MDE reconstruído utilizando *rivers* e *streams* do OSM e d) rede hidrográfica extraída do MDE reconstruído utilizando apenas *rivers* do OSM.

Na secção 4.5 foi descrito o procedimento utilizado para quantificar o quanto as redes derivadas do MDE original e as redes derivadas dos MDEs reconstruídos estão próximas da rede hidrográfica de referência. A Tabela 16 mostra os resultados obtidos para a média, desvio padrão e a raiz quadrada do erro quadrático médio das distâncias horizontais entre as redes em análise e a rede hidrográfica de referência, considerando um *buffer* de 500 m em torno da rede hidrográfica de referência.

Os resultados mostram uma diminuição das distâncias horizontais entre as redes hidrográficas obtidas a partir dos MDEs reconstruídos e a rede de referência, comparando com a distância horizontal obtida entre a rede hidrográfica derivada do SRTM 30 original e a rede de referência. Esta diminuição é maior para o MDE reconstruído considerando *rivers* e *streams*, onde os valores da média diminuíram de 87,0 m para 52,9 m. Já para o MDE considerando apenas os *rivers*, o valor da média das distâncias diminuiu de 87,0 m para 76,0 m.

Tabela 16: Média (m), desvio padrão (σ) e a raiz quadrada do erro quadrático médio ($REQM$) das distâncias horizontais entre os pontos de cada rede um estudo (a extraída do MDE original, a extraída do MDE reconstruído utilizando *rivers* e *streams* e a extraída do MDE reconstruído usando apenas *rivers*) e a rede hidrográfica de referência.

Rede hidrográfica extraída de MDE i	média (m)	$\sigma(m)$	$REQM(m)$
SRTM 30	87,0	113,5	143,01
MDE reconstruído (<i>rivers</i> + <i>streams</i>)	52,9	98,1	111,5
MDE reconstruído (<i>rivers</i>)	76,0	108,9	132,8

Para além da análise da exatidão posicional das redes hidrográficas efetuada sobre toda a área de estudo, foi também efetuada a mesma análise em zonas com diferentes características de relevo selecionadas sobre a área de estudo. Foram selecionadas quatro zonas indicadas na Figura 52, aqui designadas por Z1, Z2, Z3 e Z4. As zonas Z1 e Z2 correspondem a regiões de maior altitude e de maior variabilidade de declive, a zona Z3 corresponde a zona de transição entre zona de variabilidade altimétrica e zona mais plana e por último, a zona Z4 corresponde a uma zona mais plana e de menor altitude.

Para cada zona Z1, Z2, Z3 e Z4 (Figura 52), foram construídos gráficos referentes ao valor médio das distâncias horizontais entre a rede hidrográfica de referência utilizada e cada uma das redes hidrográficas em análise: a rede extraída do MDE original, a rede

extraída do MDE reconstruído usando *rivers* e *streams* e a rede extraída do MDE usando apenas *rivers* (Figura 53).

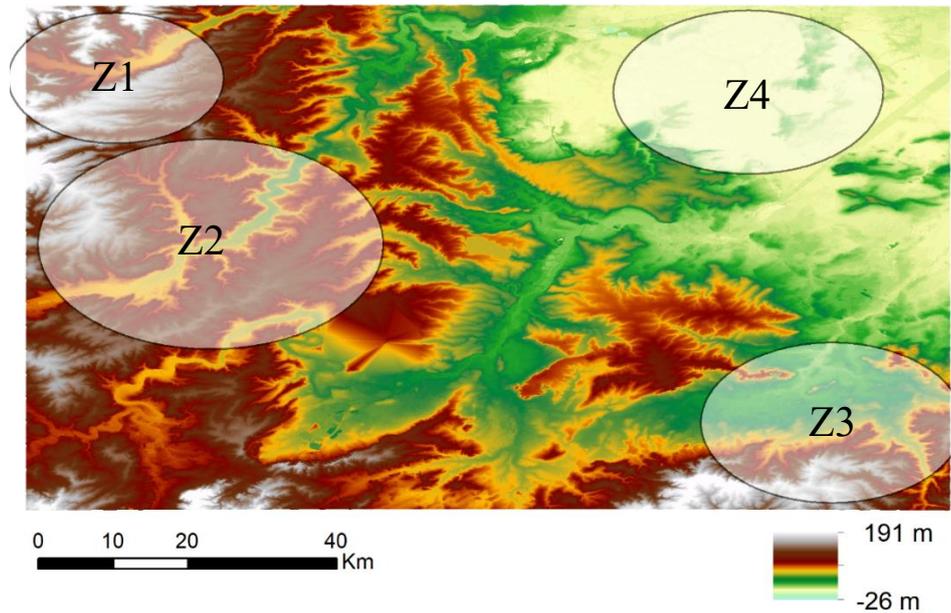


Figura 52: Zonas definidas sobre a área de estudo e correspondentes a relevo com diferentes características.

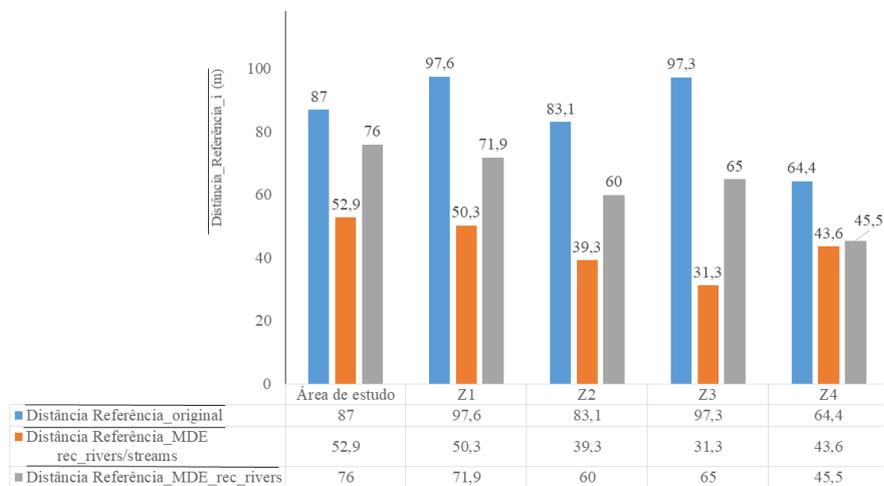


Figura 53: Gráfico que representa a variação da média das distâncias horizontais entre a rede hidrográfica de referência e as redes hidrográficas extraídas do MDE original (SRTM 30), do MDE reconstruído com *rivers* e *streams* e as redes extraídas do MDE reconstruído com *rivers* do OSM.

Os resultados apresentados na Figura 53 mostram que para todas as zonas consideradas, os melhores resultados são obtidos com o MDE reconstruído com *rivers* e *streams*, sendo os melhores resultados obtidos para as zonas Z2 e Z3 (respetivamente, zona de maior variabilidade de declive e altitude e zona de transição para a zona plana), onde, por exemplo, para a zona Z3 a média das distâncias à rede hidrográfica de referência diminui de 97,3 m para a rede extraída do MDE original (SRTM 30) para 31,3 m para a rede hidrográfica extraída do MDE reconstruído com *rivers* e *streams*.

Exatidão Vertical

A exatidão vertical das redes hidrográficas foi avaliada de acordo com a descrição feita em 4.5. A Figura 54 mostra um gráfico onde se representa a média da distância vertical das redes hidrográficas extraídas do MDE original (SRTM 30), do MDE reconstruído com *rivers* e *streams* e do MDE reconstruído com *rivers* à rede hidrográfica de referência, sendo representada para toda a área de estudo e para cada zona Z1, Z2, Z3 e Z4.

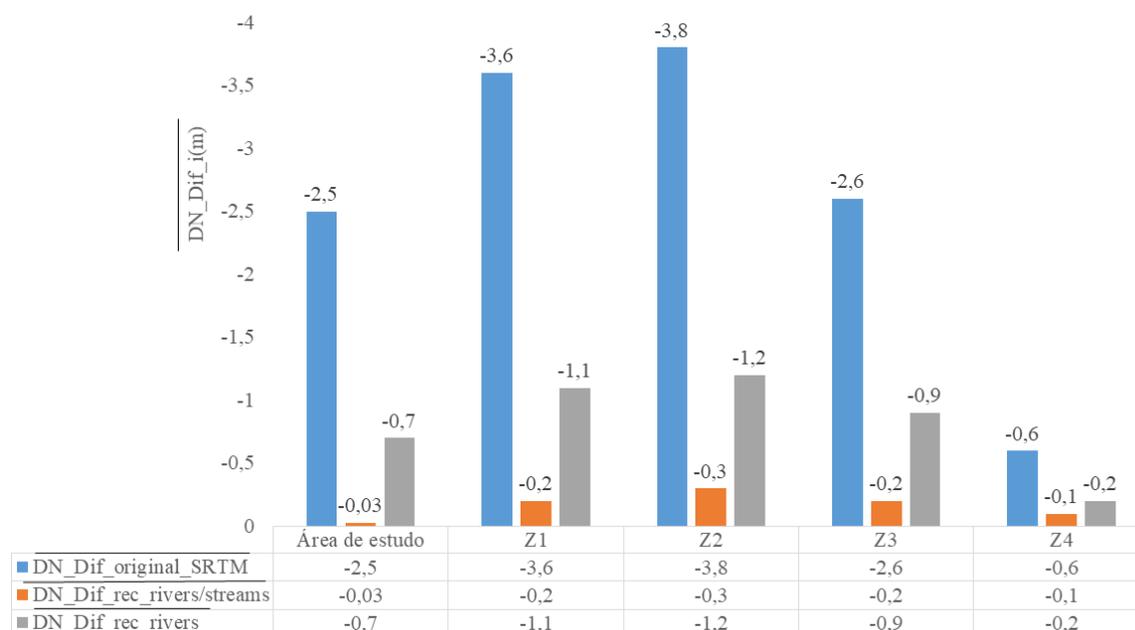


Figura 54: Média da distância vertical entre a rede hidrográfica de referência extraída do MDE de referência, e as redes extraídas do MDE original (SRTM 30), do MDE reconstruído com *rivers* e *streams* e as redes extraídas do MDE reconstruído com *rivers* do OSM.

Os resultados apontam para uma melhoria na exatidão vertical das redes hidrográficas em toda a área de estudo, sendo o melhor resultado obtido para as redes extraídas do MDE reconstruído com *rivers* e *streams*, onde ocorreu uma diminuição de -2,5 m para -0,03 m. É também esta rede hidrográfica que consegue os melhores resultados nas zonas Z1, Z2, Z3 e Z4 em análise. De realçar que uma vez mais que, é o MDE transformado com os *rivers* e *streams* do OSM que consegue alcançar os melhores resultados em termos de proximidade à rede de referência. Para a rede hidrográfica derivada do MDE reconstruído com *rivers*, obtém-se o menor valor para a média das diferenças relativamente à rede de referência na zona Z4 (-0,2 m), que corresponde à zona mais plana da área de estudo, onde a influência das linhas correspondentes ao *value streams* é mais importante para a correção dos MDEs.

Para as quatro zonas determinou-se também o declive do MDE de referência, do MDE original (SRTM 30) e do MDE reconstruído com *rivers* e *streams*. A Tabela 17 apresenta a média, o desvio padrão e a raiz quadrada do erro quadrático médio das diferenças de declive para as quatro zonas em análise.

Tabela 17: Média (m), desvio padrão (σ) e a raiz quadrada do erro quadrático médio ($REQM$) das diferenças de declive extraído do MDE de referência e dos MDEs em estudo (original e o reconstruído utilizando *rivers* e *streams*).

Diferença de declive entre o MDE de referência e o MDE _i	Zonas	média (<i>graus</i>)	σ (<i>Graus</i>)	$REQM$ (<i>Graus</i>)
MDE Referência – MDE original	Z1	0°	5,5°	5,5°
	Z2	-0,5°	5,2°	2,3°
	Z3	3,7°	8,9°	9,6°
	Z4	0,5°	8,9°	8,9°
MDE Referência – MDE reconstruído (<i>rivers</i> + <i>streams</i>)	Z1	-5,6°	8,8°	10,4°
	Z2	0°	4,3°	4,3°
	Z3	1°	9,5°	9,6°
	Z4	2°	7,8°	8,1°

Analisando a Tabela 17, pode ver-se que o valor médio da diferença do declive é 0° na zona Z1, considerando o MDE original e toma esse mesmo valor (0°) na zona Z2, quando se considera o MDE reconstruído. De referir que, o valor médio que se obteve para a região global da área de estudo foi de 2,4°. Já as maiores diferenças de declive ocorrem na zona Z3, para o MDE original (3,7°) e para a zona Z1 (-5,6°) para o MDE reconstruído, correspondentes às zonas mais elevadas.

Também se pode observar que o valor médio das diferenças obtido para toda a área de estudo (2,4°) e considerando o MDE original é superior ao valor médio obtido para esse MDE em todas as zonas, exceto na zona Z3. Já para os valores obtidos para o MDE reconstruído observa-se que o valor obtido para a zona total da área de estudo (-0,5°) é inferior aos valores obtidos para todas as zonas, exceto a zona Z2 que, como já foi referido, atingiu um valor médio de 0° de diferença de declive.

Relativamente aos valores obtidos para a *REQM*, observa-se que considerando o MDE original, os piores valores ocorrem para as zonas Z3 e Z4 (zonas mais planas) com valores de 9,6° e 8,9°, respetivamente. Já para o MDE reconstruído pode ver-se que os valores mais elevados da *REQM* ocorrem nas zonas Z1 e Z3, com os valores de 10,4° e 9,6°, respetivamente, sendo o valor obtido para a zona Z1 consideravelmente pior que o valor obtido para o MDE original (SRTM 30).

A análise dos resultados permite-nos constatar que o declive extraído do MDE reconstruído melhorou em algumas zonas e noutras não, afastando-se dos valores de declive extraído do MDE de referência. A Figura 55 mostra os mapas de declive das quatro zonas Z1, Z2, Z3 e Z4 extraídos do MDE de referência, do MDE original (SRTM 30) e do MDE reconstruído com *rivers* e *streams*. Na Figura 55 (c) na zona Z3 observa-se uma região de declive acentuado e que provavelmente se pode dever a incorreta orientação de linha de água do OSM (de jusante para montante).

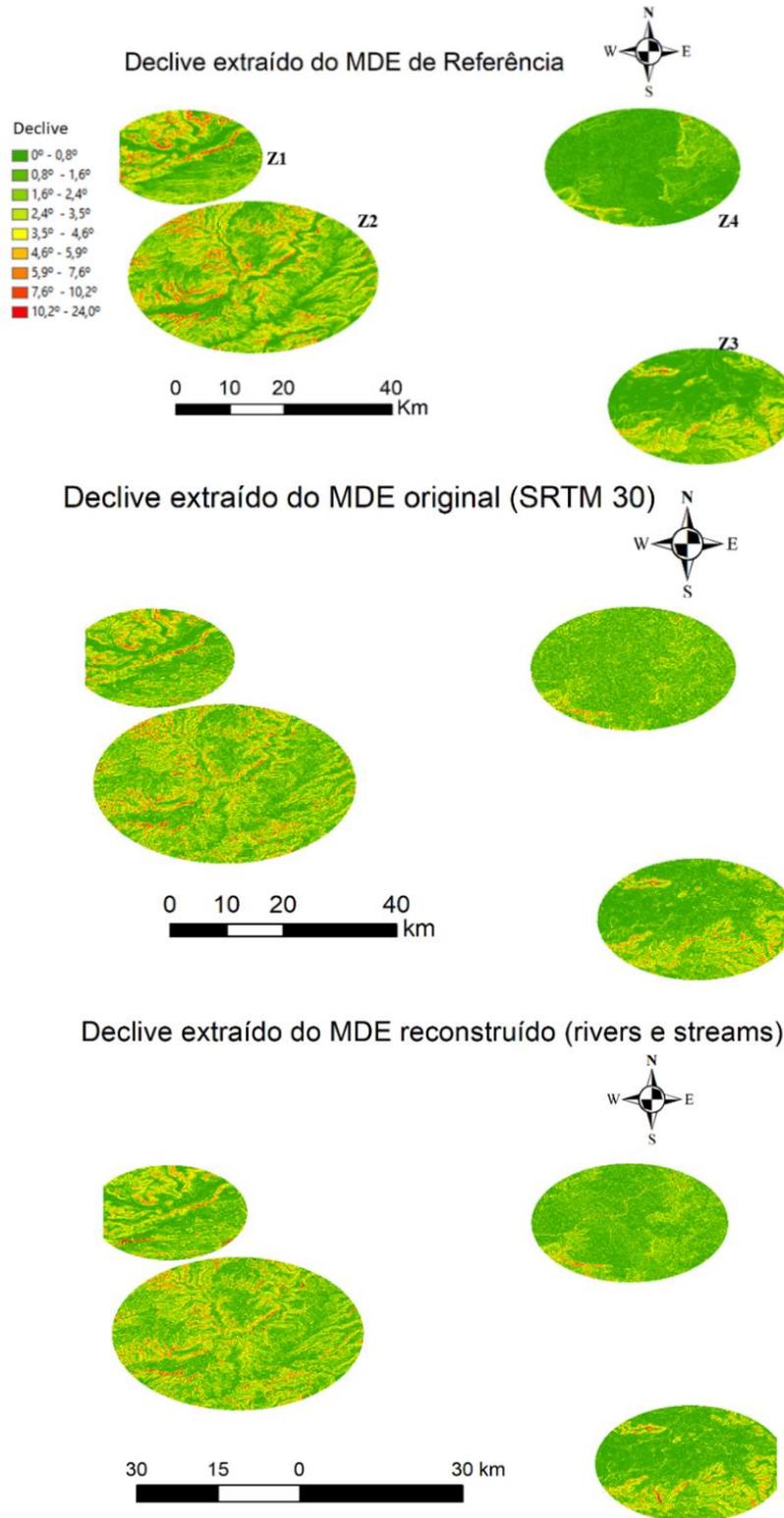


Figura 55: Mapas de declive das zonas Z1, Z2, Z3 e Z4.

5.3.3.4 Análise dos rios

Para uma análise mais detalhada das mudanças obtidas com os MDEs reconstruídos, foram extraídos das redes hidrográficas troços de dois rios, um localizado numa região mais acidentada e outro rio localizado na área mais plana da área de estudo. Foram traçados os perfis dos dois rios para cada uma das redes hidrográficas em análise. A Figura 56 mostra a localização dos rios aqui referidos como rio 1) localizado na zona mais acidentada e rio 2) localizado na zona mais plana da área de estudo.

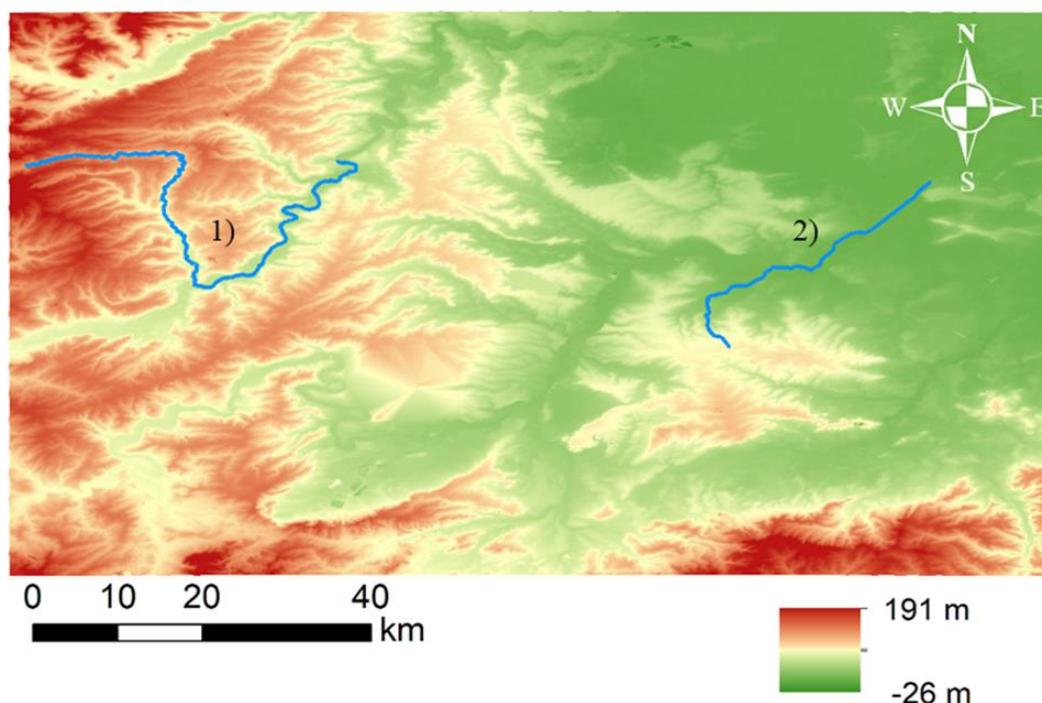


Figura 56: Localização dos rios 1), localizado na zona acidentada e rio 2) localizado na zona plana.

A Figura 57 mostra a planimetria dos rios 1) e 2) apresentados na Figura 56, extraídos da rede hidrográfica de referência (a cor preta), do MDE original (SRTM 30) (a cor vermelha) e do MDE reconstruído utilizando *rivers* e *streams* (a cor verde).

Observando a Figura 57 pode observar-se que a maior parte dos segmentos dos rios extraídos do MDE reconstruído são coincidentes com os dados de referência, exceto nas regiões evidenciadas com círculos e retângulo a tracejado. Também se pode observar para o rio 2) que o MDE reconstruído foi capaz de corrigir a posição ao longo de uma

considerável extensão do rio, quando comparado com a localização do rio extraído do MDE original (SRTM 30), onde a distância horizontal entre as linhas atingiu aproximadamente o valor de 1700 m.

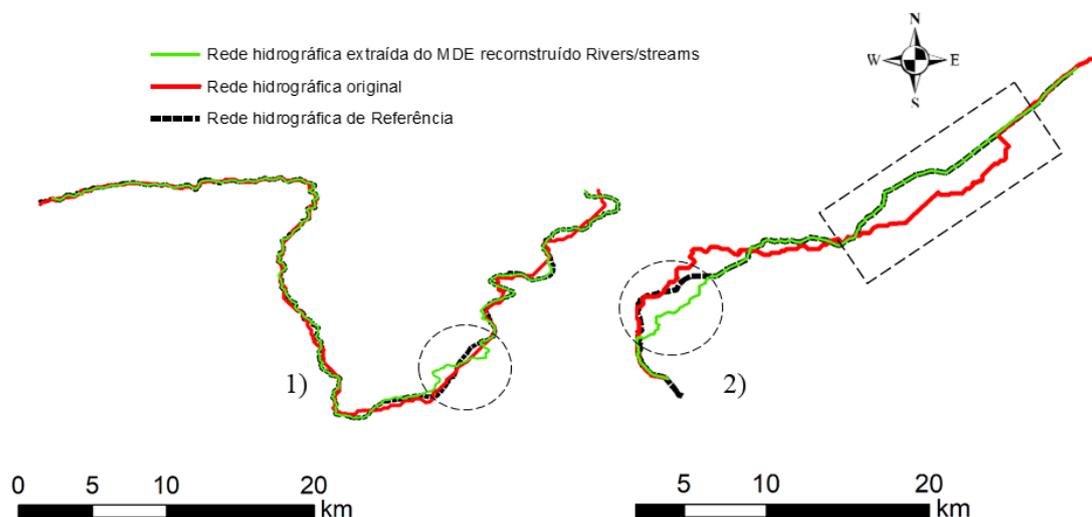


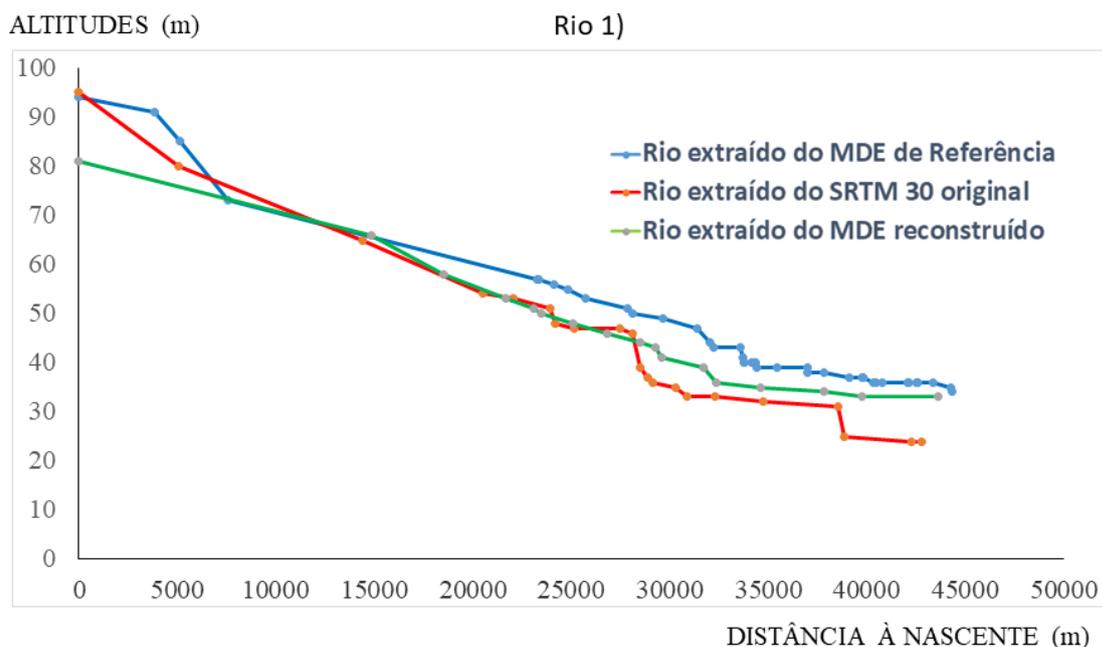
Figura 57: mostra a planimetria dos rios 1) e 2) apresentados na Figura 56, extraídos da rede hidrográfica de referência (a cor preta), do MDE original (SRTM 30) (a cor vermelha) e do MDE reconstruído utilizando rivers e streams (a cor verde).

Observando a Figura 57 pode observar-se que a maior parte dos segmentos dos rios extraídos do MDE reconstruído são coincidentes com os dados de referência, exceto nas regiões evidenciadas com círculos e retângulo a tracejado. Também se pode observar para o rio 2), que o MDE reconstruído foi capaz de corrigir a posição ao longo de uma considerável extensão do rio, quando comparado com a localização do rio extraído do MDE original (SRTM 30), onde a distância horizontal entre as linhas atingiu aproximadamente o valor de 1700 m.

A Figura 58 mostra os perfis longitudinais dos rios 1) e 2) indicados na Figura 56. Analisando os perfis, pode observar-se para os dois rios em análise, que as redes hidrográficas geradas pelos MDEs reconstruídos estão, em geral, mais próximas dos dados de referência. A única exceção é o início do rio 1) entre as distâncias à nascente, compreendidas entre os valores de 0 m e 5 000 m, onde a diferença vertical entre a linha de referência e a linha reconstruída tem valores próximos dos 14 m. Isto é devido ao facto de o rio extraído do MDE reconstruído ter o seu ponto inicial numa zona mais a jusante do

rio extraído do MDE de referência e por isso tem uma menor altitude. Também pode observar-se para o rio 1) que as menores diferenças altimétricas ocorrem entre as distâncias à nascente de 7 000 m e 16 000 m para os rios extraídos do MDE original (SRTM 30) e para o MDE reconstruído.

Para o rio 2) as maiores diferenças entre a linha de referência e a linha reconstruída ocorrem no início do rio com um valor próximo de 25 m, isto acontece devido às mesmas razões apontadas no rio 1), ou seja, o início do rio 2) extraído do MDE original (SRTM 30) e do MDE reconstruído tem início numa região mais a jusante que o rio extraído do MDE de referência e por isso com menor altitude. Também se pode observar para este rio que, as maiores diferenças altimétricas entre o rio extraído do MDE de referência e os rios extraídos do MDE original e do MDE reconstruído ocorrem até ao valor de 4 000 m de distância à nascente, esta região corresponde a uma maior variação em termos de altitude. Na restante parte do rio, que corresponde a zonas de baixa altitude, ambas as linhas, a original e a reconstruída mostram uma crescente aproximação à linha de referência.



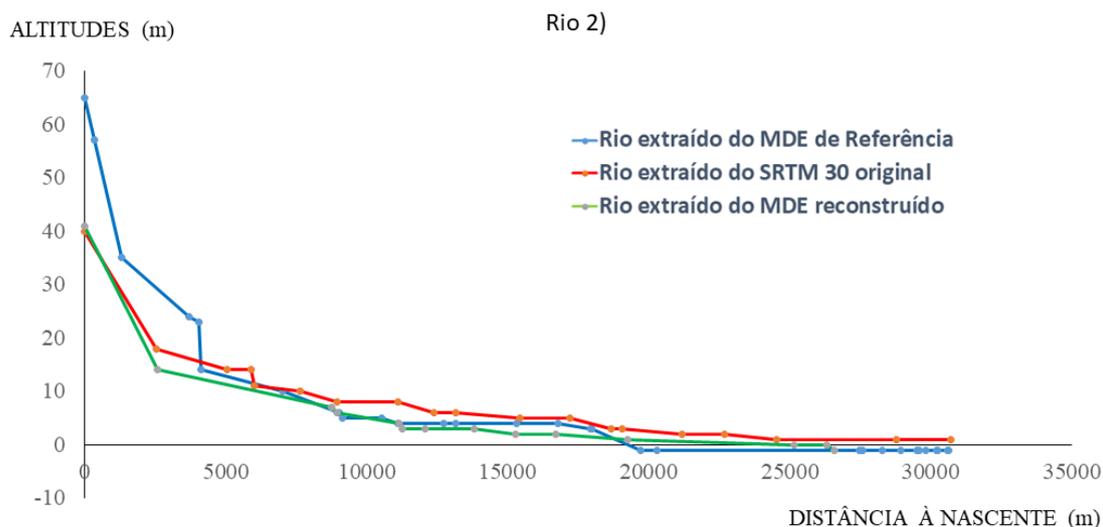


Figura 58: Perfis longitudinais dos rios 1) e 2).

5.3.3.5 Exatidão das bacias hidrográficas

A Figura 59 mostra as bacias hidrográficas geradas por um conjunto de três *pour points* selecionados para a análise das respetivas bacias. Como se pode observar a forma e dimensão das bacias obtidas com o MDE reconstruído considerando *rivers* e *streams*, (Figura 59 c)) é muito semelhante às bacias hidrográficas obtidas a partir do MDE de referência (Figura 59 a)).

As bacias hidrográficas geradas a partir do MDE original (SRTM 30) (Figura 59b)) apresentam diferenças significativas relativamente às bacias geradas pelo MDE de referência para as bacias 1 e 2 e os resultados obtidos para o MDE reconstruído usando apenas *rivers*, é muito semelhante ao resultado obtido a partir do MDE original (SRTM 30). Isto permite concluir que a metodologia desenvolvida para os MDEs transformados recorrendo apenas aos *rivers* do OSM não melhora a exatidão na delimitação das bacias. O mesmo já não sucede quando se criam MDEs com *rivers* e *streams*, onde de facto, a exatidão na delimitação da bacia melhora.

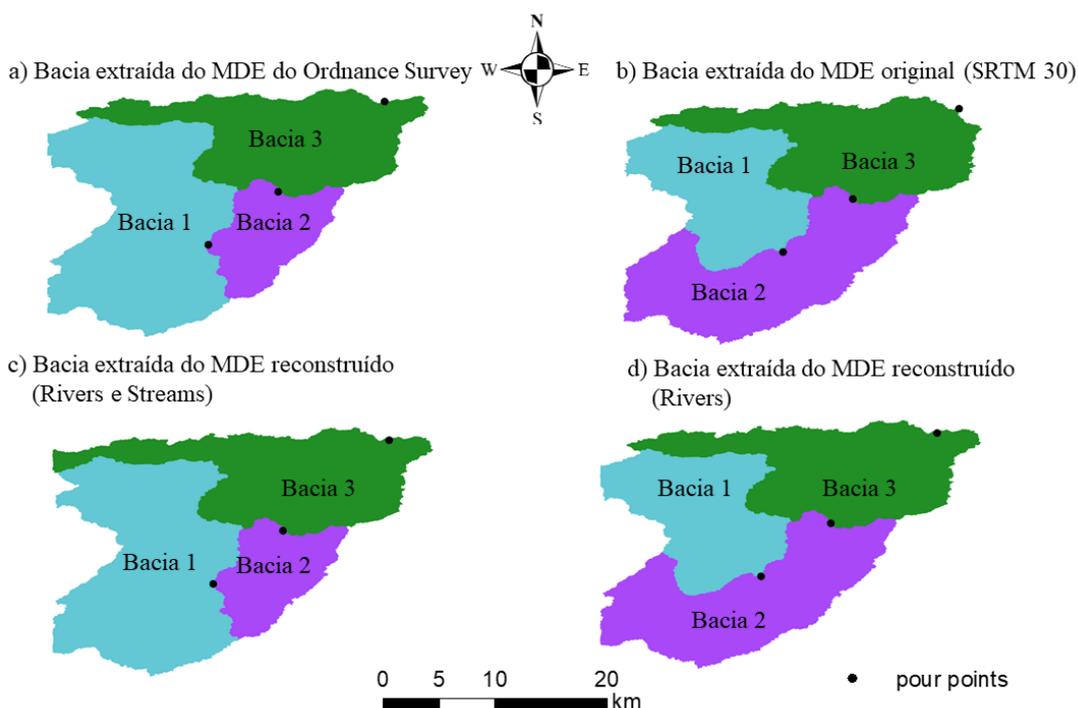


Figura 59: Bacias hidrográficas geradas a partir da indicação de *pour points* a partir: a) do MDE de referência, b) do MDE original SRTM 30, c) do MDE reconstruído utilizando os *rivers* e *streams* do OSM e d) do MDE reconstruído considerando apenas os *rivers* do OSM.

Podem observar-se as diferenças de área entre as bacias obtidas a partir do MDE de referência e as bacias obtidas a partir do MDE original (SRTM 30) e dos MDEs reconstruídos. Pode também visualizar-se que, as áreas da bacia obtidas a partir do MDE reconstruído usando *rivers* e *streams* do OSM são muito similares às áreas das bacias obtidas a partir do MDE de referência, com a maior diferença obtida na bacia 3 (-8 km^2), devido a uma região extra identificada na parte superior esquerda da figura, como se pode ver na Figura 59 a) e c).

Foi calculado o valor das áreas das bacias geradas pelos diferentes MDEs em análise e as áreas das bacias extraídas do MDE de referência. A Tabela 18 apresenta os valores do referido cálculo.

Tabela 18: Valores da área das bacias extraídas dos: MDE de referência, MDE original (SRTM 30), MDE reconstruído usando *rivers* e *streams* e o MDE reconstruído utilizando *rivers* do OSM.

Rede hidrográfica extraída de MDE <i>i</i>	Área (km ²)		
	Bacia 1	Bacia 2	Bacia 3
MDE de referência	351	108	244
MDE original (SRTM 30)	201	266	240
MDE reconstruído (<i>rivers</i> + <i>streams</i>)	348	107	252

A Figura 60 ilustra graficamente as diferenças entre as áreas das bacias extraídas do MDE de referência e as áreas das bacias extraídas dos MDEs em análise (SRTM 30 e MDE reconstruído com *rivers* e *streams*). Observa-se que as menores diferenças foram obtidas para as bacias extraídas do MDE reconstruído com *rivers* e *streams*. As diferenças de área para a bacia 1 apresenta o valor de 3 km², na bacia 2 obteve-se uma diferença de 1 km², sendo que, a bacia 3 apresenta a maior diferença (-8 km²) devido à região extra já referida anteriormente. As áreas das bacias extraídas do MDE reconstruído com *rivers*, afastaram-se dos valores das áreas das bacias de referência. A metodologia demonstrou que usando *rivers* e *streams* na reconstrução dos modelos, a exatidão obtida para o limite da bacia aumenta.

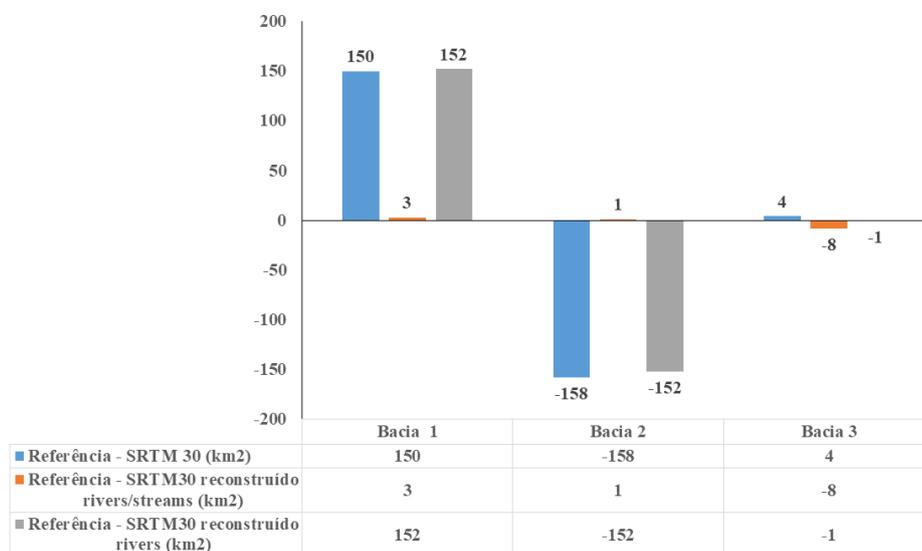


Figura 60: Diferença das áreas das bacias geradas por pour points selecionados e extraídas do MDEs em análise e as áreas das bacias extraídas do MDE de referência.

Após a descrição dos três estudos de caso onde foi aplicada a metodologia, apresentam-se de seguida algumas conclusões e também algumas sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros.

Capítulo VI - CONCLUSÕES

O objetivo principal da tese focou-se no desenvolvimento de uma metodologia que recorrendo a dados de livre acesso, nomeadamente altimetria derivada dos Modelos Digitais de Elevação Globais (MDEGs) e Informação Geográfica Voluntária, linhas de água do OpenStreetMap (OSM), permitisse a construção de novos MDEs a partir dos quais se conseguissem extrair linhas de água com maior exatidão que a obtida para as linhas de água extraídas dos MDEGs originais. A melhoria da exatidão horizontal e vertical das linhas de água será útil no âmbito da Hidrologia, na medida em que melhora a modelação hidrológica (e.g. linhas de água mais bem caracterizadas; parâmetros relacionados com a rede de drenagem mais representativos). A metodologia utiliza apenas dados de livre acesso que poderão ser obtidos de forma gratuita e estão disponíveis para qualquer região do mundo, mesmo as zonas mais remotas. Considera-se, por isso que a obtenção desta informação de base mais exata possa ser uma mais-valia para a modelação hidrológica. Dos trabalhos realizados e descritos nesta tese apresentam-se as conclusões seguintes.

Na aplicação da metodologia podem destacar-se algumas potencialidades, a primeira é que se conseguiu melhorar a exatidão planimétrica e altimétrica das linhas de água através de uma metodologia facilmente implementável e acessível, o que permitirá que ela seja amplamente utilizada mesmo por técnicos não especialistas no uso de MDEGs e de IGV (Monteiro et al., 2018a, Monteiro et al., 2018b).

No estudo de caso 3, foram reconstruídos dois MDEs, um utilizando apenas os rios principais (*rivers*) e outro utilizando (*rivers* e *streams*) rios principais e rios secundários. Os resultados obtidos para a exatidão planimétrica das linhas de água extraídas dos dois modelos, mostraram uma melhoria. Verificou-se que essa melhoria foi de diferente amplitude para os dois MDEs obtendo-se os melhores resultados quando se consideraram os rios principais (*rivers*) e os rios secundários (*streams*). Em termos altimétricos aconteceu a mesma situação, ou seja, os melhores resultados foram obtidos para as linhas de água extraídas dos MDEs reconstruídos considerando *rivers* e *streams* (Monteiro et al. 2018b).

Também foi analisada a exatidão na definição do limite das bacias hidrográficas, comparando a área das bacias extraídas dos dois MDEs reconstruídos e a área das bacias extraídas do MDE original com as áreas das bacias derivadas do MDE de referência. Conclui-se que, a exatidão aumenta quando se consideram os MDEs reconstruídos com *rivers* e *streams*. A área das bacias extraídas destes MDEs aproxima-se muito mais da área das bacias extraídas do MDE de referência, enquanto no caso das bacias extraídas do MDE (usando *rivers*), a exatidão não melhora apresentando valores semelhantes aos das bacias extraídas dos MDEs originais (Monteiro et al., 2018b).

Foi feita a comparação do MDE original e dos MDEs reconstruídos com o MDE oficial considerado como referência. Os resultados mostram que a média das diferenças altimétricas entre o MDE reconstruído usando *rivers* e *streams* e o MDE de referência é menor que a média das diferenças entre o MDE original e o de referência (Monteiro et al., 2018b). Tal não acontece com o MDE reconstruído usando apenas os *rivers*. Estes resultados deixam-nos algumas reservas, na medida em que, não permitem concluir que o modelo reconstruído melhorou na sua globalidade, mas melhorou isso sim, nas zonas das linhas de água, pois, foram essas as regiões do modelo onde foram introduzidas, ainda que apenas planimetricamente, entidades geográficas (linhas de água do OSM) que foram interpoladas com a amostra regular de pontos cotados e que permitiu um ajustamento global verificando uma ligeira melhoria do MDE no global, mas provavelmente outras zonas terão piorado.

De referir também que, foi feita uma análise preliminar do declive comparando as diferenças do declive derivado do MDE reconstruído (*rivers* e *streams*) com o declive extraído do MDE de referência e os resultados mostraram que este parâmetro não melhorou com a reconstrução dos MDEs (Monteiro et al. 2018b).

Há que referir algumas limitações na metodologia, uma delas está associada à natureza da informação utilizada (IGV). Uma das condições para que algoritmo interpolador ANUDEM opere é que as linhas de água estejam devidamente orientadas de montante para jusante. É por isso necessário efetuar previamente processos de edição e/ou filtragem quer para fazer a orientação correta das linhas de água, quer para analisar problemas de cobertura de dados, por exemplo, zonas onde deveriam existir linhas de água e não estão

aí representadas (erro de omissão), ou a situação inversa, zonas onde não deveriam existir linhas de água e estão lá representadas (erro de comissão).

A metodologia mostrou que os dados do OSM são uma fonte valiosa para melhorar informação extraída dos MDEGs, nomeadamente as linhas de água e o limite da bacia, esta informação pode ser bastante útil para regiões do mundo onde não estejam disponíveis MDEs exatos à escala local ou regional.

Alguns desenvolvimentos futuros seriam, para além de se melhorar a exatidão das linhas de água, propõe-se o desenvolvimento de metodologias para melhorarem a exatidão do próprio MDE, bem como de alguns parâmetros topográficos derivados, como por exemplo, o declive. Poder-se-ia também analisar se a melhoria da exatidão das linhas de água iria influenciar a exatidão dos modelos hidrológicos, ou seja, analisar a sensibilidade da modelação hidrológica à exatidão das linhas de água (rede hidrográfica).

Tendo em conta que o *software* utilizado foi o ArcGIS (*software* proprietário), teria igualmente interesse utilizar *software* aberto, de modo a explorar a aplicação da metodologia proposta em locais onde este tipo de *software* não está disponível ou quando não seja facilmente acessível.

Sugere-se também para trabalho futuro incorporar outro tipo de dados do OSM relativos à Hidrologia de superfície, tais como, corpos de água, (e.g. lagos, albufeiras,...). Estes dados poderão ser integrados na metodologia apresentada de forma a melhorar a exatidão dos MDEs e dos parâmetros deles extraídos.

Propõe-se o estudo e a análise da exatidão do MDE e dos parâmetros topográficos em zonas específicas da área de estudo, concretamente as zonas próximas dos locais onde foi introduzida informação do OSM, ou seja, as zonas adjacentes às linhas de água e analisar aí a exatidão obtida.

Tinha interesse também caracterizar a sensibilidade da metodologia na reconstrução da superfície topográfica em diferentes tipologias de cobertura do solo e características geomorfológicas. Por exemplo, analisar a aplicação da metodologia a áreas com bastante vegetação e a áreas quase sem vegetação, por forma a avaliar o grau de influência do efeito

da vegetação na exatidão do MDE e dos parâmetros dele extraídos e também analisar essa distorção para os dois MDEGs ASTER e SRTM.

Sugere-se também a aplicação da metodologia a regiões com diferente cobertura de dados do OSM e onde existam dados de maior exatidão, que serviriam como dados de referência. O objetivo seria analisar a influência da cobertura de dados do OSM sobre a exatidão dos novos MDEs gerados e também dos novos parâmetros topográficos deles extraídos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELFATTAH, R. and NICOLAS, J.M. (2002). Topographic SAR Interferometry formulation for high-precision DEM generation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 2415-2426, DOI:10.1109/TGRS.2002.805071.
- AGUILAR, F.J., AGUERA, F., AGUILAR, M.A. and CARVAJAL, F. (2005). Effects of Terrain Morphology, Sampling Density, and Interpolation Methods on Grid DEM Accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71, 805-816.
- AL-BAKRI, M. and FAIRBAIRN, D. (2010). Assessing the accuracy of crowdsourced data and its integration with official spatial datasets. In: N.J. Tate and P.F. Fisher, eds. *Proceedings of the ninth international symposium on spatial accuracy assessment in natural resources and environmental sciences*, 20-23 July, Leicester, England, 317-320.
- ALI, A.L., SIRILERTWORAKUL, N., ZIPF, A. and MOBASHERI, A. (2016). Guided classification system for conceptual overlapping classes in OpenStreetMap. *ISPRS International Journal of Geographical Information*, 5, 87, DOI: 10.3390/ijgi5060087.
- ALIAS, A. and RAHMAN, J. (1994). Digital Terrain Model Data Structures. *Geoinformatik and Fakult. Bulletin Uk (Ur)*, 5, 61-72.
- ASTER GDEM Validation Team (2009). ASTER global DEM validation summary report. METI and NASA, 28pp.
- ANTONIOU, V. and SKOPELITI, A. (2015). Measures and Indicators of VGI Quality: An Overview. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-3/W5, 345-351.
- ANTONIOU, V. and SKOPELITI, A. (2017). *The Impact of the Contribution Microenvironment on Data Quality: The Case of OSM*. In: Foody, G., See, L., Fritz, S., Mooney, P., Olteanu-Raimond, A-M, Fonte, C.C. and Antoniou, V. (eds.) *Mapping and the Citizen Sensor*, 165-196. London: Ubiquity Press, U.K., DOI: <https://doi.org/10.5334/bbf.h>. License: CC-BY 4.0.
- ARDIANSYAH, D. and YOKOYAMA, R. (2002). DEM generation method from contour lines based on the steepest slope segment chain and a monotone interpolation function. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, 86-101, DOI.org/10.1016/S0924-2716(02)00117-X.

- AREFI, H. and REINARTZ, P. (2011). Accuracy enhancement of ASTER Global Digital Elevation Models using ICESat data. *Remote Sensing*, 3, 1323-1343.
- ARSANJANI, J., MOONEY, P., ZIPF, A. and SCHAUSS, A. (2015). *Quality assessment of the contributed land use information from OpenStreetMap versus authoritative datasets*. In: Joker Arsanjani J., Zipf A., Mooney P., Helbich M. (eds) *OpenStreetMap in GIScience*. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer, Cham, Heidelberg New York Dordrecht London.
- ASCE (2000). Artificial neural networks in Hydrology – I: preliminary concepts. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5, 115-123.
- ASPRS (1996). *Digital Photogrammetry – An Addendum to the Manual of Photogrammetry* (ed. C. Greve). Publication of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Maryland, U.S.A.
- AZEREDO FREITAS, H.R., FREITAS, C.C. and ROSIM, S. (2016) Drainage networks and watersheds delineation derived from TIN-Based digital elevation models. *Comput. Geosci.*, 92, 21-37.
- BALTSAVIAS, E.P. (1999). Airborne Laser Scanning: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 199-214.
- BATER, C.W. and COOPS, N.C. (2009). Evaluating error associated with LiDAR-derived DEM interpolation. *Computer Geoscience*, 35, 289-300.
- BINH, T. Q. and THUY, N. T. (2008). Assessment of the Influence of Interpolation Techniques on the Accuracy of Digital Elevation Model. *VNU Journal of Science, Earth Sciences*, 24, 176-183.
- BROVELLI, M.A., MINGHINI, M., MOLINARI, E. and ZAMBONI, G. (2016). Positional Accuracy Assessment of the OpenStreetMap Buildings Layer through Automatic Homologous Pairs Detection: The Method and a Case Study. *The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B2, XXIII ISPRS Congress*, 12-19 July, Prague, Czech Republic.
- BRUBAKER, K.M., MYERS, W.L., DROHAN, P.J., MILLER, D.A. and BOYER, E.W. (2013). The use of LiDAR terrain data in characterizing surface roughness and micro topography. *Applied Environmental Soil Science*, 13pp.

- BURROUGH, P. and McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographic Information Systems*. New York, Oxford University Press.
- CARABAJAL, C.C. and HARDING, D.J. (2005). ICESat validation of SRTMC-band Digital Elevation Models. *Geophysical Research Letters*, 32(22), L22S01. <http://dx.doi.org/10.1029/2005GL023957>.
- CAPINERI, C. (2016). *The Nature of Volunteered Geographic Information*. In: Capineri, C, Haklay, M, Huang, H, Antoniou, V, Kettunen, J, Ostermann, F and Purves, R. (eds.) *European Handbook of Crowdsourced Geographic Information*, 15–33. London: Ubiquity Press, DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/bax.b>. License: CC-BY 4.0.
- CIPELUCH, B., JACOB, R., WINSTANLEY, A. and MOONEY, P. (2010). Comparison of the accuracy of OpenStreetMap for Ireland with Google Maps and Bing Maps. In: N. J. Tate P. F. Fisher (eds.). *Proceedings, Ninth International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*, Accuracy 2010, Leicester, UK, July 20-23, 337-340.
- CONGALTON, R.G. and GREEN, K. (2009). *Assessing the accuracy of remotely sensed data principles and practices*. CRC Press.
- CHAPLOT, V., DARBOUX, F., BOURENNANE, H., LEGUÉDOIS, S., SILVERA, N. and PHACHOMPON, K. (2006). Accuracy of interpolation techniques for the derivation models in relation to landform types and data density. *Geomorphology*, 77, 126-141.
- CHEN, Z.S., HSIEH, C.F., JIANG, F.Y., HSIEH, T.H. and SUN, I.F. (1997). Relations of soil properties to topography and vegetation in a subtropical rain forest in southern Taiwan. *Plant Ecology*, 132, 229-241.
- CHRISMAN, N.R. (1982). A theory of cartographic error and its measurement in digital bases. *In Proceedings of Auto Carto*, Utrecht, Holland: EGIS Foundation, 5, 159-168.
- CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R. and MAYNS, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw – Hill, USA.
- COLEMAN, D.J., GEORGIADOU, Y. and LABONTE, J. (2009). Volunteering Geographic Information to Authoritative Databases: The Nature and Motivation of Producers. *International Journal of Spatial Data Infrastructures Research*, 4, 332-358.

- COLLINS, S.H. and MOON, G.C. (1981). Algorithms for dense digital terrain models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 47, 71-76.
- COSTA-CABRAL, M.C. and BURGESS, S.J. (1994). Digital Elevation Model Networks (DEMON): a model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Res.*, 30, 1681-1692.
- CSILLIK, O., EVANS, I.S. and DRAGUT, L. (2015). Transformation (normalization) of slope gradient and surface curvatures, automated for statistical analyses from DEMs. *Geomorphology*, 232, 65-77.
- CUARTERO, A., ARMESTO, J., RODRIGUEZ, P.G. and ARIAS, P. (2010). Error analysis of terrestrial laser scanning data by means spherical statistics and 3D graphs. *Sensors*, 10, 10128-10145, DOI: 10-3390/s101110128.
- DAVIE, T. (2002). *Fundamentals of Hydrology*. 1st Edition, Routledge, London and New York.
- DE RUYVER, R. (2004). DEM optimization for hydrological modelling using SRTM for the “Pantanal” region, Brazil. Enschede, Netherlands: International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation.
- DESMET, P.J.J. (1997). Effects of Interpolation Error on the Analysis of DEMs. *Earth Surface Proc. Land.*, 22, 563-580.
- DINGMAN, S.L. (2002). *Physical Hydrology*. 2nd Edition, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- DOWDING, S., KUUSKIVI, T. and LI, X. (2004). Void fills of STRM elevation data - Principles, Processes and Performance. *ASPRS Annual Conference, Kansas City, MI*, September, 12-16.
- EDWARDS, G. and LOWELL, K.E. (1996). Modelling uncertainty in photo interpreted boundaries. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62, 377-391.
- EISENBIES, M.H., AUST, W.M., BURGER, J.A. and ADAMS, M.B. (2007). Forest operations, extreme flooding events, and considerations for hydrologic modelling in the Appalachians – a review. *Forest Ecology and Management*, 242, 77-98.

- ELKHRACHY, I. (2018). Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia. *Ain Shams Engineering Journal*, 9, 1807-1817.
- ERDOGAN, S. (2009). A comparison of interpolation methods for producing Digital Elevation Models at the field scale. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 366-376, DOI: 10.1002/esp.1731.
- ERDOGAN, S. (2010). Modelling the spatial distribution of DEM error with geographically weighted regression: an experimental study. *Computers and Geosciences*, 36, 34-43.
- FABRIS, M. and PESCI, A. (2005). Automated DEM extraction in digital aerial photogrammetry: precisions and validation for mass movement monitoring. *Annals of Geophysics*, 48, 973-988, DOI: <http://dx.doi.org/10.4401/ag-3247>.
- FARR, T.G. and KOBRICK, M. (2000). Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. *T. Am. Geophys. Union*, 81, 583 - 585.
- FARR, T.G., ROSEN, P.A., CARO, E., CRIPPEN, R., DUREN, R., HENSLEY, S., KOBRICK, M., PALLER, M., RODRIGUEZ, E., ROTH, L., SEAL, D., SHAFFER, S., SHIMADA, J., UMLAND, J., WERNER, M., OSKIN, M., BURBANK, D. and ALSDORF, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.* 45, RG2004.
- FERRETTI, A., PRATI, C. and ROCCA, F. (1999). Multibaseline InSAR DEM reconstruction: the wavelet approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37, 705-715.
- FGDC (1999). Federal Geographic Data Committee. Reston, Virginia, United States of America.
- FGDC (2008). Federal Geographic Data Committee. Reston, Virginia, United States of America.
- FISHER, P. (1998). Improved Modelling of Elevation Error With Geostatistics. *GeoInformatica2*, 215-33.
- FLORINSKY, I.V. (1998). Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models, *International Journal of Geographical Information Science*, 12, 47-62.

- FLORINSKY, I.V. and KURYAKOVA, G.A. (2000). Determination of grid size for Digital Terrain Modelling in landscape investigations – exemplified by soil moisture distribution at a micro-scale. *International Journal of Geographical Information Science*, 14, 815-832.
- FLORINSKY, I.V. (2012). *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*. Elsevier/Academic Press, Amsterdam (Holand), 379pp. ISBN: 978-0-12-385036-2.
- FLORINSKY, I.V. (2016). *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology: Second Edition*, Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology: Second Edition.
- FONTE, C.C., MINGHINI, M., ANTONIOU, V., SEE, L., PATRIARCA, J., BROVELLI, M.A. and MILCINSKI, G. (2016). An Automated Methodology for Converting OSM Data into a Land Use/Cover Map. *Proceedings of the 6th International Conference on Cartography & GIS, Albena, Bulgaria*, June 13-17, 2016, Bulgarian Cartographic Association, ISSN 1314-0604, 1, 462-473.
- FREY, H. and PAUL, F. (2012). On the suitability of the SRTM and ASTER GDEM for the compilation of topographic parameters in glacier inventories. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 480-490.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2011.09.020>
- GALLANT, J. and WILSON, J. (2000). *Primary Topographic Attributes*. In: Wilson, J., Gallant, J. (eds.), *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, Chichester, England, 51-85.
- GAO, J. (1997). Resolution and Accuracy of Terrain Representation by Grid DEMs at a Micro-Scale. *International Journal of Geographical Information Science*, 11, 199-212.
- GARBRECHT, J. and MARTZ, L.W. (2000). Digital elevation model issues in water resources modelling. *Hydrologic and Hydraulic Modelling Support with Geographic Information Systems*, 1-28.
- GIL DE LA VEGA, P., ARIZA-LÓPEZ, F.J. and MOZAS-CALVACHE, A.T. (2016). Models for positional accuracy assessment of linear features: 2D and 3D cases, *Survey Review*, 48, 347-360. DOI: 10.1080/00396265.2015.1113027.
- GIRRES, J.F. and TOUYA, G. (2010). Quality assessment of the French OpenStreetMap dataset. *Transactions in GIS*, 14, 435-459.
- GOODCHILD, M.F. and MARK, D.M. (1987). The fractal nature of geographic phenomena. *Annals of Association of American Geographers*, 77, 265-278.

- GOODCHILD, M.F. (2007). Citizens as voluntary sensors: spatial data infrastructure in the world of the web 2.0. *International Journal of Spatial Data Infrastructures Research*, 2, 24-32.
- GOODCHILD, M.F. and LI, L. (2012). Assuring the quality of volunteered geographic information. *Spatial Stat.*, 1, 110-120.
- GONÇALVES, G. and SANTOS, J. (2002). Propagation of DEM uncertainty: An interval arithmetic approach. Departamento de Matemática, Universidade de Coimbra, Portugal, 8pp.
- GONÇALVES, G., JULIEN, P., RIAZANOFF, S. and CERVELLE, B. (2002). Preserving cartographic quality in DTM interpolation from contours lines. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56, 210-220.
- GONG, J., LI, Z., ZHU, Q., SUI, H. and ZHOU, Y. (2000). Effects of various factors on the accuracy of DEMs: an extensive experimental investigation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, 1113-1117.
- GOOVAERTS, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, 228, 113-129.
- GROHMAN, G., KROENUNG, G. and STREBECK, J. (2006). Filling SRTM voids: the delta surface fill method. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72, 213-216.
- GROHMAN, C.H. (2015). Effects of spatial resolution on slope and aspect derivation for regional-scale analysis. *Computers and Geosciences*, 77, 111-117.
- HAGE, M.E., SIMONETTO, E., FAOUR, G. and POLIDORI, L. (2010). *Impact of DEM Reconstruction Parameters on Topographic Indices*. In: Paparoditis, N., Pierrot-Deseilligny, M., Mallet C., Tournaire O. (Eds.), *IAPRS*, 38, Part 3B – Saint Mandé, France.
- HAKLAY, M. (2008) How good is OpenStreetMap information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets for London and the rest of England. Under review in *Environment and Planning B: Planning and Design*.
- HAKLAY, M. and WEBER, P. (2008). OpenStreetMap: user-generated street maps. *Pervasive Computing IEEE*, 7, 12-18.

- HAKLAY, M. (2010). How good is the Volunteered Geographic Information? A Comparative Study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37, 682-703.
- HAKLAY, M. (2013). *Citizen science and volunteered geographic information: Overview and typology of participation*. In: D Sui, S. Elwood, and M. Goodchild, eds. *Crowdsourcing Geographic Knowledge*. Springer Netherlands, 105-122.
- HAKLAY, M., ANTONIOU, V., BASIOUKA, S., SODEN, R. and MOONEY, P. (2014). *Crowdsourced Geographic Information Use in Government*; Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR). World Bank: London, UK, 76pp.
- HANCOCK, G.R. and EVANS, K.G. (2006). Channel head location and characteristics using digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 809-824.
- HANSSSEN, R.F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- HE, C., SHI, C., YANG, C. and AGOSTI, B.P. (2001). A windows-based GIS-AGNPS interface. *Journal of the American Water Resources Association*, 37, 395-406.
- HEYWOOD, I., CORNELIUS, S. and CARVER, S. (2006). *An Introduction to Geographic Information System*. 3rd Edition, Pearson Education Limited, Edinburgh Gate Harlow Essex CM20 2JE England, 77-91.
- HIRT, C. (2018). Artefact elevation in Global Digital Elevation Models (DEMs): The maximum slope approach and its application for complete screening of the SRTM v4.1 and MERIT DEMs. *Remote Sensing Environment*, 207, 27-41, DOI.org/10.1016/j.rse.2017.12.037.
- HOHLE, J. (2009). Updating the Danish Digital Elevation Model by means of photogrammetric methods. Technical Report Series of the Survey and Cadastre-Denmark, No. 3, ISBN 87-92107, 25-7. http://www.kms.dk/NR/rdonlyres/1C10C559-6CC9-4520-85C5-DE8659CB38A9/0/kmsrep_3.pdf (25.102009)
- HOLMES, K.W., CHADWICK, O.A. and KYRIAKIDIS, P.C. (2000). Error in a USGS 30-meter digital elevation model and its impact on terrain modelling. *Journal of Hydrology*, 233, 154-173.
- HORN, B.K.P. (1981). Hill shading and the reflectance Map. *Proceedings of IEEE*, 69(1), 14-47.

- HU, Y. (2003). *Automated Extraction of Digital Terrain Models, Roads and Buildings Using Airborne LIDAR Data*. (PhD Thesis), Department of Geomatics Engineering, the University of Calgary, Alberta, Canada, 206pp.
- HU, F., GAO, X.M., LI, G.Y. and LI, M. (2016). DEM extraction from WorldView-3 stereo-images and accuracy evaluation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41-B, *XXIII ISPRS Congress*, 12-19 July, Prague, Czech Republic.
- HUNTER, G.J. and GOODCHILD, M.F. (1997). Modelling The Uncertainty of Slope and Aspect Estimates Derived from Spatial Databases. *Geographical Analysis*, 29, 35-49.
- HUTCHINSON, M.F. (1989). A new method for gridding elevation and streamline data with automatic removal of pits. *Journal of Hydrology*, 106, 211-232.
- HUTCHINSON, M.F. (1998). Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines: I Two dimensional smoothing of data with short range correlation. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis* 2, 139–151.
- HUTCHINSON, M.F., XU, T. and STEIN, J.A. (2011). Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure. In: *Geomorphometry 2011 Conference*, edited by T. Hengel, I.S. Evans, J.P. Wilson and M. Gould, Redlands, CA, USA, 19-22.
- ISIDORO, J.M.G.P., RODRIGUES, J.I.J., MARTINS, J.M.R. and de LIMA, J.L.M.P. (2010). Evolution of urbanization in a small urban basin: DTM construction for hydrologic computation. *Proceedings of the workshop held at Goslar-Hahnenklee*, Germany, 30, IAHS Publ. 336, 2010, 109-114.
- INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION (2013). *ISO19157: 2013 Geographic information - Data quality*. Geneva, Italy.
- JACOBSEN, K. (2003). DEM Generation from Satellite Data. European Association of Remote Sensing Laboratories Ghent, Belgium, 273-276.
- JACOBSEN, K. and PASSINI, R. (2010). Analysis of ASTER GDEM elevation models. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: 2010 - Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I*, ISPRS Convergence in Geomatics – Shaping Canada’s Competitive Landscape, Canada, 38, Nr. Part 1.
- JANSSEN, K. (2011). Spatial data contributed by citizens: legal challenges. *INSPIRE Conference*, Leuven, Belgium.

- JENSON, S.K. and DOMINGUE, J.O. (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographical Information Systems Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 5, 1593-1600.
- JENSON, S.K. (1991). Applications of hydrologic information automatically extracted from Digital Elevation Models. *Hydrological Processes*, 5, 31-44.
<https://DOI.org/10.1002/hyp3360050104>
- JOHN, P.W. and JOHN, C.G. (2000). *Terrain Analysis: Principles and Applications*. New York, John Wiley and Sons.
- JOHNSON, C.E., MÉNDEZ, J.J.R. and LAWRENCE, G.B. (2000). Forest soil Chemistry and terrain attributes in a catskills watershed. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 1808-1814.
- JOHNSTON, K., VER-HOEF, J.M., KRIVORUCHKO, K. and LUCAS, N. (2001). *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. ESRI, Redlands, USA, 300pp.
- JONES, J.B. and MULHOLLAND, P.J. (2000). *Streams and ground waters*. San Diego, United States of America, CA: Academic Press.
- JOOS, G. (2006). Data Quality Standards. Shaping the Change. *XXIII FIG Congress*, October. Munich (Germany), 8-13.
- KANG, J.M., YOON, H.C. and PARK, J.K. (2008). Evaluation of Possibility of Ortho Imagery Production Using SPOT 5 Single Image. *XXIst ISPRS Congress Technical Commission IV*, 37 Part B4, Beijing, China, 1279-1282.
- KENNIE, T.J.M. and PETRIE, G. (1990). *Introduction to Terrain Modelling – Application Fields and Terminology*. In: *Terrain Modelling in Surveying and Civil Engineering*, Edited by Petrie and T.J.M., Kennie, Whittles Publishing, Lincoln, United Kingdom, 13pp.
- KINZLE, S. (2004). The effect of resolution on first order second order and compound terrain derivatives. *Transactions in GIS*, 8, 83-111.
- KRAUS, K., (2007). *Photogrammetry - Geometry from Images and Laser Scans* - 2nd edition. Walter de Gruyter, Berlin.
- KRONENFELD, B.J. (2011). Beyond the epsilon band: polygonal modelling of gradation/uncertainty in area-class maps. *International Journal of Geographical Information Science*, 25, 1749-1771.

- KUHN, W. (2007). *Volunteered Geographic Information and GIScience*. NCGIA UC Santa Barbara, USA, 13-14.
- KYRIAKIDIS, P.C., SHORTRIDGE, A.M. and GOODCHILD, M.F. (1999). Geostatistics for Conflation and Accuracy Assessment of Digital Elevation Models. *International Journal of Geographical Information Science*, 13, 677-707.
- LACROIX, M.P., MARTZ, L.W., KITE, G.W. and GARBRECHT, J. (2002). Using Digital Terrain Analysis Modelling Techniques for the Parameterization of a Hydrologic Model. *Environmental Modelling Software*, 17, 127-136.
- LEUNG, Y. and YAN, J. (1998). A locational error model for spatial features. *International Journal of Geographical Information Science*, 12, 607-620.
- LI, Z. and ZHU, Q. (2000). *Digital Elevation Models*. Wuhan Science and Technology University of Surveying and Mapping Press, Wuhan, China.
- LI, Z., ZHOU, Q. and GOLD, C. (2005). *Digital Terrain Modelling: Principles and Methodology*. CRC Press.
- LI, J. and HEAP, A.D. (2008). *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*. Geoscience Australia, Canberra, Australia.
- LI, J. and HEAP, A.D. (2014). Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling Software*, 53, 173-189.
- LI, Z., ZHU, Q. and GOLD, C. (2010). *Digital Terrain Modelling: Principles and Methodology*. New York, CRC press.
- LI, J. and WONG, D.W.S. (2010). Effects of DEM sources on hydrologic applications. *Computers Environment and Urban Systems*, 34, 251-261.
- LIDBERG, W., NILSSON, M., LUNDMARK, T. and AGREN, A.M. (2017). Evaluating pre-processing methods of Digital Elevation Models for hydrological modelling. *Hydrological Processes*, 1-9. <https://doi.org/10.1002/hyp.11385>
- Liu, X. (2008). Airborne LIDAR for DEM Generation: Some Critical Issues. *Progress in Physical Geography*, 3, 31-49.
- LIU, X., ZHANG, Z., PETERSON, J. and CHANDRA, S. (2007). The Effect of LIDAR data density on DEM accuracy. *Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM07)*, Christchurch, New Zealand.
- LONGLEY, P., GOODCHILD, M., MAGUIRE, D. and RHIND, D. (2011). *Geographic Information Systems and Science*. John Wiley and Sons, Ltd.

- LOYD, C.D. (2005). Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great of Britain. *Journal of Hydrology* 308 (1–4), 128-150, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.10.026.
- LOYD, C. and ATKINSON. P. (2006). Deriving ground surface digital elevation models from LIDAR data with geostatistics. *International Journal of Geographical Information Science*, 20, 535-563.
- LUEDELING, E., SIEBERT, S. and BUERKERT, A. (2007). Filling the voids in the SRTM elevation model – a TIN delta surface approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 62, 283-294.
- LUSCOMBE, D.J., ANDERSON, K., GATIS, N., WETHERELT, A., GRAND-CLEMENT, E. and Brazier, R.E. (2015). What does airborne LiDAR really measure in upland ecosystems? *Ecohydrology*, 8, 584-594.
- LYNCH, S. (2002). Digital Elevation Models and Spatial Resolution. *South African Journal of Science*, 98, 219-22.
- MAIDMENT, D.R. (1999). Watershed and stream network delineation using Digital Elevation Models. Environmental Systems Research Institute. Available online at: <http://campus.esri.com/courses/hydrology/watshdhy>.
- MAIRE, C., DATCU, M. and AUDENINO, P. (2003). SAR DEM filtering by mean of Bayesian and multi-scale non-stationary methods. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGRSS)*, 6, 3916-3918.
- MANFREDA, S., McCABE, M.F., MILLER, P.E., LUCAS, R., PAJUELO MADRIGAL, V., MALLINIS, G., BEN DOR, E., HELMAN, D., ESTES, L., CIRAOLLO, G., MULLEROVÁ, J., TAURO, F., de LIMA, M.I., de LIMA, J.L.M.P., MALTESE, A., FRANCES, F., CAYLOR, K., KOHV, M., PERKS, M., RUIZ-PÉREZ, G., SU, Z., VICO, G. and TOTH, B. (2018). On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring Remote Sensing, 10, 641. <https://DOI.org/10.3390/rs10040641>
- MARK, D.M. (1975). Computer Analysis of Topography: a Comparison of Terrain Storage Methods. *Geografiska Annaler*, 57A, 179-188.
- MARK, D.M. (1984). Mathematical, algorithmic and data structure issues: Automated detection of drainage networks from Digital Elevation Models. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 21, 168-178.

- MARTZ, L.W. and GARBRECHT, J. (1998). The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models. *Hydrological Processes*, 12, 843-855.
- MAUNE, D.F. (2001). *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual*. The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Bethesda, Maryland.
- MAUNE, D.F. (2007). *Digital Elevation Model technologies and applications: the DEM user's manual*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Bethesda, Maryland.
- MAURICE, M.J., KOEVA, M.N., GERKE, M., NEX, F. and GEVAERT, C. (2015). A photogrammetric approach for map updating using UAV in Rwanda. *In Proceedings of the GeoTechRwanda*, Kigali, Rwanda, 18-20 November.
- MCKENZIE, N.J. and RYAN, P.J. (1999). Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*, 89, 67-94.
- MENDES, A. (2010). The contribution of the Digital Elevation Models and Geographic Information Systems in a watershed hydrologic research. *Applied Geomatics*. 2, 33-42.
- MILIAREISIS, G.C. and PARASCHOU, C.V.E. (2005). Vertical accuracy of the SRTM DTED level 1 of Crete. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 7, 49-59.
URL:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243405000024>
- MITASOVA, H. and MITÁS, L. (1993). Interpolation by regularized spline with tension: I. Theory and implementation, 25, 641-655.
- MONTEIRO, E.S.V. FONTE, C.C. and de LIMA, J.L.M.P. (2015). Assessing positional accuracy of drainage networks extracted from ASTER, SRTM and OpenStreetMap. *In Proceedings of the AGILE*, Lisbon, Portugal, 5pp.
- MONTEIRO, E.S.V., FONTE, C.C. and de LIMA, J.L.M.P. (2018a). Improving the positional accuracy of drainage networks extracted from Global Digital Elevation Models using OpenStreetMap data. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66, 285-294, DOI:10.1515/john-2017-0057.
- MONTEIRO, E.S.V., FONTE, C.C. and de LIMA, J.L.M.P. (2018b). Analysing the potential of OpenStreetMap data to improve the accuracy of SRTM 30 DEM on derived basin delineation, slope and drainage network. *Hydrology*, 5, 1-27.

- MOREIRA, I.A. (2005). *Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de Radar e pluviômetros*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais, Sector de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Brasil.
- MOONEY P. (2015). *An Outlook for OpenStreetMap*. In: Jokar Arsanjani J., Zipf A., Mooney P., Helbich M. (eds) *OpenStreetMap in GIScience. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Springer, Cham, Heidelberg New York Dordrecht London.
- MOONEY, P. and MINGHINI, M. (2017). *A Review of OpenStreetMap Data*. In: Foody, G., See, L., Fritz, S., Mooney, P., Olteanu-Raimond, A-M, Fonte, C.C. and Antoniou, V. (Eds.) *Mapping and the Citizen Sensor*, 37-59. London: Ubiquity Press.
- MOORE, I.D., GRAYSON, R.B. and LADSON, A.R. (1991). Digital Terrain modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications. *Hydrological Processes*, 5, 3-30.
- MOZAS-CALVACHE, W.F. and ARIZA-LÓPEZ, F. J. (2015). Adapting 2D positional control methodologies based on linear elements to 3D. *Survey Review*, 47, 195-201.
- MULLEN, W.F., JACKSON, S.P., CROITORU, A., CROOKS, A., STEFANIDIS, A. and AGOURIS, P. (2014). Assessing the impact of demographic characteristics on spatial error in Volunteered Geographic Information Features. *GeoJournal*.
<http://link.springer.com/article/10.1007/s10708-014-9564-8>.
- MUKUL, M., SRIVASTAVA, V. and MUKUL, M. (2015). Analysis of the accuracy of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) height models using International Global Navigation Satellite System Service (IGS) Network. *Journal of Earth System Science*, 124, 1343-1357.
- MUMBONE, M., BENNETT, R., GERKE, M. and VOLKMANN, W. (2015). Innovations in boundary mapping: Namibia, customary lands and UAVs. In *Proceedings of the World Bank Conference on Land and Poverty*, Washington, DC, USA, 23–27 March.
- MURPHY, P.N.C., OGILVIE, J., MENG, F. and ARP, P.A. (2008). Stream network modelling using LiDAR and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification. *Hydrological Processes*, 22, 1747-1754.
- NARENDER, B. and RAO, B.S. (2006). Validation of C-Band SRTM Demand its Application for Orthorectification. *Symposium of ISPRS Commission IV*, 36 Part 4.

- NASA JPL (2011). ASTER Global Digital Elevation Map Announcement. NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> (2015 December 28).
- NEIS, P. and ZIPF, A. (2012). Analysing the Contributor Activity of a Volunteered Geographic Information Project-The Case of OpenStreetMap. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 1, 146-165.
- NEIS, P., ZIELSTRA, D. and ZIP, A. (2013). Comparison of volunteered geographic information data contributions and community development for selected world regions. *Future Internet*, 5, 282-300.
- NETELER, M. and MITASOVA, H. (2002). *Open source GIS: A GRASS GIS approach*. Kluwer Academic Publishing, Boston, USA.
- NIEVINSKY, F.G. (2004). *Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR)*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Departamento de Geodésia, Brasil.
- O'CALLAGHAN, J.F. and MARK, D.M. (1984). The extraction of drainage networks from Digital Elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28, 323-344.
- OLIVER, M.A. (1990). Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems. *International Journal of Geographic Information Systems*, 4, 313-332.
- O'LOUGHLIN, F.E., PAIVA, R.C.D., DURAND, M., ALSDORF, D.E. and Bates, P.D. (2016). A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. *Remote Sens. Environ.* 182, 49-59.
- OLTEANU-RAIMOND, A.M., HART, G., FOODY, G., TOUYA, G., KELLENBERGER, T. and DEMETRIOU, D. (2017). The scale of VGI in map production: A perspective of European National Mapping Agencies. *Transactions in GIS*, 21, 74-90.
DOI: <https://doi.org/10.1111/tgis.12189>
- OKSANEN, J. and SARJAKOSKI, T. (2005). Error propagation analysis of DEM-based drainage basin delineation. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 3085-3102.
- PANUSKA, J.C., MOORE, I.D. and KRAMMER, L.A. (1991). Terrain Analysis: Integration into the Agricultural Nonpoint Source (AGNPS) Pollution Model. *J. Soil Water Conservation*, 46, 59-63.

- PAVLOVA, A.I. (2017). Analysis of elevation interpolation methods for creating Digital Elevation Models. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 53, 171-177.
- PELLETIER, J.D. (2013). A robust two-parameter method for the extraction of drainage networks from high-resolution digital elevation models (DEMs): Evaluation using synthetic and real world DEMs. *Water Res.*, 49, 75-89.
- PINEL, S., BONNET, M. P., SANTOS DA SILVA, J., MOREIRA D., CALMANT, S., SATGÉ, F. and SEYLER, F. (2015). Correction of interferometric and vegetation biases in the SRTM GLspaceborne DEM with hydrological conditioning towards improved hydrodynamics modelling in the Amazon Basin. *Remote Sensing*, 7, 16108-16130.
- POLO, M.E. and FELICÍSIMO, A.M. (2010). Full positional accuracy analysis of spatial data by means of circular statistics. *Transactions in GIS*, 14, 421-434.
- POURABDOLLAH, A., MORLEY, J., FELDMAN, S. and JACKSON, M. (2013). Towards an Authoritative OpenStreetMap: Conflating OSM and OpenData National Maps' Road Network. *ISPRS International Journal of Geographic Information*, 2, 704-728.
DOI: 10.3390/ijgi2030704
- PUECKER, T.K., FOWLER, R.J., LITTLE, J.J. and MARK, D.M. (1978). The Triangulated Irregular Network. *ASP Proceedings of Digital Terrain Models (DTM) Symposium*, St. Louis, Missouri, USA, 516-540.
- QUINN, P., BEVEN, K., CHEVALLIER, P. and PLANCHON, O. (1991). The Prediction of hill slope flow paths for distributed hydrological modelling using Digital Terrain Models. *Journal of Hydrological Processes*, 5, 59-79.
- QUINTELA, A.C. and PORTELA, M.M. (2002). A modelação hidrológica em Portugal nos últimos 25 Anos do século XX, nas perspetivas determinística, probabilística e estocástica. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 7, 51-64.
- RABUS, B., EINEDER, M., ROTH, A. and BAMLER, R. (2003). The Shuttle Radar Topography Mission – A New Case of Digital Elevation Models acquired by Spaceborn Radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, 241-262.
- REBELO, C.R. (2007). *Aplicação do InSAR na geração de Modelos Digitais do Terreno*. Tese de Mestrado em Engenharia Geográfica e Geoinformática. Departamento de Matemática, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 146pp.

- REINOSO, J.F. (2011). An algorithm for automatically computing the horizontal shift between homologous contours from DTMs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66, 271-286.
- RIBEIRO, A. and FONTE, C.C. (2015). A methodology for assessing OpenStreetMap degree of coverage for purposes of land cover mapping. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3/W5. DOI: 10.5194/isprsannals-II-3-W5-297-2015, 297-303.
- RODHE, A. and SEIBERT, J. (1999). Wetland occurrence in relation to topography: a test of topographic indices as moisture indicators. *Agriculture and Forest Meteorology*, 98, 325-340.
- ROYLE, A.G., CLAUSEN, F.L. and FREDERIKSEN, P. (1981). Practical Universal Kriging and Automatic Contouring. *Geoprocessing*, 1, 377-394.
- RUICHAO, Z., HAIJIAN, Y. and YAN, W. (2010). An algorithm for drainage network extraction from Digital Elevation Model. *World Automation Congress (WAC)*, Kobe, Japan, ISBN: 978-1-889335-42-1.
- SAN, B.T. and SUZEN, M.L. (2005). Digital Elevation Model (DEM) generation and accuracy assessment from ASTER stereo data. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 513-5027.
- SANTILLAN, J.R. and MAKINANO-SANTILLAN, M. (2016). Vertical accuracy assessment of 30-m resolution ALOS, ASTER and SRTM global DEMs over North-eastern Mindanao, Philippines. In *Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXIII ISPRS Congress*, Prague, Czech Republic, Vol. XL1-B4.
- SCHUMANN, G.J., BATES, P.D., NEAL, J. C. and ANDREADIS, K.M. (2014). Technology: fight floods on a global scale. *Nature*, 507 (7491), 169. <http://dx.doi.org/10.1038/507169e>.
- SEHRA, S.S., SINGH, J. and RAI, H.S. (2016). *Analysing OpenStreetMap data for topological errors*. Copyright © 2016 Inderscience Enterprises Ltd., 1, 87-101.
- SEO, S. and O'HARA, C.G. (2009). Quality assessment of linear data. *International Journal of Geographical Information Science*, 23, 1503-1525.

- SHARMA, K.D., SOROOSHIAN, S. and WHEATER, H. (2008). *Hydrological modelling in arid and semi-arid areas*. New York: Cambridge University Press. ISBN-13 -5. 978-0-511-37710.
- SHARMA, A. and GUPTA, D. (2014). Derivation of Topographic Map from Elevation Data Available in Google Earth. *Civil Engineering and Urban Planning: An International Journal (CiVEJ)*, 1, 1-8.
- SHARMA, A. and TIWARI, K.N. (2014). A comparative appraisal of hydrological behaviour of SRTM DEM at catchment level. *Journal of Hydrology*, 519, 1394-1404.
- SHI, W. and LIU, W. (2000). A stochastic process-based model for the positional error of line segments in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14, 51–66.
- SHREVE, R. (1967). Infinite topologically random channel networks. *Journal of Geology*, 75, 178-186.
- SHRIVASTAVA, L., NAG, S. and RANI, R. (2017). GIS-Based Morphometric Analysis of Pench River Basin. *International Journal of Recent Scientific Research*, 8, 16953-16959.
DOI: 10.24327/IJRSR
- SIBSON, R. (1981). *A brief description of natural neighbour interpolation, Interpolating Multivariate Data*. New York, John Wiley and Sons, 21-36.
- SINGH, R., SUBRAMANIAN, K., REFSGAARD, J., SINGH, V.P. and FREVERT, D.K. (2006). *Watershed models*. Taylor and Francis Group, USA, ISBN: 9780849336096.
- SMITH, B. and SANDWELL, D. (2003). Accuracy and resolution of Shuttle Radar Topography Mission data. *Geophysical Research Letters*, 30(9), 1467.
- SMITH, M.P., ZHU, A., BURT, J.E. and STILES, C. (2006). The effects of DEM resolution and neighbourhood size on digital soil survey. *Geoderma*, 137, 58-69.
- SONG, X.M., LIU, H.B., WU, W. and JIANG, T.M. (2010). Scale Effects of Digital Elevation Model on Topographic Indices. 978-1-4244-5265-1/10, IEEE.
- SORENSEN, R. and SEIBERT, J. (2007). Effects of DEM Resolution on the Calculation of Topographic Indices: TWI and its Components. *Journal of Hydrology*, 347, 79-89.
- SREEDEVI, P.D., SREEKANTH, P.D., KHAN, H.H. and AHMED, S. (2013). Drainage morphometry and its influence on Hydrology in a semi-arid region: using SRTM data and GIS. *Environ. Earth Sci.*, 70, 839-848.

- STEVENSON, J.A., SUN, X. and MITCHELL, N.C. (2010). Despeckling SRTM and other topographic data with a denoising algorithm. *Geomorphology*, 114, 238-252.
- STRAHLER, A. (1952). *Dynamic Basis of Geomorphology*. Geological Society of America Bulletin, 63, 923-938. <http://dx.DOI.org/10.1130/0016-7606>.
- SUJATHA, E.R., SELVAKUMAR, R., RAJASIMMAN, U.A.B. and RAJAMANICKAM, G.V. (2015). Morphometric Analysis of sub-watersheds in parts of Western Ghats, South India using ASTER DEM. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6, 326-341.
(<http://dx.DOI.org/10.108019475705.2013.845114>).
- SUKUMAR, N., MORAN, B. and SEMENOV, Y. (2001). Natural neighbour Galerkin method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 50, 1-27.
- SUN, X., ROSIN, P.L., MARTIN, R.R. and LANGBEIN, F.C. (2007). Fast and effective feature preserving mesh denoising. *IEEE Transactions on Visualisation and Computer Graphics* 13, 925-938.
- SUN, Y., XU, H., WU, J. and ZHENG, J. (2018). 3-D Data processing to extract vehicle trajectories from roadside LiDAR data. *Transportation Research Record*, 2672, 14-22.
- SZYPULA, B. (2016). Geomorphometric comparison of DEMs built by different interpolation methods. *Landform Analysis*, 32, 45-58.
- TACHIKAWA, T., KAKU, M., IWASAKI, A., GESCH, D., OIMOEN, M., ZHANG, Z., DANIELSON, J., KRIEGER, T., CURTIS, B. and HAASE, J. (2011). ASTER Global Digital Elevation Model, Version 2, summary of validation results.
https://lpdaacaster.cr.usgs.gov/GDEM/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf.
- TAPAS, R.M., KERLE, N., VAN WESTERN, C.J., JETTEN, V. and KUMAR, K.V. (2010). Effect of sun elevation angle on DSMs derived from Cartosat-1 data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76, 429-438.
- TARBOTON, D.G. (1997). A New Method for the Determination of Flow Directions and Upslope Areas in Grid Digital Elevations Models. *Water Resources Research*, 33, 309-319.
- TAROLLI, P. (2014). High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. *Geomorphology*, 216, 295-312.

- TILY, R. and BRACE, C.J. (2006). A Study of Natural Neighbour Interpolation and its Application to Automotive Engine Test Data. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D. Journal of Automobile Engineering*, 220, 1003-1017.
- TOKAR, A.S. and JOHNSON, P.A. (1999). Rainfall-runoff modelling using artificial neural networks. *Journal of Hydrol. Eng.*, 4, 232-239.
- TORLEGARD, K., OSTMAN, A. and LINDGREN, R. (1986). A comparative test photogrammetrically exemplified Digital Elevation Models. *Photography*, 41, 1-16.
- TOUTIN, T. (2002). Impact of Terrain Slope and Aspect on Radargrammetric DEM Accuracy. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, 228-240.
- TRUONG, Q.T., TOUYA, G. and RUNZ, C. (2018). *10th International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2018). Leibniz International Proceedings in Informatics, Germany.*
- TUCCI, C.E.M. (1987). Modelos determinísticos. In: *Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Modelos para gerenciamento de recursos hídricos*, Nobel/ABRH, 211-324.
- TUCCI, C.E.M. (1998). *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre, Brasil: Editora Universitária UFRGS.
- VARGA, M. and BASIC, T. (2015). Accuracy validation and comparison of Global Digital Elevation Models over Croatia. *International Journal of Remote Sensing*, 36, 170-189.
- VAZE, J., TENG, J. and GEORGINA, S. (2010). Impact of DEM Accuracy and Resolution on Topographic Indices. *Environmental Modelling and Software*, 25, 1086-1098.
- VISSMAN, W. and LEWIS, G.L. (2003). *Introduction to Hydrology*. 5th Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- VIEUX, B.E. and NEEDHAM, S. (1993). Nonpoint-pollution model sensitivity to grid cell-size. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119, 141-157.
- VOLKMANN, W. and BARNES, G. (2014). Virtual surveying: Mapping and modelling cadastral boundaries using Unmanned Aerial Systems (UAS). In *Proceedings of the FIG Congress: Engaging the Challenges—Enhancing the Relevance, Kuala Lumpur, Malaysia*, 16-21 June, pp. 1-13.
- WANG, Y. and TIAN, Q. (2018). Application of InSAR technology in geographical situation monitoring. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote*

- Sensing and Spatial Information Sciences. *ISPRS TC III Mid-Term Symposium "Developments, Technologies and Applications in Remote Sensing, 7-10 May, Beijing, China.*
- WECHSLER, S.P. and KROLL, C.N. (2006). Quantifying DEM uncertainty and its effect on topographic parameters. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72, 1081–1090.
- WECHSLER, S.P. (2007). Uncertainties with Digital Elevation Models for hydrologic applications: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1481-1500.
- WELSCH, D.L., KROLL, C.N., McDONNELL, J.J. and BURNS, D.A. (2001). Topographic controls on the chemistry of subsurface stormflow. *Hydrological Processes*, 15, 1925-1938.
- WILSON, J.P. and GALLANT, J.C. (2000a). *Digital Terrain Analysis*. In J. P. Wilson, and J. C. Gallant (Eds.), *Terrain Analysis*. New York, USA, 1-27.
- WILSON, J.P. and GALLANT, J.C. (2000b). *Secondary topographic attributes*. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John Wiley and Sons, New York, USA, 87-131.
- WILSON, J.P. (2012). Digital terrain modelling. *Geomorphology*, 137, 107-121.
- WENDI, D., LIONG, S.Y., SUN, Y. and DOAN, C.D. (2016). An innovative approach to improve SRTM DEM using multispectral imagery and artificial neural network. *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*, 8, 691-702.
- WU, S., LI, J. and HUANG, G.H. (2008). A Study on DEM-Derived Primary Topographic Attributes for Hydrologic Applications: Sensitivity to Elevation Data Resolution. *Applied Geography*, 28, 210-223.
- XU, C. (2002). *Textbook of hydrologic models*. Uppsala University Department of Earth Sciences Hydrology, 2nd edition, Sweden.
- ZANDBERGEN, P. (2008). Applications of Shuttle Radar Topography Mission Elevation Data. *Geography Compass*, 1404-1431.
- ZEBKER, H.A. and VILLASENOR, J. (1992). Decorrelation in interferometric Radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 950-959.
- ZEBKER, H.A, ROSEN, P.A, GOLDSTEIN, R.M., GABRIEL, A. and WERNER, C.L. (1994). On the derivation of coseismic displacement fields using differential Radar

interferometry: the Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research* 99, 19617-19634.

ZIELSTRA, D. and ZIPF, A. (2010). A comparative study of proprietary geodata and volunteered Geographic Information for Germany. *The 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, Guimarães, Portugal.

ZHOU, Q. and LIU, X. (2002). Error Assessment of Grid-Based Flow Routing Algorithms Used in Hydrological Models. *International Journal of Geographical Information Science*, 16, 819-842.

ZHOU, H., ZHANG, J., GONG, L. and SHANG, X. (2012). Comparison and validation of different DEM data derived from InSAR. *Procedia Environmental Sciences*, 12, 590-597.

ANEXO PUBLICAÇÕES

A1

ARTIGO EM REVISTA CIENTÍFICA INTERNACIONAL

Improving the Positional Accuracy of Drainage Networks Extracted from Global Digital Elevation

A2

ARTIGO EM REVISTA CIENTÍFICA INTERNACIONAL

Analysing the potential of OpenStreetMap data to improve the accuracy of SRTM 30 DEM on derived basin delineation, slope and drainage network

A3

ARTIGO EM CONFERÊNCIA INTERNACIONAL

Assessing positional accuracy of drainage networks extracted from ASTER, SRTM and OpenStreetMap

A4

ARTIGO EM CONGRESSO IBÉRICO

Parâmetros topográficos derivados do relevo e utilizados na caracterização de bacias hidrográficas

A5

ARTIGO EM CONFERÊNCIA NACIONAL

Exatidão posicional de redes hidrográficas extraídas de MDEs gerados a partir de MDEs globais e de dados extraídos do OpenStreetMap

A6

POSTER EM CONGRESSO NACIONAL

Utilização de Informação Geográfica Voluntária para aumentar a exatidão de redes hidrográficas extraídas de Modelos Globais de Elevação

Integração de Informação Geográfica Voluntária em Modelos Digitais de Elevação Globais na representação de linhas de água

A7

POSTER EM CONGRESSO NACIONAL

Influência da geomorfologia no transporte e deposição de materiais litíferos em bacias hidrográficas – Estudo de caso de uma Mina localizada na região da Guarda

A8

RESUMO PUBLICADO EM CONFERÊNCIA INTERNACIONAL

Variability of topographic parameters obtained from the ASTER and SRTM Digital Elevation Models

Integração de Informação Geográfica Voluntária em Modelos Digitais de Elevação Globais na representação de linhas de água

Article

Analysing the Potential of OpenStreetMap Data to Improve the Accuracy of SRTM 30 DEM on Derived Basin Delineation, Slope, and Drainage Networks

Elisabete S.V. Monteiro ¹ , Cidália C. Fonte ²  and João L.M.P. de Lima ^{3,*} 

¹ UDI—Research Unit for Inland Development—Polytechnic Institute of Guarda/Institute for Systems Engineering and Computers at Coimbra, 3030-290 Coimbra, Portugal; emonteiro@ipg.pt

² Department of Mathematics, University of Coimbra/Institute for Systems Engineering and Computers at Coimbra, 3030-290 Coimbra, Portugal; cfonte@mat.uc.pt

³ Department of Civil Engineering, Faculty of Science and Technology of the University of Coimbra/MARE—Marine and Environmental Sciences Centre at Coimbra, 3004-517 Coimbra, Portugal

* Correspondence: plima@dec.uc.pt; Tel: +351-239797100

Received: 1 June 2018; Accepted: 17 July 2018; Published: 18 July 2018



Abstract: Terrain slope and drainage networks are useful components to the basins morphometric characterization as well as to hydrologic modelling. One way to obtain the slope, drainage networks, and basins delineation is by their extraction from Digital Elevation Models (DEMs) and, therefore, their accuracy depends on the accuracy of the used DEM. Regional DEMs with high detail and accuracy are produced in many countries by National Mapping Agencies (NMA). However, the use of these products usually has associated costs. An alternative to those DEMs are the Global Digital Elevation Models (GDEMs) that can be accessed freely and cover almost the entire surface of the world. However, they are not as accurate as the regional DEMs obtained with other techniques. This study intends to assess if generating new, modified DEMs using altimetric data from the original GDEMs and the watercourses available for download in the collaborative project OpenStreetMap (OSM) improves the accuracy of the rebuilt DEMs, the slope derived from them, as well as the delineation of basins and the horizontal and vertical accuracy of the extracted drainage networks. The methodology is presented and applied to a study area located in the United Kingdom. The GDEMs used are of 30 m spatial resolution from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM 30). The accuracy of the original data and the data obtained with the proposed methodology is compared with a reference DEM, with a spatial resolution of 50 m, and the rivers network available at the Ordnance Survey website. The results mainly show an improvement of the horizontal accuracy of the drainage networks, but also a decrease of the systematic errors of the new DEMs, the derived slope, and the vertical position of the drainage networks, as well as the basin's identification for a set of pour points.

Keywords: global digital elevation models; OpenStreetMap; accuracy; drainage networks; slope; basin

1. Introduction

The use of Digital Elevation Models (DEMs) in hydrological analysis is standard procedure nowadays [1]. From DEMs topographic parameters may be extracted, namely drainage networks, slopes, and basins, which are necessary for basin characterization and for hydrologic studies and are normally used for distributed hydrological simulation [2–4]. The hydraulic and hydrological models are strongly dependent of the accuracy of elevation data [5] because the behaviour of the water along the physical space is controlled by relief [1,6]. It should be noted that the techniques of data acquisition suffered a rapid evolution in the last decades, which enabled the increase in the

accuracy of the DEMs. For example, the satellite sensors in the visible, infrared and microwave ranges can be used to monitor rivers and to delineate flood zones [7]. These methods are generally used only over large rivers or areas of inundation in order to detect changes at the pixel level. Unmanned Aerial Systems (UAS) can describe river dynamics, but with a level of detail that is several orders of magnitude greater and can enable distributed flow measurements over any river system and in difficult-to-access environments [8].

Nevertheless, like all datasets, the DEMs have errors, which propagate to the topographic parameters extracted from them, and in particular to the drainage networks [9]. Therefore, it is relevant to improve the accuracy of the available DEMs, as well as the accuracy of the drainage networks and other topographic parameters extracted from them.

Two Global Digital Elevation Models (GDEMs), covering almost the entire world, are available and can be downloaded with no costs from the Jet Propulsion Laboratory of National Aeronautics and Space Administration (NASA) webpage. These are the Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) [10], with a 30 m spatial resolution, and the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [11] DEM, with available spatial resolutions of 30 and 90 m [12]. These datasets are in grid format, where the attribute of each cell/pixel is elevation. ASTER is acquired by photogrammetric methods [13] and SRTM is generated using interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology [14]. In previous studies it was shown that the drainage networks extracted from the 90 m resolution SRTM had better positional accuracy than the ones extracted from ASTER, e.g., [15] or [16]. Therefore, as SRTM altimetric data showed to have higher quality and the SRTM DEM is now available with 30 m spatial resolution (SRTM 30), in this work only the SRTM 30 was tested.

Another type of geospatial information freely available for the entire world is the data collected in the collaborative project OpenStreetMap (OSM). The volunteer citizens may create vector data, using a diversity of available feature types, such as rivers, streets, buildings or points of interest, which are represented by points, lines and relations. A list of the features proposed by OSM is available in [17]. OSM data are structured by tags, containing a key and a value. The features that represent watercourses are used in this study, and are characterized by the key “waterway”, which may take several values, such as “rivers”, “streams”, or “riverbank”.

The OSM project became a rapidly growing crowdsourced mapping initiative [18] that has attracted a significant research attention [19]. The data is created by volunteers, which have very different levels of experience and skills in the domain of geographical information. Even though OSM contains approaches to control the quality of the collected data, there are always errors in the data, which may be of several types, e.g., [20–22]. Therefore, several aspects related to the quality of OSM data have been studied in different regions of the world. For example, in some regions (mainly central Europe and some regions of North America) OSM is a rich source of data, containing, in some cases, data that is not available in official datasets. However, there are sometimes inconsistencies, as well as heterogeneity of data regarding, for example, data completeness and positional quality, e.g., [23–26]. Nevertheless, one of the features that the volunteers introduce first in OSM are water bodies, such as rivers, and lakes, as these are important terrain features. Figure 1 illustrates this aspect with two examples, one in Brazil–South America (Figure 1a), and the other in Angola–Africa (Figure 1b), where it can be seen that very few data is available besides water features.

In [16] it was shown that the watercourses of OSM in a few case studies proved to have a better positional accuracy than the drainage networks extracted from the ASTER and the 90 m spatial resolution SRTM DEM. A subsequent study [27] presents a methodology to create a DEMs using the OSM watercourses and elevation points extracted from GDEMs. The study was applied in two study areas and the results showed that the positional accuracy of the drainage networks extracted from the rebuilt DEMs was better than the positional accuracy of the drainage networks extracted from the original GDEMs. This result motivated the present study where it is analysed if a DEM created with the same methodology, using elevation points extracted in this case from SRTM 30 and the OSM water

features, not only improves the horizontal positional accuracy of the extracted drainage networks, but also the vertical accuracy of the drainage network, the accuracy of the DEM itself as well as the accuracy of other parameters, including slope and basin delineation.

The article is structured as follows: in Section 2 the study area and data used are presented. The proposed methodology is described in Section 3 and the results are presented and discussed in Section 4. Finally, some conclusions are drawn in Section 5.

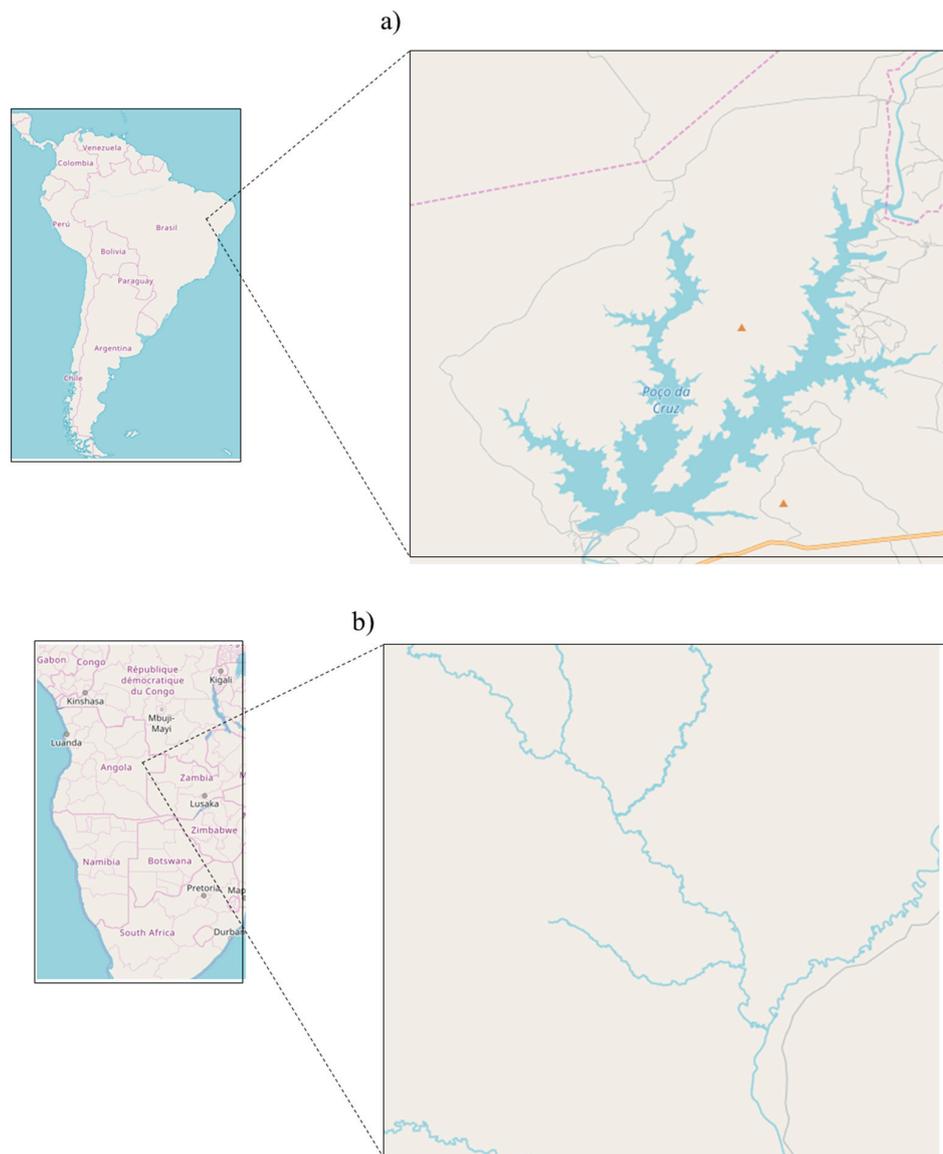


Figure 1. Example of regions of the world with poor coverage of OSM data but where water features are already represented: (a) Brazil and (b) Angola.

2. Study Area and Data

The study was applied to a rectangular region with 13,899 km², located in the United Kingdom, with a maximum and minimum elevation of 198 m and −26 m, respectively. The region is characterized by zones with different characteristics in terms of relief. Figure 2 shows the location of the study area and a 3D visualization of SRTM 30 for that region.

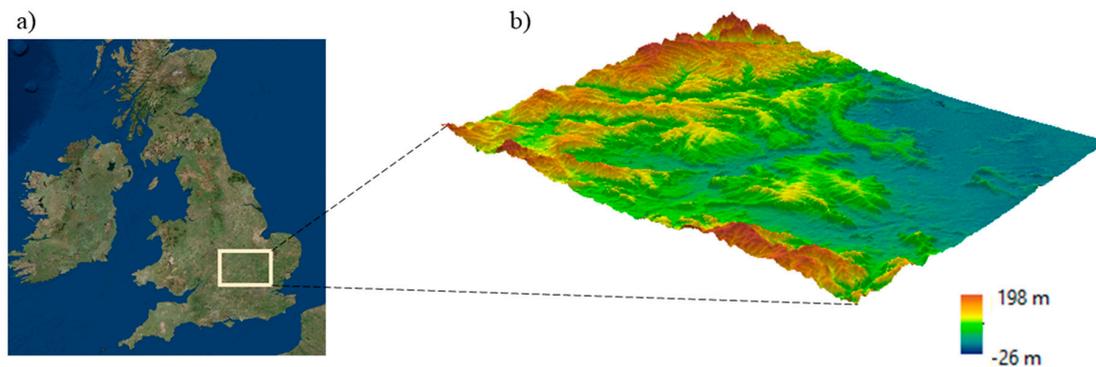


Figure 2. (a) Location of study area, and (b) 3D visualization of the SRTM 30 DEM.

2.1. Data

The datasets used in the present study are: (1) the SRTM 30 DEM for the study area; (2) the waterways extracted from OSM, corresponding to the key “waterway” and values “rivers” and “streams”; and (3) the drainage network of Great Britain and a DEM, with a spatial resolution of 50 m, both datasets available in Ordnance Survey web page, used as reference data.

2.1.1. Digital Elevation Models

SRTM 30 was downloaded in grid format from the US Geological Survey website [11] and is available in geographic coordinates in the World Geodetic System 1984 (WGS84) and the vertical datum EGN96 (Earth Gravitational Model 1996).

A reference DEM was downloaded from the Ordnance Survey web page [28], which is the National British Mapping Agency of United Kingdom, also in grid format, with a spatial resolution of 50 m and the vertical datum Newlyn 1915. This DEM was used as a reference because, even though it has lower spatial resolution than SRTM 30: (1) it was obtained with photogrammetric approaches using large-scale aerial imagery; and (2) according to information available from the Ordnance Survey web page, it has a root mean square error (RMSE) of 4 m, computed using ground reference points, which is higher than the RMSE of SRTM 30, which was proven to be around 10 m, e.g., [29–31]. Figure 3 shows the reference DEM and SRTM 30 for the study area. A closer analysis of Figure 3 enables the identification of some differences in both DEMs, for example, in the regions numbered from 1 to 4 identified by the black circles.

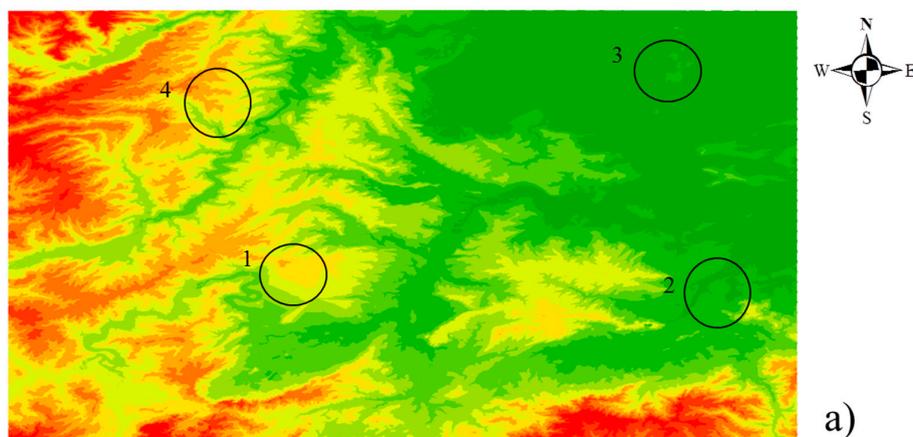


Figure 3. Cont.

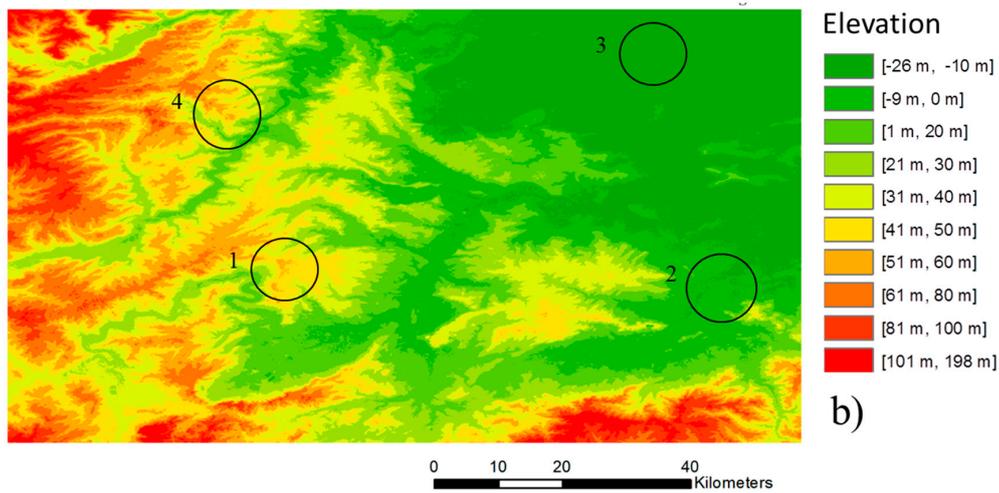


Figure 3. DEMs of the study area: (a) Ordnance Survey DEM; and (b) SRTM 30 DEM.

2.1.2. Watercourses

The OSM data was downloaded in shapefile format from Geofabrik on 8 September 2015. The downloaded OSM data contained all features available for the study area. From these, the features corresponding to the key “waterways” and values “rivers” and “streams” were selected, which correspond to natural water courses. Features with other values, such as “canal” or “ditch” were not considered. Figure 4a shows the OSM watercourses corresponding to the keys “rivers” and “streams” and Figure 4b shows only the rivers. It can be seen that the drainage network shown in Figure 4a presents many incomplete discontinuous branches, while the rivers (Figure 4b) are, in most cases, represented by continuous lines.

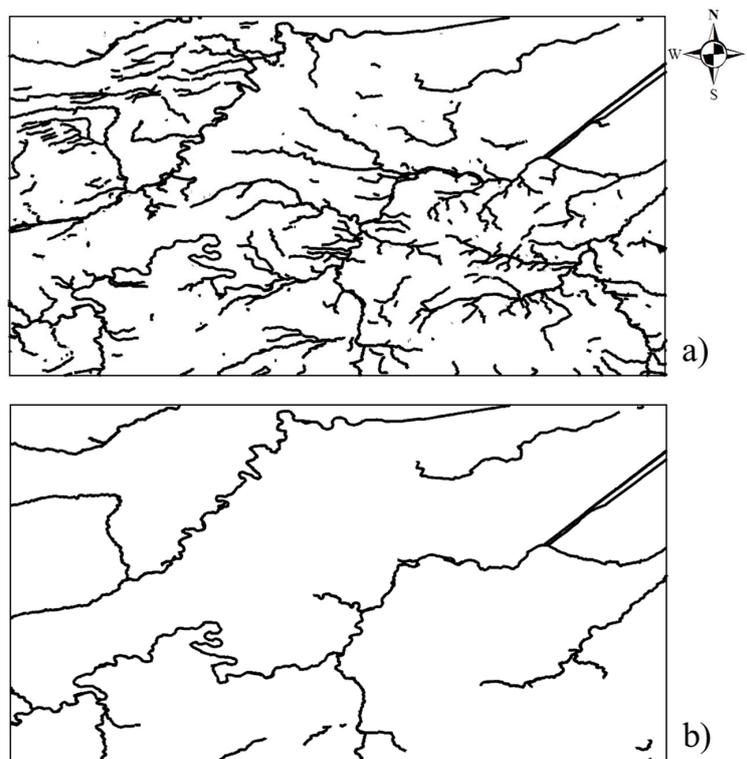


Figure 4. Cont.

3. Methodology

The general methodology applied in this study can be divided into the following sequence of steps: (1) OSM data preparation; (2) creation of a rebuilt DEM using elevation points derived from SRTM 30 and the OSM data; (3) extraction the drainage networks, slopes, and basin limits from the original and rebuilt DEMs; and (4) assess the accuracy of each DEM and of the drainage network, slope and basins delimitation extracted from the original SRTM 30 and the rebuilt DEM, and compare the results obtained with the original SRTM 30 and the rebuilt DEMs. Figure 6 shows the flowchart of the sequence of processes.

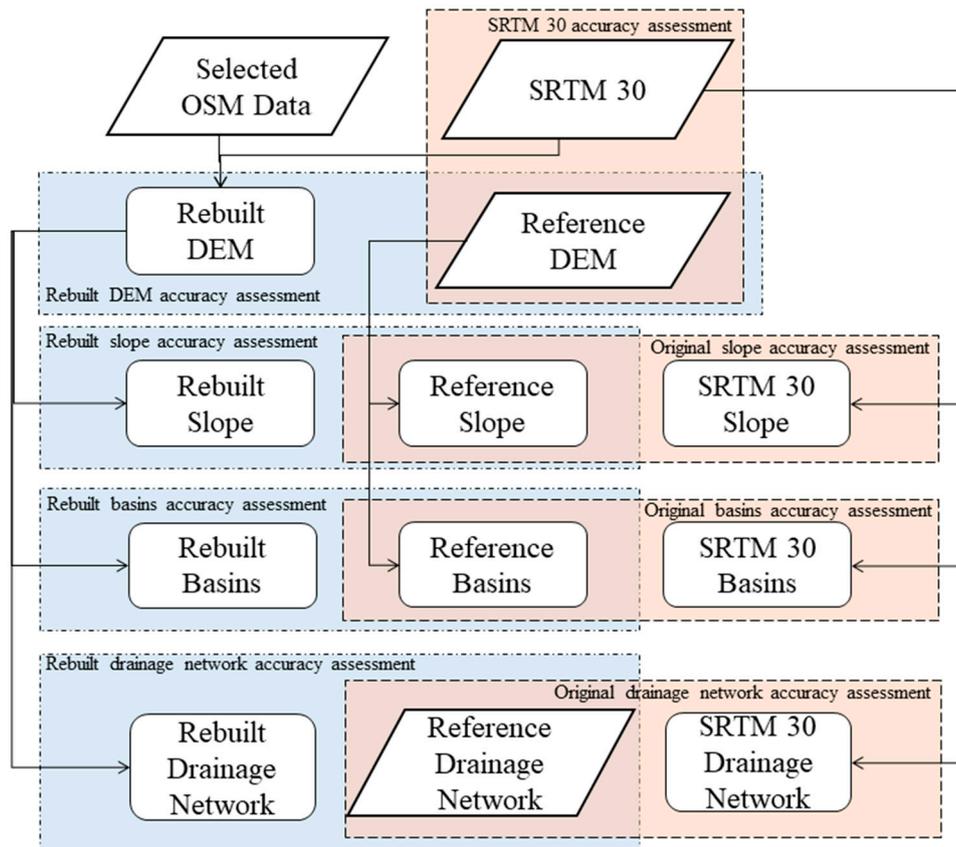


Figure 6. Flowchart of the processes to obtain the accuracy of SRTM 30 and the rebuilt DEM, as well as the accuracy of the drainage network, slopes, and basin delineation extracted from the original SRTM 30 and the DEM rebuilt using OSM data.

3.1. OSM Data Preparation

As mentioned in the introduction, OSM data may present geometric and/or thematic errors. For this application it is important to identify if there are any features represented as natural water courses that are misclassified and correspond to artificial water bodies, such as a reservoir, canal, or ditch, if there are misplaced water lines, or even if some lines do not correspond to a water course. Clearly erroneous data needs to be identified and removed so that it is not used in the process. Figure 7 shows examples of water lines (highlighted with white arrows) that, even though connected to the main drainage network, do not appear to be natural streams, but probably artificial irrigation channels or paths separating agricultural fields. In this study this identification was made by a visual analysis over a satellite image. The Ordnance Survey drainage network is shown in Figure 7 for comparison, even though it was not used for this inspection. There may also be missing water lines in OSM data, which, in this study, were not added.

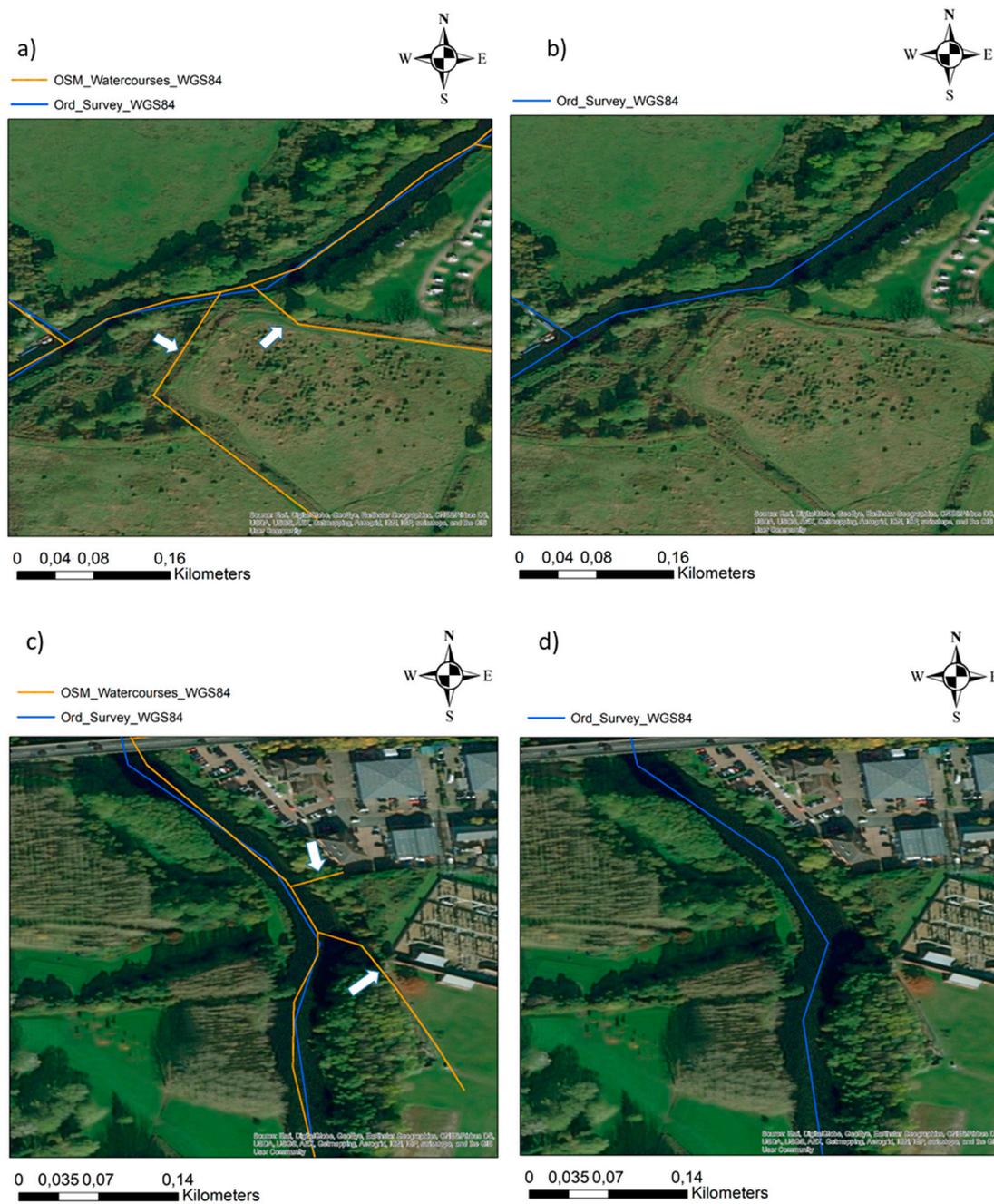


Figure 7. (a,c) show OSM watercourses that were removed from the drainage network used to create the rebuilt DEM (highlighted with white arrows); and (b,d) show the image without the OSM watercourses.

Figure 8 shows additional examples of incorrect OSM waterways that, in this case, are isolated from the drainage network and are not natural water courses.

The other aspect that needs to be checked for this application is the orientation of the water lines extracted from OSM, as the ANUDEM interpolation method implemented in ArcGIS software (ESRI, Redlands, CA, USA), which is used to create the new DEM, requires the waterlines to be oriented from upstream to downstream. As this type of restriction does not exist in the protocols used for OSM data collection, the orientation of all waterways used to create the new DEM needs to be checked and, if necessary, inverted. This can be easily done in ArcGIS (ESRI, Redlands, CA, USA), as the orientation of each linear segment can be made visible by selecting a symbology that shows

the segments' orientation (see Figure 9), and inverted using the "Flip" tool available in the "Editor" toolbar. If wrongly-oriented lines are used to create a new DEM, they generate regions with erroneous morphology and elevation. Figure 9a shows a part of a waterline with wrong orientation overlaid with the slope derived from the DEM created with those OSM waterlines (rivers and streams), showing a large slope variation in the region around the waterline. Figure 9b shows the same when the slope is derived from the rebuilt DEM built with properly-oriented waterways, where this problem does not occur.

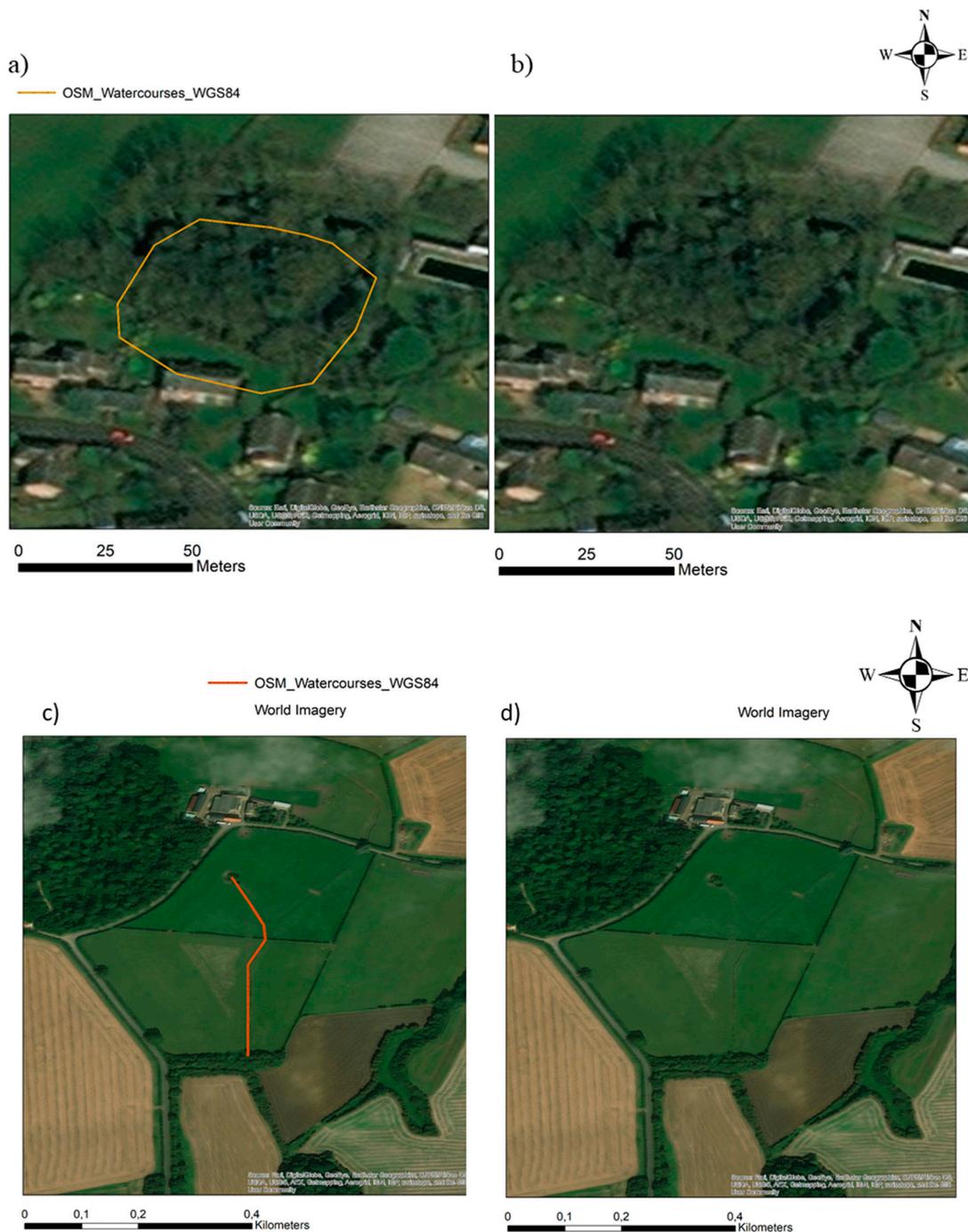


Figure 8. (a,c) show isolated OSM watercourses that were removed from the drainage network used to create the rebuilt DEM; and (b,d) show the image without these watercourses.

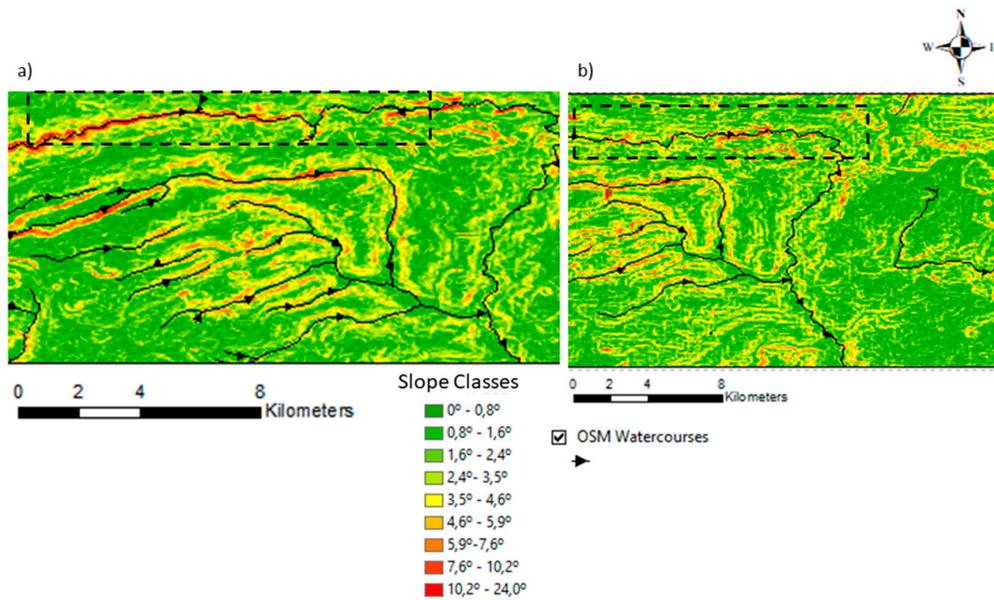


Figure 9. (a) OSM watercourses with incorrect orientation overlaid with the slope map derived from the rebuilt DEM using the incorrectly-oriented OSM waterways; (b) OSM watercourses with corrected orientation overlaid with the slope map derived from the rebuilt DEM using the corrected OSM waterways.

If during the data preparation process lines with wrong orientation are not detected, this problem can, in most cases, be identified a posteriori by locating regions where very steep slopes were obtained.

Figure 10 shows the flow of OSM data processing to select the waterways that are used in the creation of the rebuilt DEM.

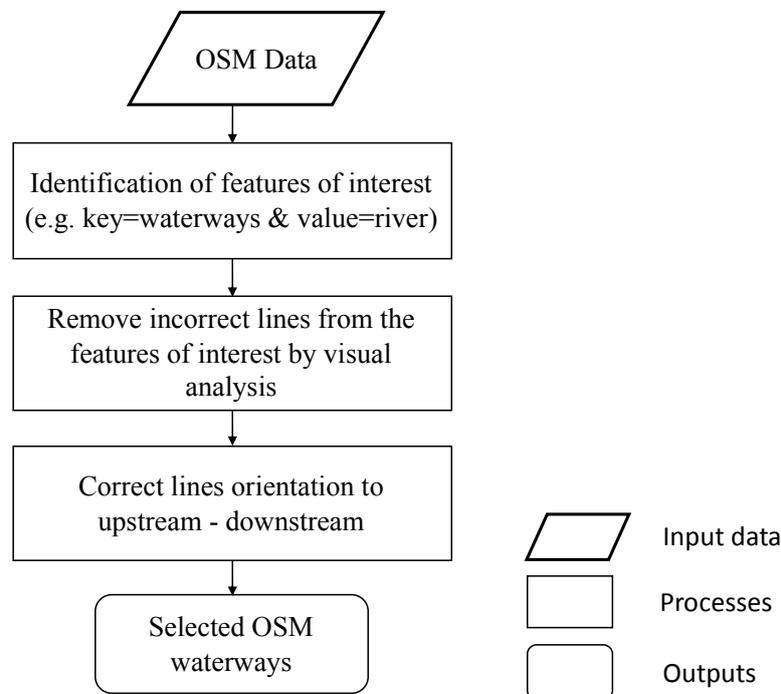


Figure 10. Flowchart of OSM data processing to select the waterways that are used in the creation of the rebuilt DEM.

3.2. Creation of the Rebuilt DEMs

The methodology used to create new DEMs from the global DEMs along with the drainage network extracted from OSM was already presented in [27]. It requires the conversion of the original DEM in grid format into elevation points. In this application this conversion was done using the ArcGIS (ESRI, Redlands, CA, USA) tool “raster to points”. The conversion process generates an elevation point for each cell, positioned in the centre of the cell. These elevation points and the OSM watercourses, as well as the boundary of the study area where the inputs for the ANUDEM interpolation method [33] was applied to create the new surface. The interpolation tool used was “Topo to raster”, available in ArcGIS software (ESRI, Redlands, CA, USA). Figure 11 shows the flowchart of the procedures to create the rebuilt DEM.

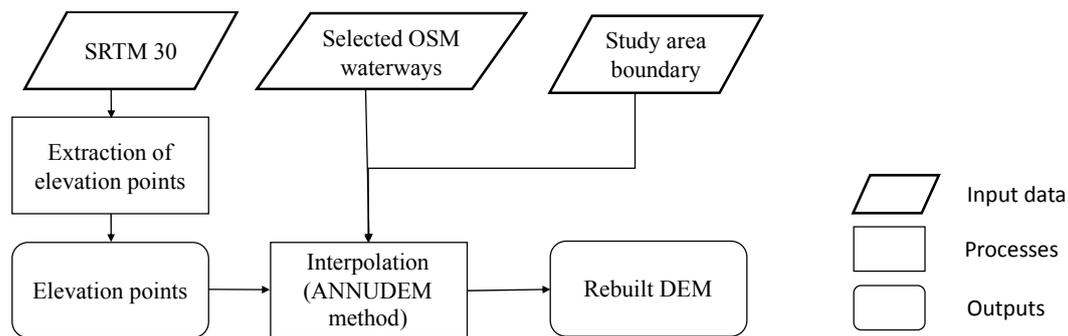


Figure 11. Flowchart of processes to create the rebuilt DEM.

As there may be less accuracy in digitizing streams than rivers, two new DEMs were constructed, one using the rivers and streams selected from OSM and the other using only the rivers, to assess if there would be any significant difference in the accuracy of the results.

3.3. Drainage Networks Extraction from the DEMs

From the original DEM and the rebuilt one, obtained as explained in Section 3.2, the drainage networks were extracted using the D8 algorithm, e.g., [27,33–39]. The “Fill” tool was applied to correct DEM imperfections. Then, the matrix of the flow direction is generated. In this matrix the value of each cell gives a code for the direction of water flow. The flow accumulation is then computed. The output is a raster file where each pixel has a value that corresponds to the number of pixels that drain to it. To generate a drainage network it is necessary to define a critical level (CL) for the flow accumulation, that is, the number of pixels that define if the pixels belong, or not, to the watercourse. The pixel value must be greater than the CL for the pixels to belong to the drainage networks. The CL value is chosen taking into account the spatial resolution of the DEM and the characteristics of the region. Lower CL values produce more branched networks. The values with flow accumulation larger than the CL were selected using the ArcGIS (ESRI, Redlands, CA, USA) software tool “Raster Calculator”. The flowchart of the drainage networks extraction is presented in Figure 12.

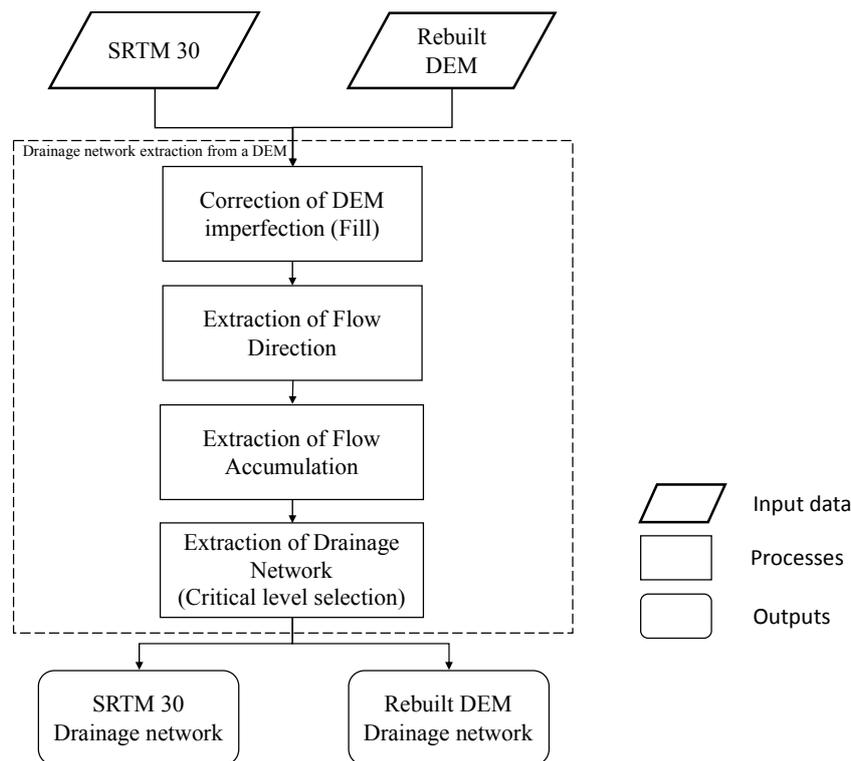


Figure 12. Flowchart of the drainage networks extraction process from SRTM 30 and the rebuilt DEM.

3.4. Slope Computations and Basin Generation

The slope map was computed for each DEM using the ArcGIS (ESRI, Redlands, CA, USA) tool “Slope”. The output can be in percentage or degrees.

The basins of the study area were generated from the reference DEM and the DEMs under analysis. Contributing upstream areas for the chosen pour points can be generated using the tool “watershed”. Figure 13 illustrates the process for their creation, by using the flow direction matrix and a set of chosen pour points that need to be positioned at the water courses, which is achieved by using the tool “Snap pour point” and the flow accumulation matrix.

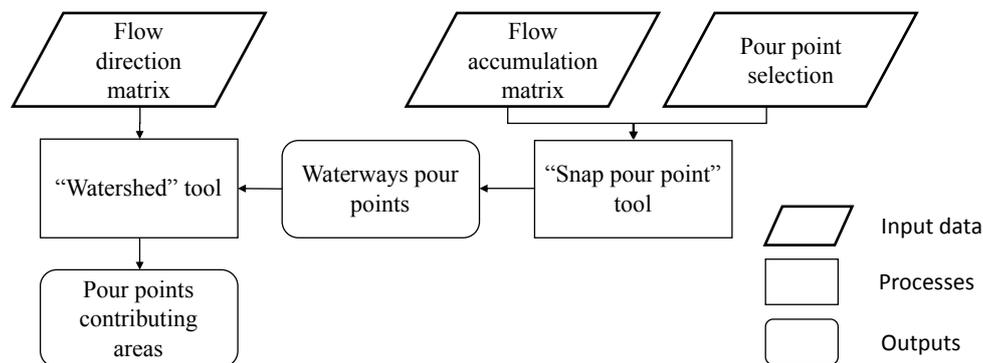


Figure 13. Generating the pour point contributing areas with the “Watershed” tool.

3.5. DEMs and Slope Accuracy Assessment

The accuracy of SRTM 30 and the rebuilt DEMs using the OSM rivers and streams and only OSM rivers was evaluated computing the elevation differences for all n pixels P_k of the considered DEMs

($k = 1, \dots, n$) between the reference DEM (DEM_{Ref}) and each of the DEMs under analysis (DEM_i), where $DEM_i = DEM_{OriginalSRTM}$ corresponds to the original SRTM 30, $DEM_i = DEM_{Reb_rivers/streams}$ corresponds to the rebuilt DEM considering the OSM rivers and streams and $DEM_i = DEM_{Reb_rivers}$ corresponds to the rebuilt DEM considering only OSM rivers. This analysis was made using the ArcGIS (ESRI, Redlands, CA, USA) software tool “minus”:

$$DEM_Dif_i(P_k) = DEM_{Ref}(P_k) - DEM_i(P_k) \quad (1)$$

The mean of the vertical differences for each DEM ($\overline{DEM_Dif_i}$) was determined as well as the standard deviation ($\sigma_{DEM_Dif_i}$) and the RMSE ($RMSE_{DEM_Dif_i}$) using Equations (2)–(4) respectively, where n is the number of pixels of the DEMs (in this case study $n = 2,426,720$):

$$\overline{DEM_Dif_i} = \frac{\sum_{k=1}^n DEM_Dif_i(P_k)}{n} \quad (2)$$

$$\sigma_{DEM_Dif_i} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (DEM_Dif_i(P_k) - \overline{DEM_Dif_i})^2}{n}} \quad (3)$$

$$RMSE_{DEM_Dif_i} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (DEM_Dif_i(P_k))^2}{n}} \quad (4)$$

The accuracy of the slope maps was obtained with the same procedure, that is, by computing the difference between the reference slope map obtained from the Ordnance Survey DEM and the slope maps obtained from the DEMs under analysis using Equation (5). The mean, the standard deviation, and the RMSE of the obtained differences were computed using Equations (6)–(8), respectively:

$$Slope_Dif_i(P_k) = Slope_{Ref}(P_k) - Slope_i(P_k) \quad (5)$$

$$\overline{Slope_Dif_i} = \frac{\sum_{k=1}^n Slope_Dif_i(P_k)}{n} \quad (6)$$

$$\sigma_{Slope_Dif_i} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (Slope_Dif_i(P_k) - \overline{Slope_Dif_i})^2}{n}} \quad (7)$$

$$RMSE_{Slope_Dif_i} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (Slope_Dif_i(P_k))^2}{n}} \quad (8)$$

3.6. Drainage Network Accuracy Assessment

3.6.1. Horizontal Accuracy

The procedure used to assess the horizontal accuracy of the drainage network extracted from the rebuilt DEMs is the method used in [27], where the comparison is made with a reference drainage network. For this comparison a buffer is generated around the reference drainage network (whose width needs to be identified for each region) in order to identify the sections of the drainage network under analysis that may be considered as corresponding to the reference drainage network sections.

The drainage networks to be analysed are then transformed into points using the tool “Feature vertices to points”. Afterwards the horizontal distances between those points and the reference line are computed using the proximity tool “Near”. Figure 14 shows the flowchart of this process. The mean, the standard deviation, and RMSE of the distances obtained are then computed.

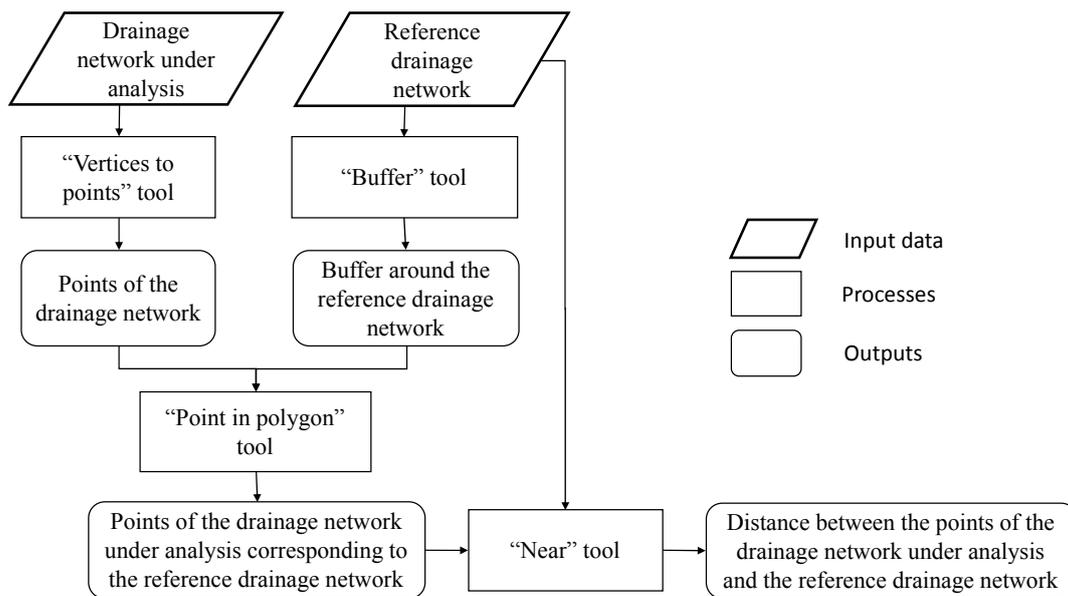


Figure 14. Flowchart for the calculation of the distance between sections of drainage networks under analysis identified as corresponding to the reference data.

3.6.2. Vertical Accuracy

In this article the vertical accuracy of obtained drainage networks is also computed. For this, after the conversion of the drainage networks under analysis into m points Q_j , for $(j = 1, \dots, m)$, as explained in the previous section, the elevation at the reference and rebuilt DEMs was associated to the points using the tool “Extract multivalues to points”. This enables the computation at points Q_j of the differences of elevation DN_Dif_i between the reference (DEM_{Ref}) and the rebuilt DEMs (DEM_i), as indicated in Equation (9), where i represents the *Original SRTM*, *Reb_rivers/streams* or *Reb_rivers*, as indicated in Section 3.5. The analysis was made for all study area, but also in some zones with different characteristics selected from the study area:

$$DN_Dif_i(Q_j) = DEM_{Ref}(Q_j) - DEM_i(Q_j) \quad (9)$$

The mean, the standard deviation, and the RMSE of the obtained distances were then computed using Equations (10)–(12). Figure 15 shows the flowchart to calculate the vertical accuracy of drainages:

$$\overline{DN_Dif_i} = \frac{\sum_{j=1}^m DN_Dif_i(Q_j)}{m} \quad (10)$$

$$\sigma_{DN_Dif_i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (DN_Dif_i(Q_j) - \overline{DN_Dif_i})^2}{m}} \quad (11)$$

$$RMSE_{DN_Dif_i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (DN_Dif_i(Q_j))^2}{m}} \quad (12)$$

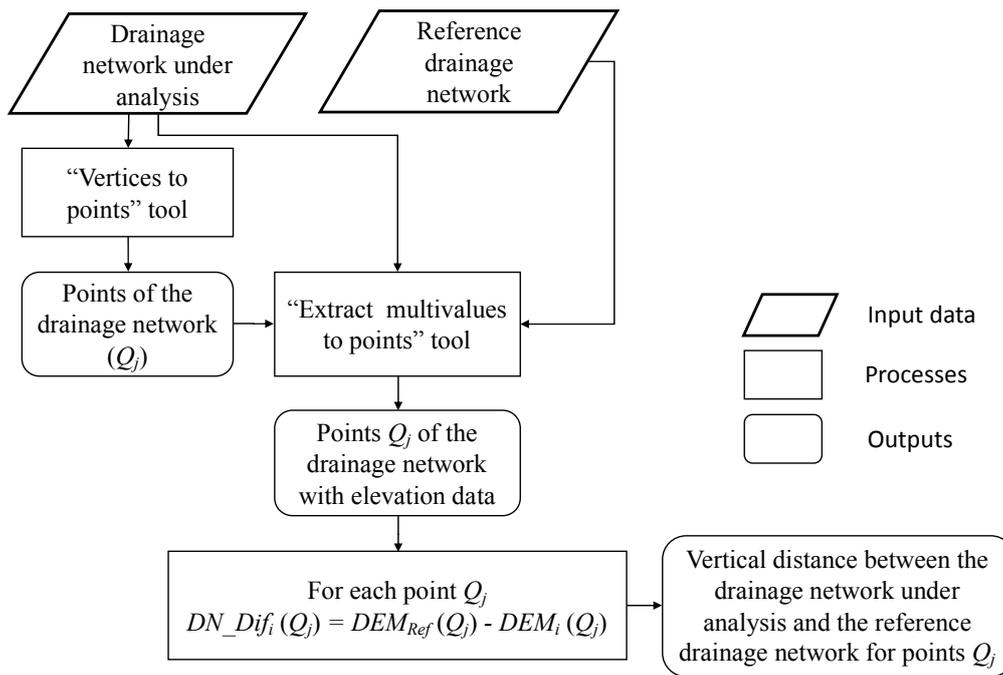


Figure 15. Flowchart of the procedure to assess the vertical accuracy of the drainage networks.

3.7. Basins Accuracy Assessment

To assess the accuracy of basin delineation, the pour point-contributing areas were generated considering the reference DEM, the original SRTM 30, and the rebuilt DEMs using OSM rivers and streams and only OSM rivers. The results were compared by computing the total area of each basin, and assessing the differences between the area of the basins obtained from the reference DEM and the ones under analysis.

4. Results

4.1. DEMs Accuracy

The accuracy of the DEMs was evaluated as explained in Section 3.5. Table 1 shows the mean ($\overline{DEM_Dif_i}$), the standard deviation ($\sigma_{DEM_Dif_i}$), the RMSE, and the maximum and the minimum of the differences (DEM_{Dif_i}) of elevation between the reference DEM, the rebuilt DEM considering the rivers and streams from OSM, and the one obtained using only the rivers. This assessment was performed for the entire study area considering all pixels of the DEMs. It can be seen that the mean difference between the rebuilt DEM obtained with rivers and streams is smaller than the mean of the differences obtained for the original SRTM 30, decreasing from -6.0 m to -4.5 m, while, for the rebuilt DEM using only the rivers, the mean difference is kept unchanged. This shows that the systematic difference between the reference DEM and the rebuilt DEM using rivers and streams decreased. The standard deviations, RMSE, as well as the maximum and minimum values of the differences do not show significant changes, except for a small decrease of the standard deviation, RMSE, and maximum difference for the DEM obtained with only the OSM rivers.

Table 1. Mean ($\overline{DEM_Dif_i}$), standard deviation ($\sigma_{DEM_Dif_i}$), RMSE, and maximum and minimum values of the differences DEM_Dif_i between the reference DEM and each DEM under analysis.

DEM <i>i</i>	$\overline{DEM_Dif_i}$ (m)	$\sigma_{DEM_Dif_i}$ (m)	$RMSE_{DEM_{Dif_i}}$ (m)	$max(DEM_Dif_i)$ (m)	$min(DEM_Dif_i)$ (m)
SRTM 30	-6.0	27.5	28.14	43	-53
Rebuilt DEM (rivers and streams)	-4.5	27.7	28.06	43	-52
Rebuilt DEM (rivers)	-6.0	26.8	27.46	40	-52

Figure 16 shows the spatial distribution of those differences for the original SRTM (a), the rebuilt DEM using rivers and streams (b), and the rebuilt DEM using only the rivers (c). It can be seen that there are more pixels in (a) and (c) in red, corresponding to positive differences between the reference DEM and the rebuilt DEM, with values in the interval 21 m to 40 m, while in (b) there are more regions in yellow and light orange (corresponding to differences close to zero) and much fewer regions in red. The regions with negative differences (shown in green) correspond to the regions where the rebuilt DEMs are higher than the reference DEM, and these regions are kept more or less unchanged. A closer analysis shows that these regions are located in the more elevated areas, where the drainage network used to rebuild the SRTM has less influence.

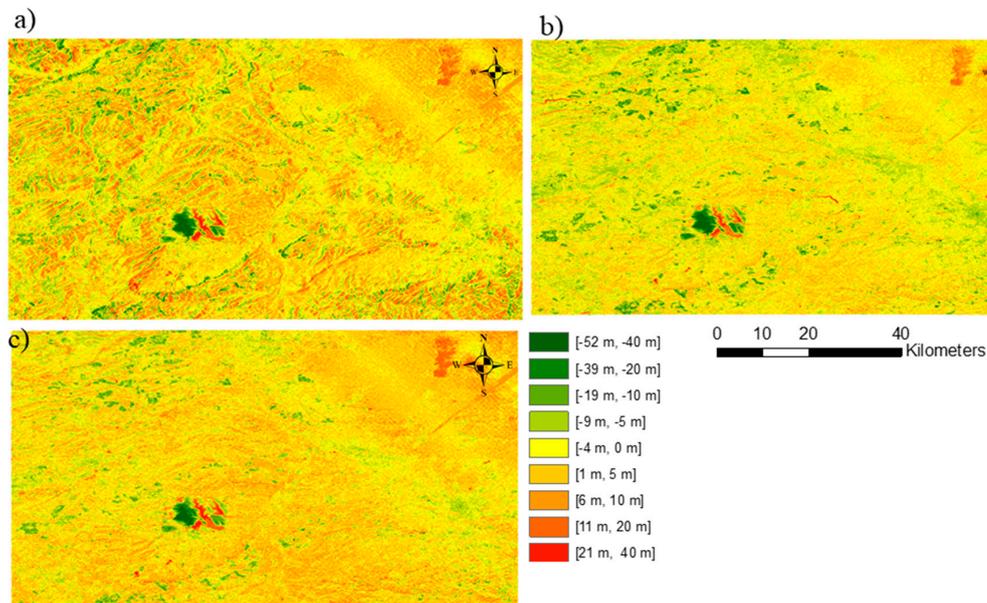


Figure 16. Difference of elevations between the reference DEM and (a) the original SRTM 30 DEM, (b) the rebuilt DEM using rivers and streams, and (c) the rebuilt DEM using the rivers.

4.2. Slope Accuracy

Figure 17 shows the slope of reference DEM (a), of the original SRTM 30 DEM (b), and the slope of the rebuilt DEM using rivers and streams (c). Some differences can be observed, namely in the regions highlighted by black circles. For example, in zone (1) triangles can be easily identified in the data obtained from the reference DEM, clearly resulting from a DEM created using a Triangular Irregular Network (TIN).

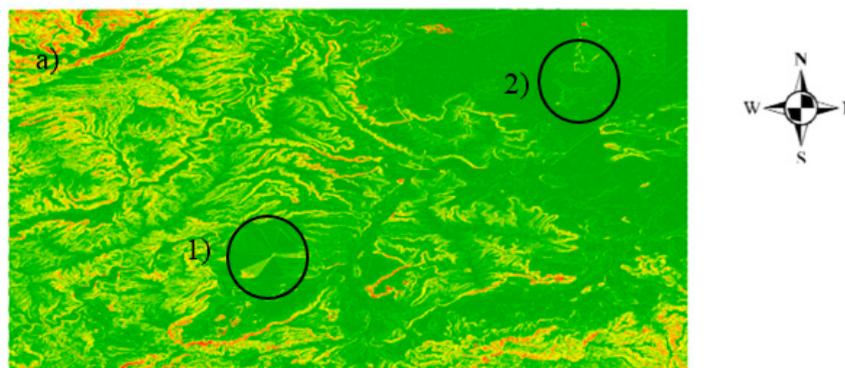


Figure 17. Cont.

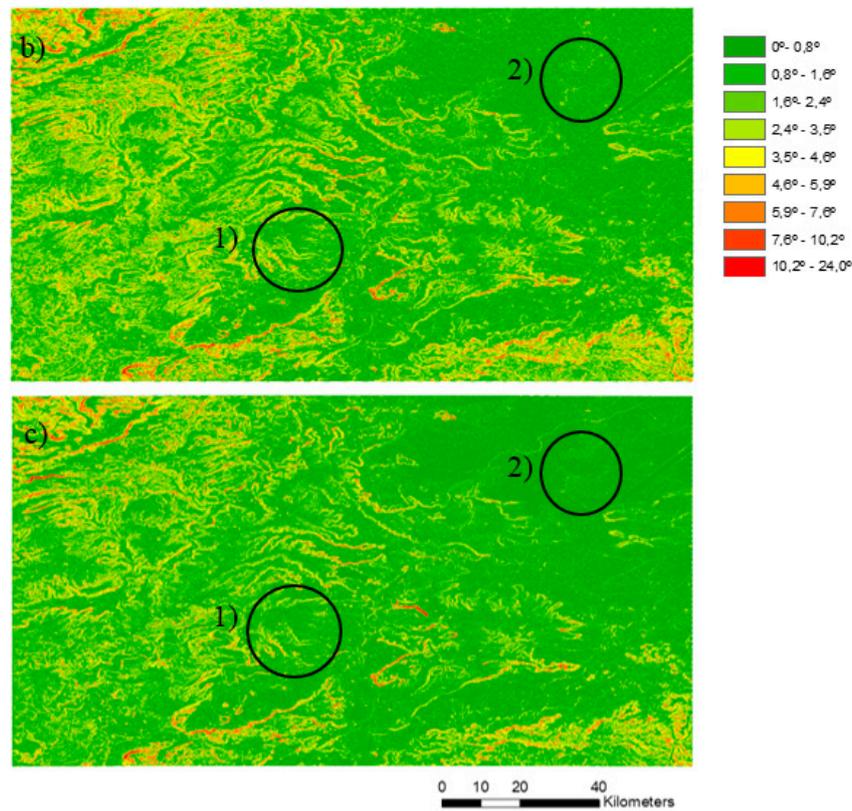


Figure 17. Slope of the study area derived from: (a) the Ordnance Survey reference DEM, (b) the original SRTM 30, and (c) rebuilt DEM using rivers and streams. The black circles 1) and 2) highlight regions where differences between maps can be observed.

Table 2 shows the results of the mean, standard deviation, RMSE, maximum and minimum values of the differences between the slope map derived from the reference DEM and the ones derived from the original SRTM 30, and the rebuilt DEM using OSM rivers and streams.

Table 2. Mean ($\overline{Slope_Dif_i}$), standard deviation ($\sigma_{Slope_Dif_i}$), maximum and minimum, and RMSE ($RMSE_{Slope_Dif_i}$) of differences ($Slope_Dif_i$) between the slope map derived from the reference DEM and the slope maps obtained from the original and rebuilt DEM using OSM rivers and streams.

Slope Map Extracted from DEM i	$\overline{Slope_Dif_i}$ (degrees)	$\sigma_{Slope_Dif_i}$ (degrees)	$RMSE_{Slope_Dif_i}$ (degrees)	$max(Slope_Dif_i)$ (degrees)	$min(Slope_Dif_i)$ (degrees)
SRTM 30	2.4	10.0	10.28	19	−15
Rebuilt DEM (rivers and streams)	−0.4	10.5	10.51	18	−18

It can be seen that the mean difference between the slope maps derived from the rebuilt DEM using rivers and streams and the slope map considered as the reference decreases from 2.4 to −0.4 degrees, which is an indicator of a decrease in the systematic difference between the slope derived from the reference DEM and the slope derived from the original SRTM 30 and the rebuilt DEM. As for the other quality indicators, there is no significant change, which means that no additional gains were obtained regarding the spread of the differences. However, it should be mentioned that the differences in resolution between the reference DEM (50 m) and the original and rebuilt DEMs (30 m) may have a considerable influence over slope values, as these depend upon the difference in elevation and the horizontal distance between the considered points (pixels centroids).

4.3. Drainage Networks Accuracy

4.3.1. Horizontal Accuracy

Figure 18 shows the reference drainage network (a), the drainage networks obtained from the original SRTM 30 DEM (b), and the drainage networks obtained from the rebuilt DEM using the OSM rivers and streams (c), and only the OSM rivers (d). With a visual analysis some differences may be observed between the reference drainage network and the drainage networks generated from the original and rebuilt DEMs, particularly in the zone of lower elevation, corresponding to the upper right region. Even though it can be seen that there are a few disconnected lines in the reference drainage network in this region, it can be seen that in the plain zone the rebuilt drainage networks are closer to the reference than the one extracted from the original SRTM 30.

The procedure explained in Section 3.6.1 was used to quantify the closeness of the drainage networks obtained from SRTM 30 and the rebuilt DEMs to the ones used as a reference. Table 3 shows the mean and the standard deviation of the horizontal distance between the networks under analysis and the reference considering 500 m buffers around the reference drainage network. The results show a significant decrease of the distances between the drainage networks extracted from the rebuilt DEMs and the reference drainage networks, when compared to the distance between the drainage networks extracted from the original SRTM 30 and the reference. This decrease is larger for the DEM rebuilt with rivers and streams (the mean distance decreases from 87.0 to 52.9 m) than for the DEM rebuilt considering only the rivers (the mean distance decreases from 87.0 to 76.0 m). A decrease was also observed for the standard deviation and the RMSE, more substantial for this last accuracy indicator (from 143.01 to 111.5 m).

Table 3. Mean, standard deviation (σ), and RMSE of the horizontal distances between the points of each drainage under study (the original, the rebuilt with OSM rivers and streams, and the rebuilt with OSM rivers), and the reference drainage network.

Drainage Network Extracted from DEM i	mean (m)	σ (m)	RMSE (m)
SRTM 30	87.0	113.5	143.01
Rebuilt DEM (rivers and streams)	52.9	98.1	111.5
Rebuilt DEM (rivers)	76.0	108.9	132.8

In addition to the analysis of the positional accuracy of the drainage network in the entire study area, an analysis was made for zones with different relief characteristics. Four zones were selected as indicated in Figure 19, referred to by Z1, Z2, Z3, and Z4. Zone Z1 corresponds to the region with higher elevation, zones Z2 and Z3 correspond to transition zones to flat regions, and zone Z4 corresponds to a flat zone.

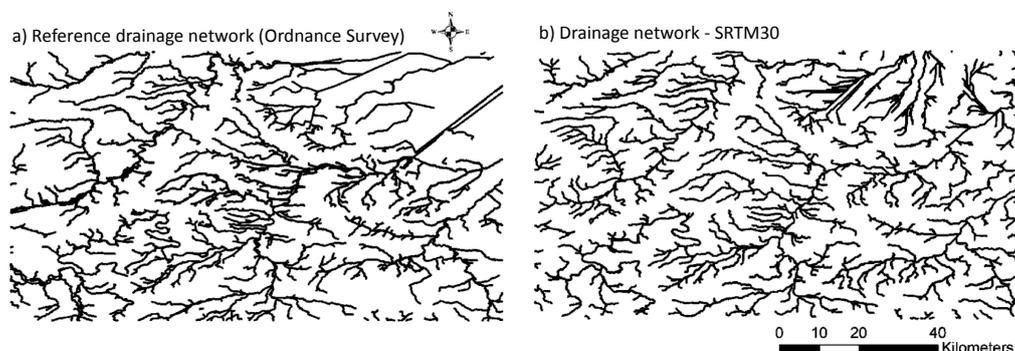


Figure 18. Cont.

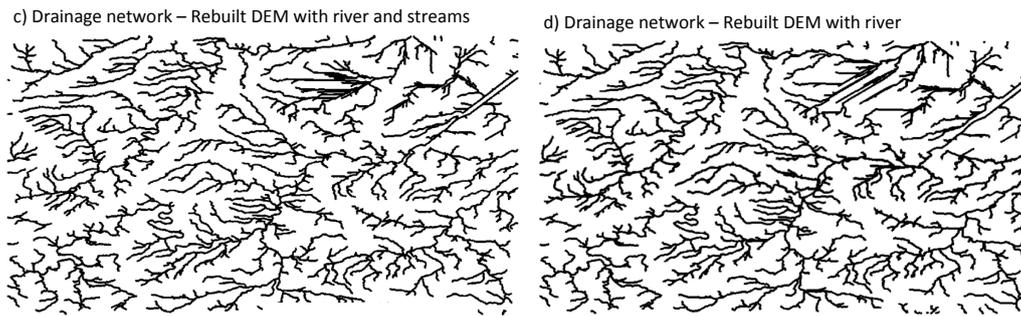


Figure 18. The Ordnance Survey reference drainage network (a), the drainage network extracted from the original SRTM 30 (b), from the rebuilt DEM using OSM rivers and streams (c), and from the rebuilt DEM using only the rivers (d).

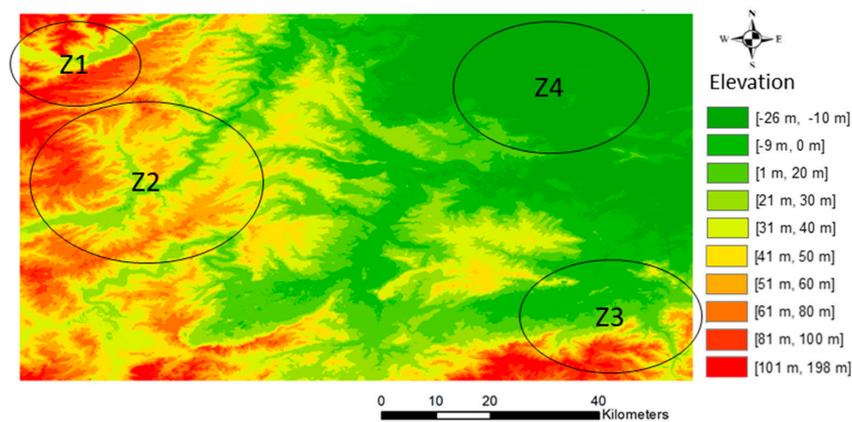


Figure 19. Zones defined inside the study area.

Figure 20 shows the mean, which is the quality indicator showing largest changes, of the horizontal distances between the reference drainage network and each drainage network under study for the whole study area and for zones Z1, Z2, Z3, and Z4.

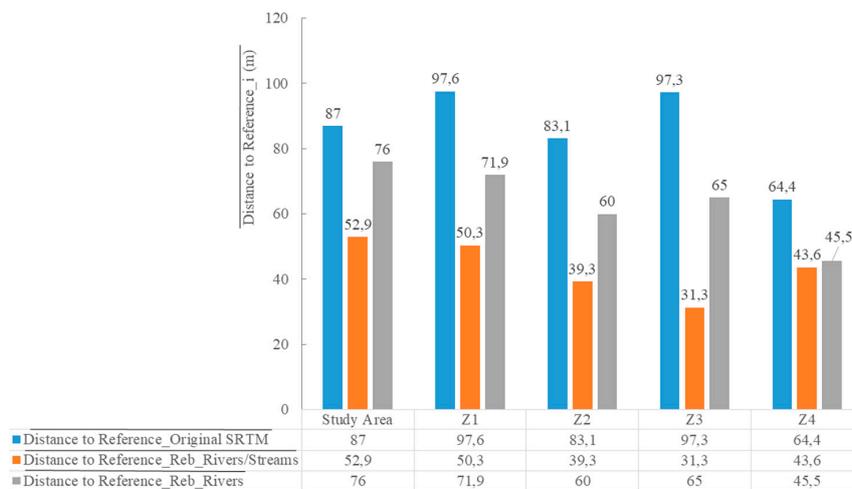


Figure 20. Graph showing the variation of the mean horizontal distance between the reference drainage network and the drainage network obtained from the original SRTM 30, and the rebuilt DEM using OSM rivers and streams and only rivers.

The results show that for all regions the best results are obtained for the DEM rebuilt with OSM rivers and streams, and that the largest improvements were obtained for zones Z2 and Z3 (transition zones for the flat regions), where, for example for zone Z3 the mean distance to the reference lines decreased from 97.3 m for the networks extracted from the original SRTM 30 to 31.3 m for the network extracted from the rebuilt DEM using OSM rivers and streams.

4.3.2. Vertical Accuracy

The vertical accuracy of the drainage networks was assessed as described in Section 3.6.2. Table 4 shows the mean, standard deviation, and RMSE of the vertical differences between the elevations extracted from the reference DEM and the elevations extracted from each DEM under analysis.

Table 4. Mean, standard deviation (σ), and root mean square error (RMSE) of the vertical distances between the points of each drainage under study (the original, the rebuilt with OSM rivers and streams and the rebuilt with OSM rivers) and the reference drainage network.

Drainage Network Extracted from DEM i	$\overline{DN_{Dif_i}}$ (m)	$\sigma_{DN_{Dif_i}}$ (m)	$RMSE_{DN_{Dif_i}}$ (m)
SRTM 30	2.5	3.9	4.6
Rebuilt DEM (rivers and streams)	-0.03	4.8	4.8
Rebuilt DEM (rivers)	-0.7	4.7	4.8

These results show that the mean vertical differences between the drainage networks extracted from the rebuilt DEMs decreased when compared to the values obtained for the drainage networks extracted from the original SRTM 30, corresponding to a reduction of the systematic distance between the reference and the rebuilt DEM drainage networks. However, the values of the standard deviation and RMSE increase slightly, therefore, showing no improvement at all in the spread of values around the mean deviation.

Figure 21 shows a graph where the mean of the vertical differences between the reference drainage network and the drainage networks extracted from the original SRTM 30 and the rebuilt DEMs using OSM rivers and streams and only OSM rivers is represented for the complete study area and for zones Z1, Z2, Z3, and Z4.

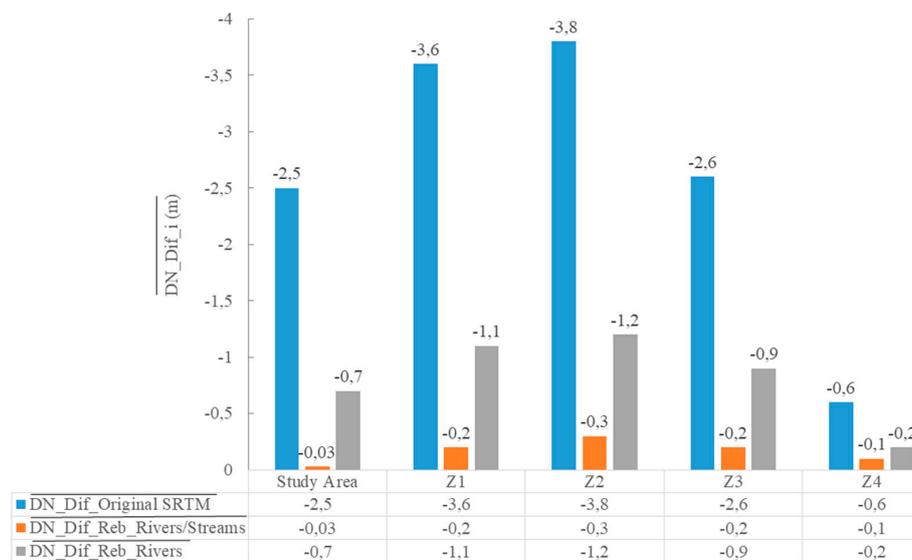


Figure 21. Graph showing the mean vertical distance between the elevations of the drainage networks extracted from the reference and the original SRTM 30, and the rebuilt DEM using OSM rivers and streams, and only OSM rivers.

A decrease of the mean differences was obtained for the whole study area, where a decrease from -2.5 m to -0.03 m can be observed, and also for all zones. Once again, the results using the DEM created using OSM rivers and streams are better, with the lowest improvement in relation to the rebuilt DEM obtained using only rivers occurring in zone Z4, corresponding to a flat region, where the influence of the streams is less important to correct the DEM. The values of the standard deviation obtained for zones Z1 to Z4 were, however, lower than the ones obtained for the whole study area, respectively 1.9, 2.9, 1.7, and 1.0 for zones Z1 to Z4 for the drainage networks obtained from the rebuilt DEM using rivers and streams, and 1.9, 2.1, 1.5, and 0.9 for the drainage networks obtained from the rebuilt DEM using only OSM rivers. This also shows that there is less spread of values in the flatter regions, as expected.

4.3.3. River Analysis

A more detailed analysis of the changes obtained with the rebuilt DEMs was made for two river sections in the study area, located in regions with different types of relief. Figure 22 shows the location of the analysed rivers sections. The one indicated as (1) is located in a region with higher altitude and steepest slopes, and river section (2) is located in a relatively flat region.

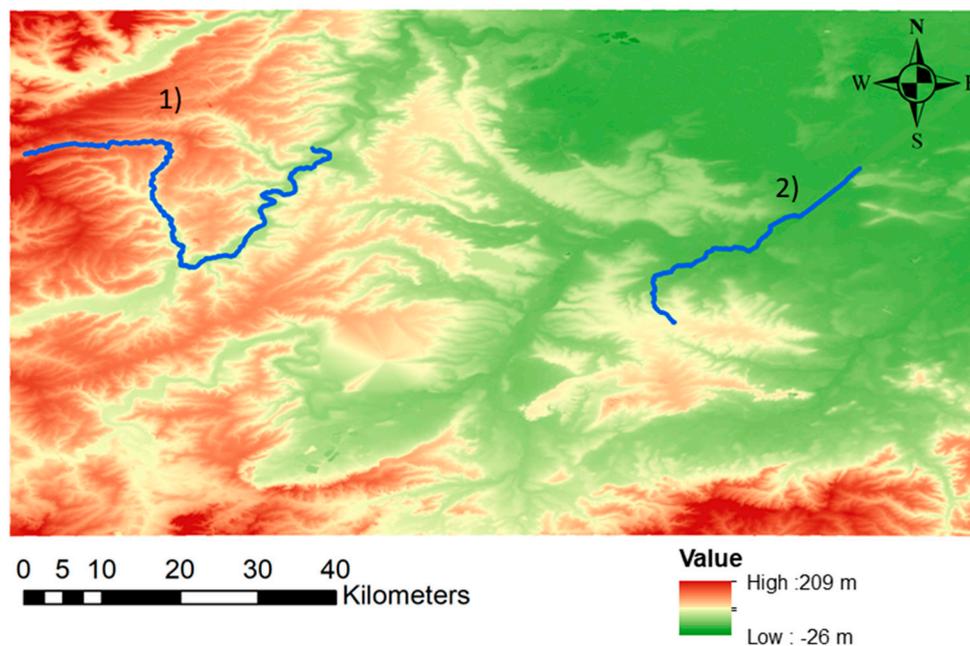


Figure 22. Location of rivers section (1) and (2) in the study area.

Figure 23 shows the horizontal position of the river sections indicated in Figure 22 extracted from the reference drainage network, from the original SRTM 30, and from the DEM rebuilt with OSM rivers and streams.

Observing Figure 23 it can be seen that in most regions the rivers sections extracted from the rebuilt DEM are coincident with the reference data, except in the regions highlighted with dashed circles. Additionally, for river section (2) the rebuilt DEM enabled correcting the position of a large section of the river when compared to its location extracted from SRTM 30, highlighted with a dashed rectangle, where the horizontal distance between the lines originally reached approximately 1700 m.

Figure 24 shows the profiles of the river sections indicated in Figures 22 and 23. It can be seen that, in both cases, the drainage network obtained from the rebuilt DEM is, in general, closer to the reference data. The only exception is in the beginning of river section (1) (between 0 m and 5000 m of accumulated distance), where the vertical difference between the reference and the rebuilt line

take values near 14 m. It can also be observed that, in this river section, the lower differences take place between the accumulated distances of 7000 m and 16,000 m for the SRTM 30 and rebuilt lines. For river section (2) the largest vertical difference between the reference and the rebuilt line occurs at the beginning of the river section with a value near 25 m. It can also be seen that the major differences of elevation between the reference and the drainage networks extracted from SRTM 30 and the rebuilt DEM occur until 4000 m of accumulated distance, corresponding to the region with a major variation in elevation. In the remaining part of this river section, corresponding to the regions of lowest altitude, both lines showed an increasing approximation to the reference.

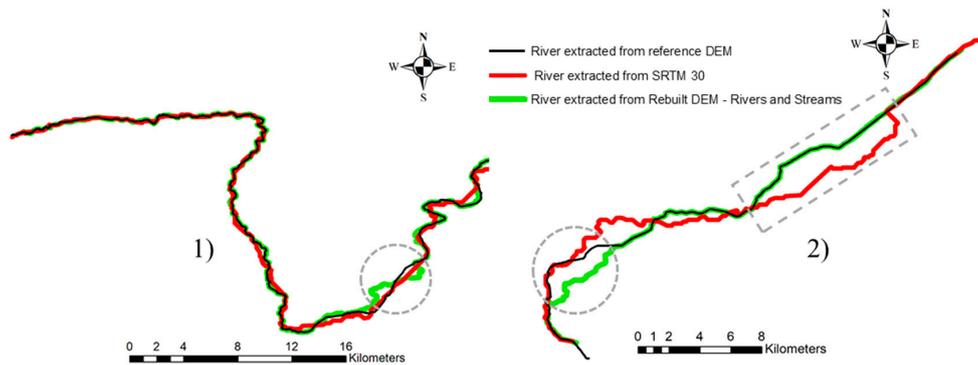


Figure 23. Horizontal positional of the river sections indicated in Figure 22 extracted from the reference (in black), from SRTM 30 (in red) and from the rebuilt DEM using OSM rivers and streams (in green).

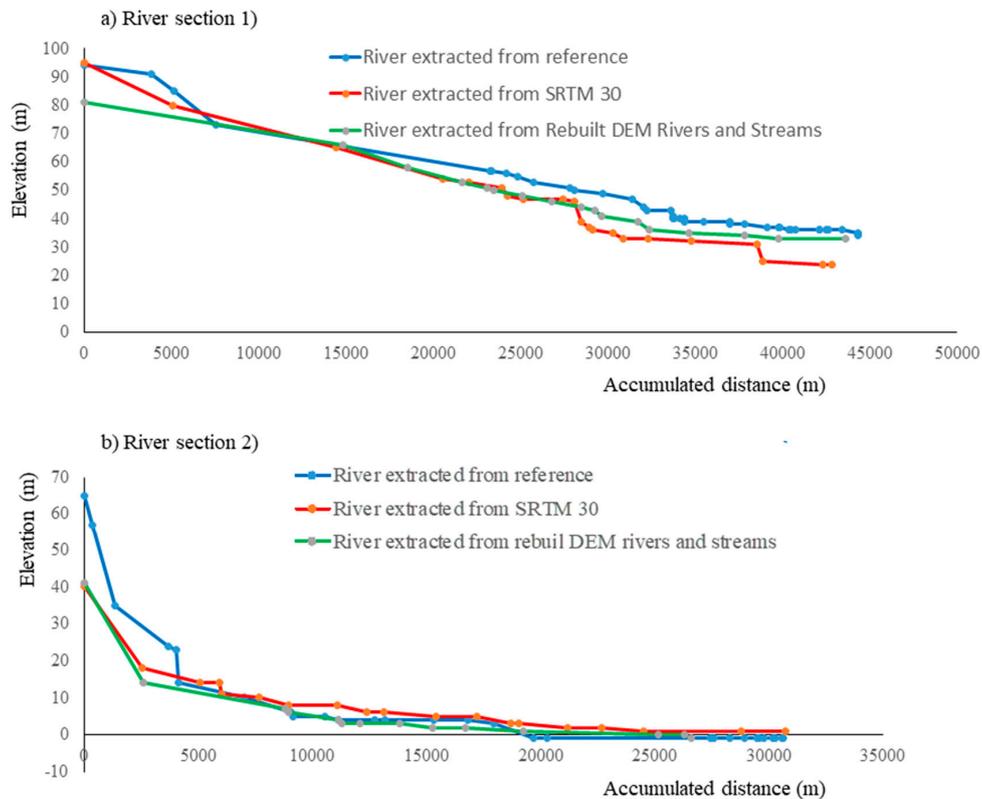


Figure 24. Profiles of a river sections indicated as (1) and (2) in Figure 22.

4.4. Basin Accuracy

Figure 25 shows the basins obtained for the three pour points selected for the analysis of corresponding basins. It can be seen that the shape and dimension of the basins obtained with the rebuilt DEM considering OSM rivers and streams (c) are very similar to the ones obtained with the reference DEM (a). The basins obtained from the original SRTM 30 (b) present significant differences from the ones obtained from the reference DEM for basins 1 and 2, and the results obtained from the rebuilt DEM using only OSM rivers is very similar to the ones obtained from the original SRTM.

Figure 26 shows the area differences between the basins obtained from the reference DEM and the ones obtained from SRTM and the rebuilt DEMs. It can also be seen that the areas of the basins obtained from the rebuilt DEM with OSM rivers and streams are very similar to the ones obtained from the reference DEM, with a larger difference for Basin 3 (-8 km^2), due to the extra region identified at the top left of the study area (Figure 26a,c).

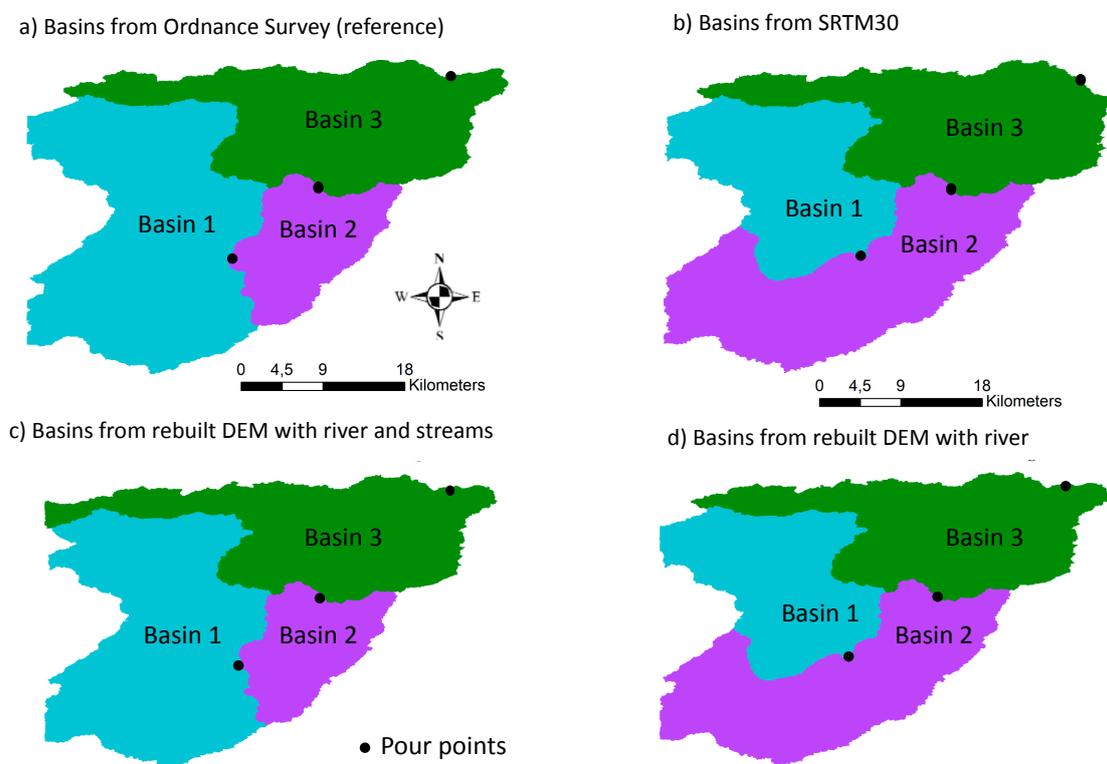


Figure 25. Basins generated for the indicated pour points from: (a) the reference DEM, (b) the original SRTM 30, (c) the rebuilt DEM with OSM rivers and streams, and (d) the rebuilt DEM with OSM rivers.

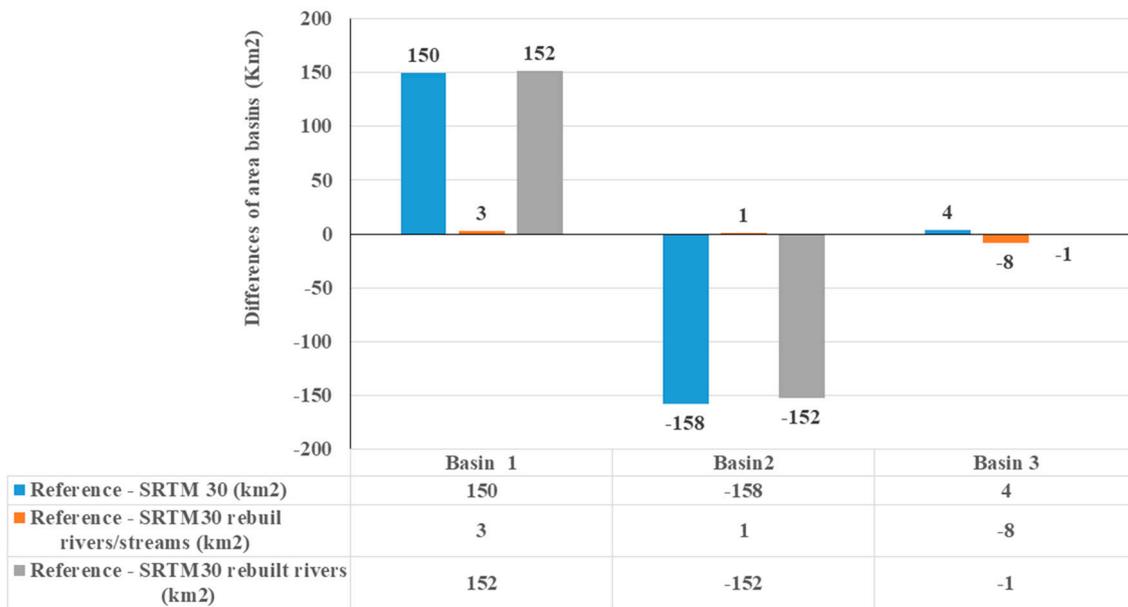


Figure 26. Graph showing the area differences between the basins obtained from the reference DEM and the ones obtained from SRTM 30 and the rebuilt DEMs (the SRTM 30 DEM rebuilt with OSM rivers and streams and the SRTM 30 rebuilt with OSM rivers).

5. Conclusions

A methodology was applied to create a new DEM using elevation data extracted from the GDEM SRTM 30 and waterways extracted from the collaborative project OSM. The conversion process requires the extraction of elevation points from the DEM and the selection in OSM of the feature’s “key” and “values” that correspond to natural waterways. Clearly incorrect OSM features then need to be removed from the data. This was made by visual analysis over a satellite image. The remaining features are then analysed in terms of the line orientation, as the interpolation method used to create the rebuilt DEM requires the use of waterways oriented from upstream to downstream. The orientation of the lines with the opposite orientation needs to be changed before the interpolation is performed to generate the new DEM. An analysis was made using rivers and streams extracted from OSM and only rivers, to determine, on one hand, if using only the rivers would have any improvement over the original, as in many regions of the world only the main waterways may be available in OSM, and, on the other hand, to assess if the streams, which are likely to have more errors, as they are harder to identify on the satellite images used as background for feature digitization in OSM, would introduce additional errors. The methodology was applied to a study area in the United Kingdom, and the DEM and drainage network available from the Ordnance Survey website were used as reference data to assess the accuracy of the obtained results.

The results show that using the rivers and streams extracted from OSM waterways enables to decrease the mean vertical distance between the rebuilt DEM and the reference DEM, which shows a reduction in the systematic error in relation to the original SRTM 30. The same was observed for the slope map extracted from the rebuilt DEM. The drainage networks extracted from the rebuilt DEM have better horizontal accuracy. When the elevation of the reference DEM is associated to the reference drainage network and the elevation of the other DEMs is associate to the drainage networks extracted from them, a slight improvement in the mean vertical distance between the reference data and the elevation of the drainage networks extracted from the rebuilt DEMs in relation to the original SRTM can be observed, even though no improvements were observed in the standard deviation, showing no improvements in the spread of values around the mean. The basins obtained from the rebuilt DEM for selected pour points also showed a higher accuracy than the original ones extracted from SRTM 30.

This indicates that even though no altimetric data is usually available is OSM, it is a valuable source of data to improve the information provided by the GDEMs, which may be very useful for parts of the world where accurate local, regional, or national DEMs with higher accuracy are not available.

The use of OSM data, however, raises several problems, which include: (1) few waterways may be available in OSM for some parts of the world; (2) OSM data may have low quality in some regions, including lines that do not correspond to rivers or streams, which were either wrongly classified or digitized by the volunteers. Regarding the first point, it was shown that even if only the main rivers are available, this can already improve some parts of the DEM, resulting in a slight improvement of the data extracted from them. Regarding the existence of wrong data in OSM; these need to be filtered prior to the application of the proposed methodology. The extraction of clearly erroneous data and the correction of the orientation of the segments is extremely important to actually improve the results and not produce erroneous relief artefacts. After creating the rebuilt DEM the analysis of the slope map allows the identification of wrongly-oriented sections of the waterways due to the appearance of very steep slopes around the waterways.

Some additional aspects of the proposed methodology may be identified to raise some accuracy issues, namely the fact that SRTM 30 elevation data was assigned to points to create the rebuilt DEM, when, in fact, the elevation data corresponds to the convolution of terrain elevation over areas and of sensors' spread function, and also that sub-grid variations are not considered, which will have an impact, for example, over the horizontal position of the drainage networks, as they will be defined by cell centroids, and over slope, which is highly dependent on both the elevation and DEM resolution. However, even with all those limitations, the results showed that the rebuilt DEMs and the derived parameters have less bias when compared to a DEM generated by a national mapping agency, in this case study, Ordnance Survey, than the data extracted from the original SRTM 30. However, the magnitude and type of the improvements are dependent on the terrain characteristics, as the mentioned errors will have less influence over the results in flat regions than in regions with rougher relief, where, for example, slope and elevation will have larger variations over small distances.

Future work includes the use of additional features extracted from OSM, such as lakes and riverbanks. The application of the methodology should also be made to regions of the world where less OSM data are available, in order to show the usefulness of the proposed methodology to produce DEM and hydrologic data extracted from them with higher quality using only freely available data. In this article ArcGIS software (ESRI, Redlands, CA, USA) was used, but the process may also be implemented using open-source software.

Author Contributions: E.M. carried out the methodical work, analyses, assessment and discussion of the results and wrote the initial version of the manuscript. C.C.F. and J.L.M.P.L., provided guidance in the design of the research methodology, and the manuscript writing and revision.

Funding: This research was partly conducted under the project HIRT—"Modelling surface hydrologic processes based on infrared thermography at local and field scales" (PTDC/ECM-HID/4259/2014-POCI-01-0145-FEDER016668), funded by FCT, Portugal, and FEDER, COST Action CA16219 "HARMONIOUS—Harmonization of UAS techniques for agricultural and natural ecosystems monitoring", and the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT) under project grant UID/MULTI/00308/2013.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Moore, I.D.; Grayson, R.B.; Ladson, A.D. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrol. Process.* **1991**, *5*, 3–30. [[CrossRef](#)]
2. Lin, J.Y.; Cheng, C.T.; Chau, K.W. Using support vector machines for long-term discharge prediction. *Hydrol. Sci. J.* **2006**, *51*, 599–612. [[CrossRef](#)]
3. Kumar, R.; Samaniego, L.; Attinger, S. Implications of distributed hydrologic model parameterization on water fluxes at multiple scales and locations. *Water Resour. Res.* **2013**, *49*, 360–379. [[CrossRef](#)]
4. Wu, Y.; Li, T.; Sun, L.; Chen, J. Parallelization of a Hydrological Model using the message passing Interface. *Environ. Model. Softw.* **2013**, *43*, 124–132. [[CrossRef](#)]

5. Sanders, B.F. Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modelling. *Adv. Water Resour.* **2007**, *30*, 1831–1843. [[CrossRef](#)]
6. Kenward, T.; Lettenmaier, D.P.; Wood, E.F.; Fielding, E. Effects of Digital Elevation Model Accuracy on Hydrologic Predictions. *Remote Sens. Environ.* **2000**, *3*, 432–444. [[CrossRef](#)]
7. Adlerab, K.K.; Tianbc, R.F.; Hongd, Y.; Piercebe, H.F. Evaluation of a Satellite-Based Global Flood Monitoring System. *Int. J. Remote Sens.* **2010**, *31*, 3763–3782.
8. Manfreda, S.; McCabe, M.F.; Miller, P.E.; Lucas, R.; Pajuelo Madrigal, V.; Mallinis, G.; Ben Dor, E.; Helman, D.; Estes, L.; Ciraolo, G.; et al. On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring. *Remote Sens.* **2018**, *10*, 641. [[CrossRef](#)]
9. Anornu, G.; Kabo-Bah, A.; Kortatsi, B. Comparability studies of high and low resolution Digital Elevation Models for watershed delineation in the tropics: Case of Densu river Basin of Ghana. *Int. J. Coop. Stud.* **2012**, *1*, 9–14.
10. USGS. Elevation Dataset in Grid Format. Available online: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed on 10 September 2015).
11. USGS. Elevation Dataset in Grid Format. Available online: <https://dds.cr.usgs.gov/srtm/> (accessed on 10 September 2015).
12. Farr, T.G.; Kobrick, M. Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. *EOS* **2000**, *81*, 583–585. [[CrossRef](#)]
13. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. *Digital Photogrammetry—An Addendum to the Manual of Photogrammetry*; Greve, C., Ed.; Publication of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing: Bethesda, MD, USA, 1996.
14. Hanssen, R.F. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*; Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands, 2001.
15. Sefercik, U.G. Performance estimation of ASTER Global DEM depending upon the terrain inclination. *J. Indian Soc. Remote Sens.* **2012**, *40*, 565–576. [[CrossRef](#)]
16. Monteiro, E.V.; Fonte, C.C.; de Lima, J.L.M.P. Assessing positional accuracy of drainage networks extracted from ASTER, SRTM and OpenStreetMap. In Proceedings of the AGILE, Lisbon, Portugal, 9–12 June 2015.
17. OpenStreetMap. Feature “Waterway” for a Delimited Region of United Kingdom. Available online: http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map_Features (accessed on 8 September 2015).
18. Haklay, M.; Weber, P. OpenStreetMap: User-generated street maps. *IEEE Pervasive Comput.* **2008**, *7*, 12–18. [[CrossRef](#)]
19. Mooney, P. Quality assessment of the contributed land use in information from OpenStreetMap versus authoritative datasets. In *OpenStreetMap in GIScience*; Jokar Arsanjani, J., Zip, A., Mooney, P., Helbich, M., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2015; pp. 319–324.
20. Goodchild, M.F.; Li, L. Assuring the quality of volunteered geographic information. *Spat. Stat.* **2012**, *1*, 110–120. [[CrossRef](#)]
21. Ali, A.L.; Sirilertworakul, N.; Zipf, A.; Mobasheri, A. Guided classification system for conceptual overlapping classes in OpenStreetMap. *ISPRS Int. J. Geogr. Inf.* **2016**, *5*, 87. [[CrossRef](#)]
22. Mooney, P.; Minghini, M. A Review of OpenStreetMap Data. In *Mapping and the Citizen Sensor*; Foody, G., See, L., Fritz, S., Mooney, P., Olteanu-Raimond, A.-M., Fonte, C.C., Antoniou, V., Eds.; Ubiquity Press: London, UK, 2017; pp. 37–59.
23. Antoniou, V.; Skopeliti, A. The Impact of the Contribution Microenvironment on Data Quality: The Case of OSM. In *Mapping and the Citizen Sensor*; Foody, G., See, L., Fritz, S., Mooney, P., Olteanu-Raimond, A.-M., Fonte, C.C., Antoniou, V., Eds.; Ubiquity Press: London, UK, 2017; pp. 165–196.
24. Haklay, M. How good is the Volunteered Geographic Information? A Comparative Study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets. *Environ. Plan. B* **2010**, *37*, 682–703. [[CrossRef](#)]
25. Zielstra, D.; Zipf, A. A comparative study of proprietary geodata and volunteered Geographic Information for Germany. In Proceedings of the 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Guimarães, Portugal, 11–14 May 2010.
26. Ribeiro, A.; Fonte, C.C. A methodology for assessing OpenStreetMap degree of coverage for purposes of land cover mapping. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2015**, *II-3/W5*, 297–303.

27. Monteiro, E.S.V.; Fonte, C.C.; de Lima, J.L.M.P. Improving the positional accuracy of drainage networks extracted from Global Digital Elevation Models using OpenStreetMap data. *J. Hydrol. Hydromech.* **2017**, *66*. [[CrossRef](#)]
28. Ordnance Survey. Reference DEM of a delimited region of Great Britain. Available online: <http://www.ordnancesurvey.co.uk/> (accessed on 11 May 2017).
29. Mukul, M.; Srivastava, V.; Mukul, M. Analysis of the accuracy of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) height models using International Global Navigation Satellite System Service (IGS) Network. *J. Earth Syst. Sci.* **2015**, *124*, 1343–1357. [[CrossRef](#)]
30. Santillan, J.R.; Makinano-Santillan, M. Vertical accuracy assessment of 30-m resolution ALOS, ASTER, and SRTM Global DEMs over North-eastern Mindanao, Philippines. In Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXIII ISPRS Congress, Prague, Czech Republic, 12–19 July 2016; Volume XL1-B4.
31. Elkhachy, I. Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia. *Ain Shams Eng. J.* **2017**. [[CrossRef](#)]
32. Ordnance Survey. Rivers of a Delimited Region of Great Britain. Available online: <https://www.ordnancesurvey.co.uk/business-and-government/products/os-open-rivers.html> (accessed on 15 September 2015).
33. Hutchinson, M.F.; Xu, T.; Stein, J.A. Recent progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure. In Proceedings of the Geomorphometry, Redlands, CA, USA, 30 May 2011; pp. 19–22.
34. O’Callaghan, J.F.; Mark, D.M. The extraction of drainage networks from Digital Elevation Data. *Comput. Vis. Graph. Image Process.* **1984**, *28*, 323–344. [[CrossRef](#)]
35. Tarboton, D.G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resour. Res.* **1997**, *33*, 309–319. [[CrossRef](#)]
36. Martz, L.W.; Garbrech, J. The Treatment of Flat Areas and Depressions in Automated Drainage Analysis of Raster Digital Elevation Models. *Hydrol. Process.* **1998**, *12*, 843–855. [[CrossRef](#)]
37. Lin, W.T.; Chou, W.C.; Lin, C.Y.; Huang, P.H.; Tsai, J.S. WinBasin: Using Improved Algorithms and the GIS Technic for Automated Watershed Modelling Analysis from Digital Elevation Models. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* **2008**, *22*, 47–69. [[CrossRef](#)]
38. Azeredo Freitas, H.R.; Freitas, C.C.; Rosim, S. Drainage networks and watersheds delineation derived from TIN—Based digital elevation models. *Comput. Geosci.* **2016**, *92*, 21–37. [[CrossRef](#)]
39. Pelletier, J.D. A robust two-parameter method for the extraction of drainage networks from high-resolution digital elevation models (DEMs): Evaluation using synthetic and real world DEMs. *Water Res.* **2013**, *49*, 75–89. [[CrossRef](#)]



© 2018 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Improving the positional accuracy of drainage networks extracted from Global Digital Elevation Models using OpenStreetMap data

Elisabete S.V. Monteiro^{1*}, Cidália C. Fonte², João L.M.P. de Lima³

¹ UDI-Research Unit for Inland Development - Polytechnic Institute of Guarda / Institute for Systems Engineering and Computers at Coimbra, Av. Dr. Francisco Sá Carneiro, 50 6300-559, Guarda, Portugal. E-mail: emonteiro@ipg.pt

² Department of Mathematics University of Coimbra / Institute for Systems Engineering and Computers at Coimbra, Apartado 3008, EC Santa Cruz, 3001-501, Coimbra, Portugal. E-mail: cfonte@mat.uc.pt

³ Department of Civil Engineering of University of Coimbra / MARE - Marine Environmental Sciences Centre, Faculty of Sciences and Technology, University of Coimbra, Rua Luís Reis Santos, Pólo II University of Coimbra, 3030-788 Coimbra, Portugal. E-mail: plima@dec.uc.pt

* Corresponding author. E-mail: emonteiro@ipg.pt

Abstract: Drainage networks allow the extraction of topographic parameters that are useful for basins characterization and necessary for hydrologic modelling. One way to obtain drainage networks is by their extraction from Digital Elevation Models (DEMs). However, it is common that no freely available DEMs at regional or national level exist. One way to overcome this situation is to use the available free Global Digital Elevation Models (GDEMs). However, these datasets have relatively low spatial resolutions, 30 and 90 meters for ASTER and SRTM, respectively, and it has been shown that their accuracy is relatively low in several regions (e.g., Kääb, 2005; Mukul et al., 2017). In this study a methodology is presented to improve the positional accuracy of the drainage networks extracted from the GDEMs using crowdsourced data available in the collaborative project OpenStreetMap (OSM). In this approach only free and global datasets are used, enabling its application to any location of the world. The methodology uses elevation points derived from the GDEMs and the water lines extracted from the collaborative project OSM to generate new DEMs, from which new water lines are obtained. The methodology is applied to two study areas and the positional accuracy of the used data and the obtained results are assessed using reference data.

Keywords: Drainage networks; GDEMs; OpenStreetMap; Positional accuracy.

INTRODUCTION

Drainage networks are necessary for many hydrologic studies, namely the morphometric basin characterization and hydrologic modelling. They are represented accurately in topographic maps, but those may not be available freely in digital form. Another way to obtain them is by extraction from Digital Elevation Models (DEMs). These models can be generated using photogrammetric methods, laser scanning surveys, or radar data and interferometry and may be produced by national mapping agencies or companies. These products in most cases are not available for free use. On the other hand, there are Global Digital Elevation Models (GDEMs) freely accessible with no costs, which cover almost the entire surface of the Earth. However, the GDEMs have errors due to several factors, such as limited spatial resolution (Florinsky and Kuryakova, 2000; Lacroix et al., 2002), terrain characteristics (Fisher, 1998; Kyriakidis et al., 1999; Toutin, 2002), or due to the techniques used in data acquisition and raw data processing (e.g., Elkhachy, 2017). If used to generate drainage networks, the errors in the DEMs are propagated to the drainage networks and also to the parameters derived from them. Therefore, these networks are not as accurate as the ones represented in detailed topographic maps or derived from regional or national DEMs. However, if changes are made to the GDEMs that improve their accuracy, this may also cause an improvement of the topographic parameters and drainage networks extracted from them.

The improvement of DEMs accuracy may be achieved through the combination of DEMs constructed by data acquired with different techniques, namely stereo imaging and interferometry (e.g., Roth et al., 2002) or even, proposed more recent-

ly, using data acquired by unmanned aerial systems or terrestrial sensors (e.g., Petrasova et al., 2017). However, these data may be difficult and expensive to obtain. This raises the attention to the currently available Volunteered Geographic Information (Goodchild, 2007), which is obtained by volunteers that collect many types of features, such as, photographs, geotags, geo-names or routes of the Earth surface, acting like sensors. Among the large number of projects that allow citizens to create geographic information, OpenStreetMap (OSM) is one of the most well-known (Goodchild, 2007; Haklay, 2010; Neis and Zielstra, 2014). This initiative allows citizens to create vector data representing different types of geographic features, such as buildings, forests, roads or rivers. Even though large amounts of data related to water bodies and water lines are available, few references are found about the use of these data for the improvement of the GDEMs. Schellekens et al. (2014) developed a study that allows the extraction of information from OSM for hydrological and hydraulic models. Using OSM data, the authors created gridded maps with fraction of paved and unpaved area and of open water in each cell. One of the features used corresponds to the “rivers” represented in OSM, also used in the present study. Another study developed by Monteiro et al. (2015) assessed the positional accuracy of the drainage networks derived from the SRTM and ASTER DEMs and compared them with the positional accuracy of drainage networks extracted from OSM. The results showed that the OSM watercourses had a higher positional accuracy than the drainage networks obtained from the ASTER and the SRTM GDEMs. The fact that the drainage networks available in OSM presented better positional accuracy than the ones derived from the GDEMs, even though they may not be complete, motivated

the current study, which aims to analyse whether the inclusion of OSM watercourses and elevation points extracted from the GDEMs enables the creation of improved DEMs from which drainage networks with higher positional accuracy can be extracted. The developed process is semi-automatic and uses only free geographic data, enabling the identification of drainage networks in regions where high accurate networks are not available or are not freely accessible.

The proposed methodology requires: 1) the extraction of water lines from OSM that represent natural drainage networks; 2) the extraction of elevation points from the GDEMs; 3) generating a new DEM using an interpolation method that creates hydrologically correct DEMs; and 4) extract the drainage networks from the resulting DEMs. To assess if the methodology improved the accuracy of the obtained drainage networks, the study areas used to test the methodology were chosen in regions where authoritative reference data was available. This enabled the assessment of the positional accuracy of the OSM water lines, and of the drainage networks extracted from the original and the transformed DEMs.

This paper is organized in six sections. In the first one an introduction of the theme and the framing is presented. The datasets used in the study are explained in section "DATASETS". Section "METHODOLOGY" is dedicated to the explanation of the proposed methodology. The study areas are presented and characterized in Section "STUDY AREAS". The results are shown and analysed in section "RESULTS" and finally, in section "DISCUSSION AND CONCLUSIONS", some discussion and conclusions are presented, referring the advantages and limitations of this methodology and future work.

DATASETS

Three different datasets were used in this study: 1) Two GDEMs, namely ASTER and SRTM; 2) data extracted from OSM corresponding to waterways; and 3) the rivers of Great Britain available in Ordnance Survey, which were used as reference data.

The GDEMs

The GDEMs ASTER and SRTM are free elevation datasets available in grid format, where the attribute of each cell is the elevation, with spatial resolutions of 30 and 90 metres, respectively. The grid format is appropriate to implement hydrologic tools (e.g., Zhang and Montgomery, 1994), hence their frequent use in hydrologic applications, such as in the morphometric characterization of basins or flood simulations (Arun et al., 2005; Freeman, 1991; Vieux, 1993).

These datasets are georeferenced with the World Geodetic Coordinate System 1984 (WGS-84) and are generated from satellite images. They have some advantages over the use of local or regional DEMs as they cover large regions of the Earth's surface and are accessible at no cost for the users. The ASTER GDEM is acquired by photogrammetric methods (Greve, 1996), while the SRTM GDEM is collected using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technology (Hanssen, 2001). These datasets have some limitations, such as their resolution, which restricts their use in applications where high accuracy is required, as their errors will propagate to the GDEM-derived attributes/products (e.g., Kenward et al., 2000; Rodriguez et al., 2006). Thus, the accuracy assessment of the GDEMs is an issue well covered in literature. Several studies have been made to assess the accuracy of the GDEMs in different regions of the world (e.g., Cook et al., 2012; Eckert et al.,

2005; Mukherjee et al., 2013; Varga and Bašić, 2013; Weydahl et al., 2007; Yadav and Indu, 2016) and also the accuracy of the topographic parameters extracted from them (Ebenezer, 2015; Lin et al., 2005; Liu et al., 2015; Monteiro et al., 2015; Mukherjee et al., 2013; O'Callaghan and Mark, 1984; Tarboton et al., 1991). These studies enable to conclude that the vertical accuracy of DEMs is affected by morphologic terrain characteristics (Holmes et al., 2000), by the land use and land cover, but also by the techniques used for data acquisition and processing. The radar technology, used in SRTM, has some advantages over optical techniques (Massonet and Feigl, 1998), including the fact that it uses an active system that includes the self-transmitting and receiving electromagnetic waves. Therefore, the images acquisition is independent of natural illumination conditions (Forkuor and Maathuis, 2012). Another advantage is that the SRTM images are not affected by clouds. However, the SRTM, as the ASTER, is also not able to penetrate the vegetation (Das et al., 2016; Sefercik, 2012).

OSM data

OSM is a collaborative project that creates and distributes free geographic data of and for the world. This project is designed to create and provide free spatial datasets based on volunteered efforts (e.g., Al-Bakri and Fairbairn, 2010). The OSM database is a collection of vector objects that consist of point, line and polygon features (Fonte et al., 2016). The OSM community is composed of over 3,000,000 registered users (http://www.openstreetmap.org/stats/data_stats.html), from all around the world, collecting and updating geographic information, which is immediately visible to all other users. OSM data are structured by tags (formed by a "key" and a "value") that represent objects on Earth, including roads, rivers, buildings, etc. A list of OSM tags is available in the OSM Wiki webpage at http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map_Features. However, volunteers may choose to use other tags.

The coverage and consistency of OSM data varies widely among different geographic areas (Bossard et al., 2000; Heymann, 1994), with urban zones having usually the highest coverage (Neis and Zipf, 2012). The quality assessment can be performed by comparing OSM data with authoritative geographic databases with higher accuracy, used as reference data. Several researchers have analysed the quality of OSM data using this methodology (e.g., Haklay, 2010; Zielstra and Zipf, 2010). Other approaches have however also been used, such as shape similarity with existing data as an indicator of quality (e.g., Mooney et al., 2010). In general terms, what is evidenced in the literature on the quality of OSM data is that the quality is quite heterogeneous across the globe and in some areas it even exceeds the quality of proprietary data (Brovelli et al., 2016). In the present study, the quality of OSM data is assessed by comparing the water lines position with the corresponding position in the Ordnance Survey data.

Reference data

The reference data used was downloaded from the Ordnance Survey web page (www.ordnancesurvey.co.uk), which is the British National Mapping Agency. This institution has some cartographic products available for free download in their web page, such as roads, names of places and rivers. The data used in this work was the drainage network of Great Britain, which is formed by 144,000 km of watercourses, including freshwater rivers, tidal estuaries and canals. These data are available in GML 3.2 and ESRI Shapefile formats, at scales ranging from

1/15,000 to 1/30,000, and are in the British National Grid Projected Reference System. The attributes of these data are: watercourse name; watercourse type and direction of water flow. This drainage network was used in this study as reference to assess the positional accuracy of OSM watercourses and the positional accuracy of the drainage networks extracted from the original and rebuilt DEMs.

METHODOLOGY

The methodology used in the work presented in this article was applied considering the following steps: 1) The extraction of drainage networks from the original GDEMs and the analysis of their positional accuracy; 2) The extraction from OSM of the waterways that correspond to natural drainage networks and the assessment of their positional accuracy; 3) The creation of new DEMs applying an interpolation method that uses data extracted from the original GDEMs and OSM watercourses; and 4) Extraction of new drainage networks from the rebuilt DEMs and the assessment of their positional accuracy. The methodology flowchart is shown in Figure 1.

Drainage networks extraction from the DEMs

For the extraction of the drainage networks the popular D8 flow algorithm was applied (e.g., Jenson and Domingue, 1988; Lin et al., 2008; Mark, 1984; Martz and Garbrecht, 1998; O’Callaghan and Mark, 1984; Tarboton, 1997). This method enables the extraction of drainage networks from grid elevation data. To correct the DEMs of possible artificial depressions (sinks) and peaks the “Fill” tool available in ArcGIS software was used (Planchon and Darboux, 2002; Tarboton et al., 1991). The matrix of flow direction was generated, where each cell gives the direction of water flow. Then, the flow accumulation matrix was computed, where the value of each pixel is the total number of pixels that drains to itself. To generate the watercourses a critical level (CL) needs to be defined. This threshold limit enables to establish if a pixel belongs or not to the drainage network. The pixels that have values of flow accumulation lower than the CL value do not belong to the network while the ones with higher values form the stream network. Therefore, lower threshold values generate more branched networks, as more pixels will be included in the network.

To choose the CL appropriate values for the drainage networks extracted from the ASTER and SRTM DEMs two factors were considered. One was the spatial resolution of the DEMs and the other was to obtain drainage networks with a

total length similar to the total length of the reference drainage network. To this aim, firstly the appropriate value for the SRTM DEM was selected having into consideration the total length of the reference network. Then, taking into account that one pixel of SRTM DEM corresponds to nine pixels of the ASTER DEM, the threshold value chosen for ASTER was nine times larger than that defined for SRTM. For the rebuilt DEMs derived from ASTER the threshold values were the same as the ones used for the original ASTER, and the same was done for the rebuilt DEMs derived from SRTM.

Extraction of waterways from OSM

To extract the waterways from OSM, an analysis of the tags available in OSM was performed. The tag with key “waterway” is used to describe different types of waterways, such as rivers, streams, drains and canals. As for this study only waterways corresponding to natural watercourses should be used, only the lines corresponding to the values “river” and “stream” were considered.

Creation of the rebuilt DEMs

The reconstruction of the DEMs was performed applying the ANNUDEM interpolation method that uses altimetry (elevation points), and lines (streams). This interpolation method, developed by Hutchinson et al. (2011), generates a surface hydrologically correct and is implemented in the ArcGIS tool “Topo to raster”. The method was applied using the elevation points extracted from the GDEMs, which were obtained from the original GDEMs by converting them to the vector data model, extracting an elevation point corresponding to the centre of each raster cell. The linear features used corresponding to the streams were the ones extracted from OSM. The boundary of the study areas was also used to limit the obtained DEMs.

Assessment of the positional accuracy of the drainage networks

The horizontal position of the drainage networks extracted from the original GDEMs, the ones extracted from the rebuilt DEMs, and the ones extracted from OSM was compared to the horizontal position of the reference drainage network.

To calculate the horizontal distance between each set of the lines and the reference lines, a set of steps was performed. First, it was necessary to determine which lines of the drainage net-

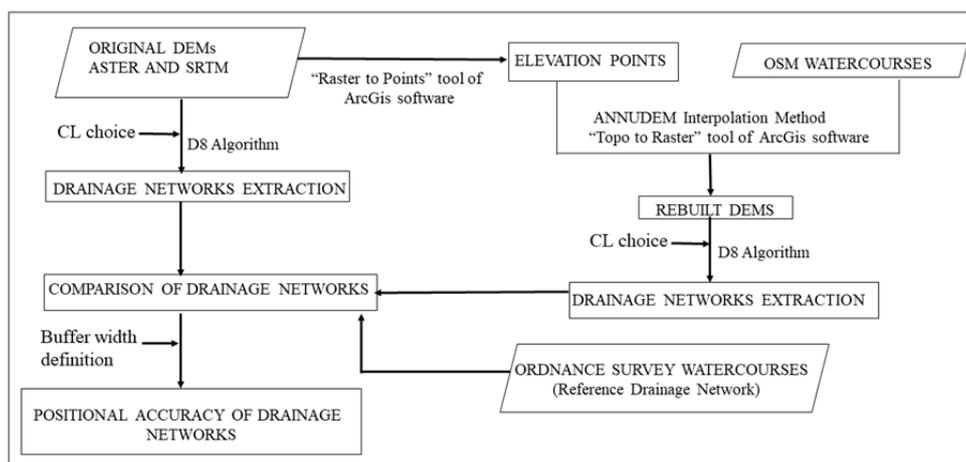


Fig. 1. Methodology flowchart.

work under analysis correspond to the reference lines. For this, a buffer was generated around each reference line, in order to identify the set of lines under study that are inside this buffer and that may be considered as corresponding waterways. The selection of a suitable buffer width is dependent on the dimension of the area and the relative positioning of the corresponding lines. Once this step is completed, to compute the distance between the identified corresponding lines two steps were used: 1) the tool “Feature Vertices to Points” of ArcGIS software was used to transform the selected lines into points (for example, the middle points or end-points of line segments forming the drainage network may be used); 2) the ArcGIS tool “Near” was used to compute the horizontal distance between the points of the waterway under analysis and the reference line. This tool computes the shortest distance between a point and a line.

This computation was only done for the points that are inside the buffers created around the reference drainage network. Then, for each drainage network, the mean M and the standard deviation σ of the obtained distances D_i (Figure 2) were calculated using equations (1) and (2), where n is the number of points considered for the waterway under analysis. The total length of the drainage networks L was also computed and compared.

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} \tag{1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - M)^2}{n}} \tag{2}$$

STUDY AREAS

The methodology was applied to two regions located in distinct parts of the United Kingdom. Study Area 1 (SA1) corresponds to a drainage basin (in Scotland) with an area of 42 km² generated using the tool “Basin” of ArcGIS software applied to both ASTER and SRTM GDEMs, which produced slightly

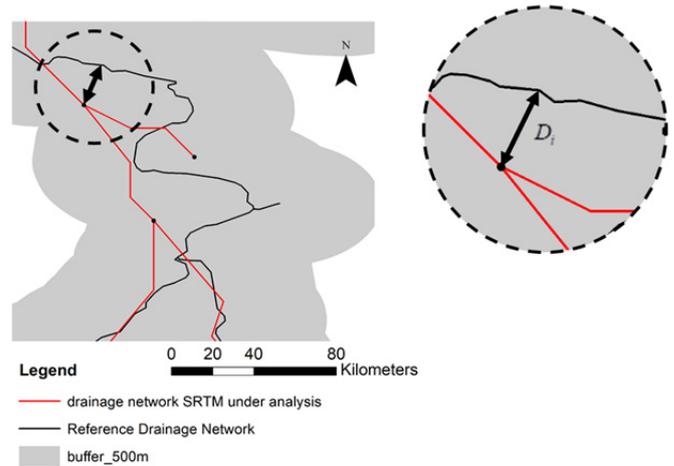


Fig. 2. Distance from a point of the drainage network derived from the DEM to the reference drainage network as computed with the tool “Near” of ArcGIS software.

different basins for the same region due to the differences in the DEMs. Study Area 2 (SA2) corresponds to a 13,899 km² rectangular area located in England (Figure 3). The SA1 region has a maximum altitude of 683 m and a minimum of 16 m, while the maximum and minimum altitude of SA2 is 212 m and 2 m, respectively. Both areas have different characteristics in terms of relief and dimension.

The location of the study areas and the ASTER and SRTM DEMs for each are shown in Figure 3.

The reference data (the drainage network of Ordnance Survey) obtained for each study area, are presented in Figure 4.

The OSM watercourses were downloaded in the shapefile format from Geofabrik in September 8th, 2015. These datasets are presented in Figure 5a) and 5b), respectively, for study areas SA1 and SA2. In terms of connectivity, it can be seen that the network obtained for SA2 shows several disconnected watercourses, while all watercourses are totally connected in SA1.

For the extraction of the drainage networks from the original and the rebuilt DEMs the appropriate critical levels had to be

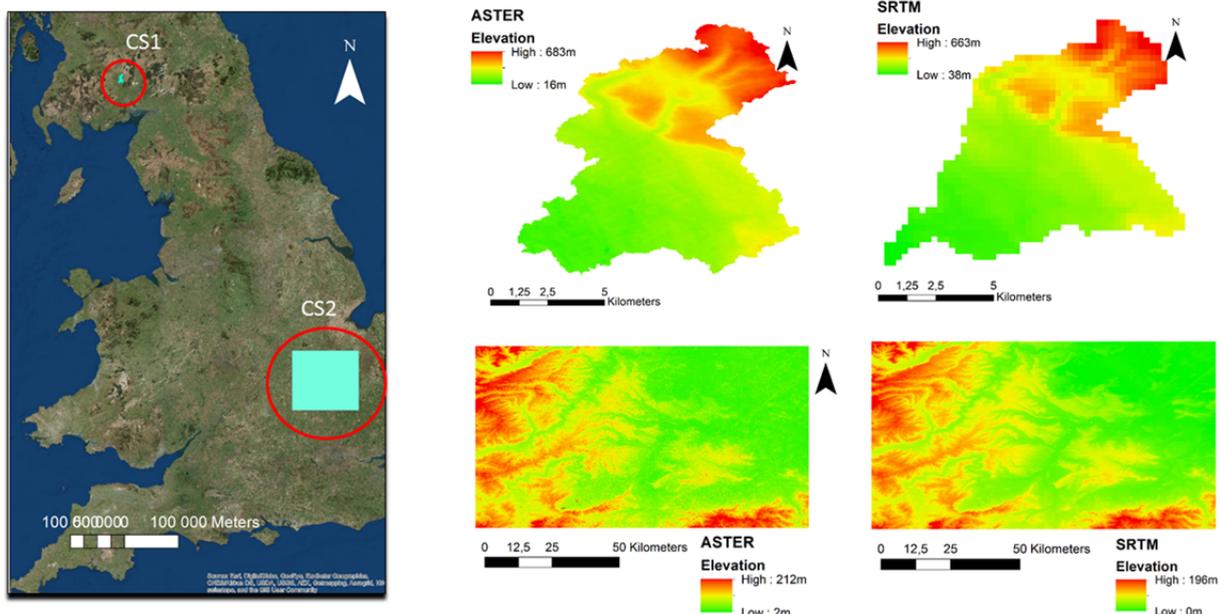


Fig. 3. Location and DEMs of both study areas, SA1 in North and SA2 in South of United Kingdom.

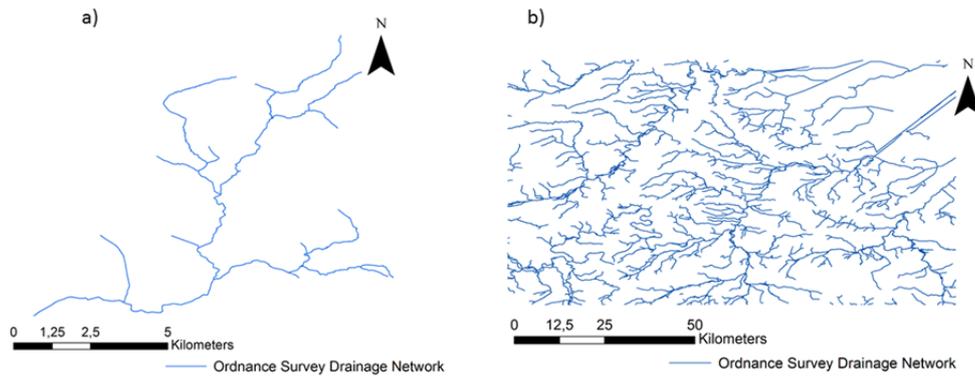


Fig. 4. Drainage networks of the Ordnance Survey for study area 1 (SA1) (a) and for study area 2 (SA2) (b).

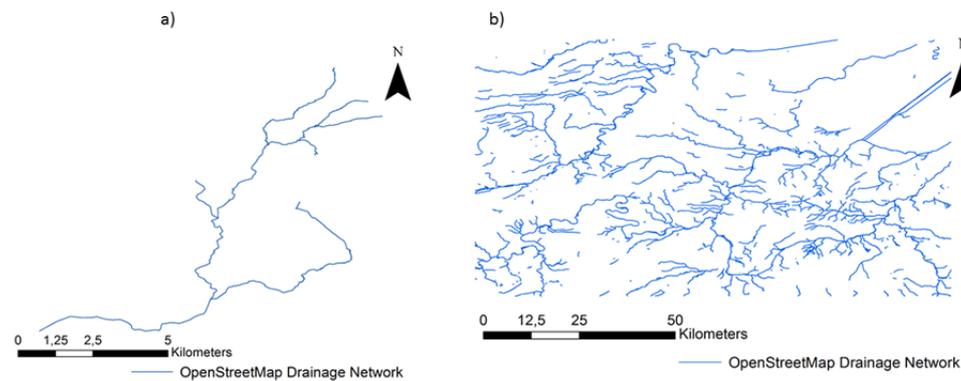


Fig. 5. OSM watercourses available for both study areas - SA1 (a) and SA2 (b).

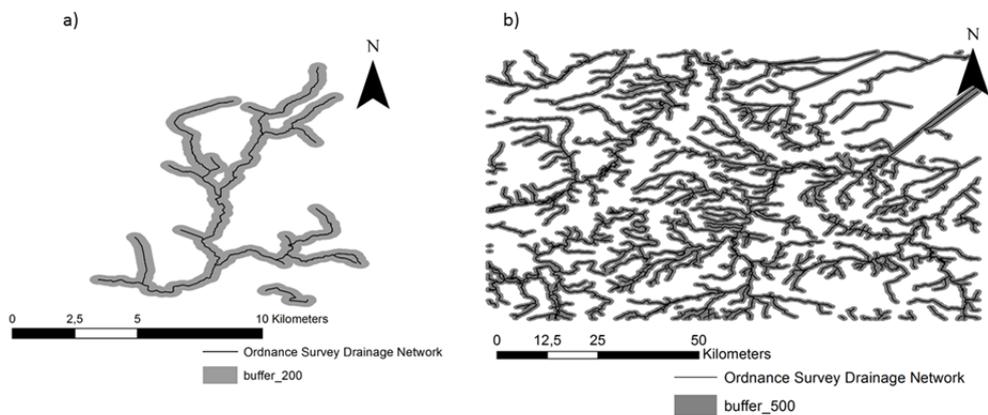


Fig. 6. a) A 200 m buffer around the reference drainage network in SA1; b) A 500 m buffer around the reference drainage network in SA2.

determined. Some tests were made to determine the appropriate *CL* for each SA. For SA1 the critical levels of 14 and 126 pixels were used, respectively, for SRTM and ASTER DEMs, derived as explained in section “Drainage networks extraction from the DEMs”. For SA2 the values used were 445 and 4,000 pixels, respectively for the SRTM and ASTER DEMs. The horizontal distances between each drainage network and the reference drainage network was calculated for the parts of the network inside the buffer created as describe in section “Assessment of the positional accuracy of the drainage networks”. The appropriate width of the buffers to consider was determined by visually analysis. This resulted in the use of 200 and 500 m for SA1 and SA2, respectively (Figure 6).

To compute the positional accuracy of the different drainage networks all data georeferenced in the World Geodetic System 1984 (WGS-84) was projected to the same projected Reference System (The British National Grid Reference System).

RESULTS

The drainage networks derived from the original and rebuilt DEMs ASTER and SRTM in both study areas are shown in Figure 7.

A visual analysis shows that for SA1 (Figure 7 a) and b)) the drainage network derived from the rebuilt SRTM DEM is more branched than the drainage network derived from the original DEM. The opposite situation occurs for the networks extracted from the ASTER models (original and rebuilt). Some changes in the horizontal position of the drainage network can also be seen. For the study area SA2 (Figure 7 c) and d)), the drainage network derived from the rebuilt ASTER DEM presents a higher similarity with the network extracted from the original ASTER DEM, namely in zones of lower altitude in the Northeast region of this study area.

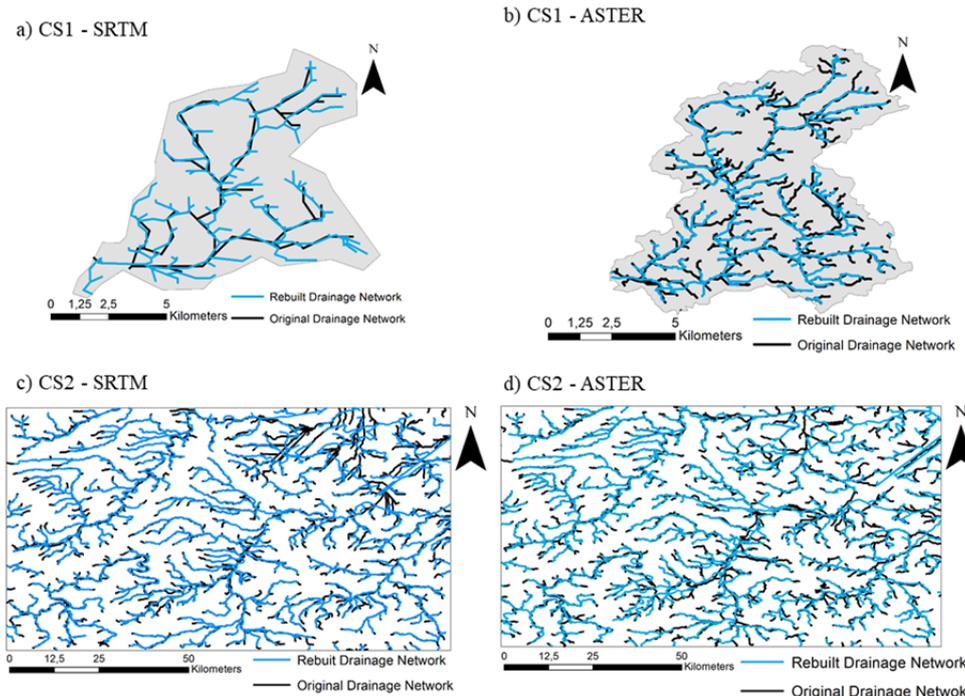


Fig. 7. Drainage networks extracted from the original and rebuilt SRTM DEMs, using the same critical levels a) for SA1 and c) for SA2; and from the original and rebuilt ASTER DEMs b) for SA1 and d) for SA2.

Some topographic parameters derived from the drainage networks were analysed and discussed. The parameters the order of the basin (O), the orders included in basin (O_i), the number of segments of i order (Ns_i) and the segments length of i order (L_i) and are shown in Table 1 for SA1 for the original and the rebuilt GDEMs. Table 2 show the results for the same parameters for SA2 for the original and rebuilt GDEMs.

In SA1 study area the order of the basin derived from SRTM DEM increased with the DEMs transformation presenting the values of $O = 3$ and $O = 5$, for the basins derived from original and rebuilt DEM, respectively. Also the number of segments and the segments length of each order show an increasing with the values of 34 and 140 numbers of segments for original and rebuilt SRTM DEM, respectively. For the basin derived from ASTER DEM the order maintains the value ($O = 5$), while the number of segments shows a decreasing from 330 to 140, as well as the segments length. In the SA2 the order of the basin varies with the same tendency of the SA1, for both DEMs with $O = 4$ and $O = 5$, for basins derived from original and rebuilt SRTM DEM, respectively. The basins derived from original and rebuilt DEM present the same order, $O = 5$. The number of segments decreased for basins extracted from both DEMs with the values of 1,150 and 772 for SRTM and the values of 1,281 and 776 for ASTER. The segments length also shows a decreasing for both DEMs. The analysis of OSM drainage networks positional accuracy was performed for each study area to assess whether OSM watercourses showed better positional accuracy than the drainage networks derived from the original GDEMs, as this assumption should be fulfilled to apply this methodology. Table 3 shows the mean (M) and standard deviation (σ) of the horizontal distances between the points of OSM watercourses and the reference drainage network. This table also shows the mean (M) and the standard deviation (σ) of the horizontal distances between the reference drainage network and the points of the drainage network obtained from the original ASTER and SRTM DEMs for both study areas.

Table 1. Basin order (O), number and length of segments for stream order O_i of the hydrographic network extracted from the original and rebuilt GDEMs for study area 1 (SA1).

SA1			
GDEMs	ORIGINAL		
	O_i	Number of segments	Length (km)
SRTM ($O=3$)	1	18	21.2
	2	10	11.4
	3	6	5.9
Total=		34	38.5
ASTER ($O=5$)	1	170	62.5
	2	68	24.4
	3	51	17.3
	4	35	11.9
	5	6	1.7
Total =		330	117.8

SA1			
GDEMs	REBUILT		
	O_i	Number of segments	Length (km)
SRTM ($O=5$)	1	73	30.6
	2	34	18.9
	3	16	10.3
	4	9	4.5
	5	8	5.4
Total =		140	69.7
ASTER ($O=5$)	1	111	34.9
	2	44	25.3
	3	34	9.2
	4	12	5.0
	5	10	1.7
Total =		211	76.1

It can be observed that the positional accuracy obtained for the OSM watercourses in both study areas is better than the positional accuracy obtained for the drainage networks derived from the original GDEMs, and therefore the above mentioned requirement is fulfilled.

Table 2. Basin order (O), number and length of segments for stream order O_i of the hydrographic network extracted from the original and rebuilt GDEMs for study area 2 (SA2).

SA2			
GDEMs	ORIGINAL		
	O_i	Number of segments	Length (km)
SRTM ($O=4$)	1	603	1,436.7
	2	299	665.5
	3	173	330.5
	4	75	149.0
Total =		1,150	2,581.7
ASTER ($O=5$)	1	637	1,484.4
	2	316	721.7
	3	163	312.3
	4	59	204.4
Total =		1,218	2,627.5

SA2			
GDEMs	REBUILT		
	O_i	Number of segments	Length (km)
SRTM ($O=5$)	1	401	1,117.1
	2	202	523.1
	3	73	213.2
	4	63	215.4
Total =		772	2,138.3
ASTER ($O=5$)	1	407	1,206.7
	2	213	605.3
	3	62	157.4
	4	64	214.8
Total =		776	2,265.1

Table 4 shows the mean and the standard deviation of the horizontal distances between the reference drainage network and the points of the drainage networks derived from the original (M_O and σ_O) and the rebuilt DEMs (M_R and σ_R), for both study areas. The differences between the obtained these values for the networks obtained from the original are rebuilt DEMs are also shown.

The results show that the mean and the standard deviation of the distance between the DEM extracted drainage networks and the reference lines decreases with the transformation in both study areas and for both DEMs, which corresponds to an im-

Table 4. Mean and standard deviation of the horizontal distances between the reference drainage network and the drainage networks obtained from the original and the rebuilt DEMs for study areas SA1 and SA2, as well as the differences between the values obtained for the original and rebuilt DEMs.

Study area	DEM	CL (pixels)	Buffer width (m)	Original GDEM		Rebuilt GDEM		Differences	
				M_O (m)	σ_O (m)	M_R (m)	σ_R (m)	$M_O - M_R$ (m)	$\sigma_O - \sigma_R$ (m)
SA1	SRTM	14	200	45.4	47.0	27.2	42.5	18.2	4.5
	ASTER	126	200	38.7	55.4	27.8	49.4	10.9	6.0
SA2	SRTM	445	500	92.8	116.6	54.4	89.5	38.4	27.1
	ASTER	4,000	500	104.9	127.8	56.0	102.0	48.9	25.8

Table 5. Total length of the Ordnance Survey drainage network (L_{OS}), of the drainage network extracted from the original DEMs (L_O) and of the one extracted from the rebuilt GDEMs (L_R), as well as the differences between the obtained values.

Study area	L_{OS} (km)	DEM used	CL (pixels)	L_O (km)	L_R (km)	$L_O - L_R$ (km)	$L_{OS} - L_O$ (km)	$L_{OS} - L_R$ (km)
SA1	38.8	SRTM	14	38.5	69.7	-31.2	0.3	-30.9
		ASTER	126	117.8	76.1	41.7	-79.0	-37.3
SA2	2,733.8	SRTM	445	2,581.7	2,138.3	443.4	152.1	595.5
		ASTER	4,000	2,722.8	2,261.5	461.3	11.0	472.3

Table 3. Mean and standard deviation of the horizontal distances between the reference drainage network (from Ordnance Survey) and the OSM watercourses, as well as the drainage networks obtained from the original DEMs, for study areas SA1 and SA2.

Study area	Data set	CL (pixels)	Buffer width (m)	Original GDEM	
				M (m)	σ (m)
SA1	OSM	---	200	10.5	28.0
	SRTM	14	200	45.4	47.0
	ASTER	126	200	38.7	55.4
SA2	OSM	---	500	20.7	57.3
	SRTM	445	500	92.8	116.6
	ASTER	4,000	500	104.9	127.8

provement of their positional accuracy. The results show a larger improvement in the mean distance for SRTM in SA1 (18.2 m for SRTM and 10.9 m for ASTER) and for ASTER in SA2 (48.9 m for ASTER and 38.4 m for SRTM). However, the opposite is observed for standard deviation, even though the values are very similar, in both cases with differences smaller than 1.5 m.

The topographic parameter total length of the drainage network (L) was analysed. Table 5 shows, for both study areas, the results obtained for the total length of the Ordnance Survey drainage network (reference data), the total length of the drainage networks obtained from the original and rebuilt DEMs and the differences between the obtained values.

It can be seen that using the same critical levels for the rebuilt DEMs that were used for the original models, the differences of total length obtained in SA1 between the reference drainage network (L_{OS}) and the drainage networks derived from the rebuilt DEMs (L_R) is -30.9 and -37.3 km for ASTER and SRTM, respectively. This shows that the drainage network obtained with the rebuilt DEMs is larger than the one available in Ordnance Survey and that this difference increased for SRTM, in relation to the difference between the reference drainage network and the drainage networks derived from the original DEMs ($L_{OS} - L_O$ is 0.3 km). However, for ASTER this difference decreased for the rebuilt DEM ($L_{OS} - L_O$ is -79 km, while $L_{OS} - L_R$ is -37.3 km). In SA2 the differences between the reference drainage network (L_{OS}) and the drainage networks derived from the rebuilt DEMs (L_R) are 595.5 and 472.3 km, respectively for the SRTM and ASTER DEMs. The difference between the drainage network obtained from the original and the rebuilt DEMs was also in both cases of the order of 400 km,

and in both cases the length of the drainage network decreased when obtained from the rebuilt DEM.

These differences were obtained considering the same *CL* that was used for the original DEMs. However, the choice of the *CL* to use in for each DEM may also be defined for each DEM, and therefore the length of the drainage network will change with this value and can be adjusted according to the needs. To illustrate this, different critical values were used for each DEM, so that drainage networks with similar characteristics could be obtained. This was done first taking into account the same factors and procedures that were used for original DEMs, that is, choose the *CL* that produces drainage networks derived from SRTM with total length next to the total length of reference drainage network. After that, use a *CL* nine times greater than the one used for SRTM DEM to extract the drainage networks from ASTER. Also independent values were used for ASTER, to analyse the differences. The *CL* used and the obtained results are shown in Table 6 and the obtained drainage networks can be seen in Figure 8, for both study areas.

In SA1, a *CL* of 55 pixels was used for SRTM, generating a drainage network with a total length of 39.0 km, presenting a difference of length of only -0.2 km in relation to the reference network. Using a *CL* nine times greater for ASTER model (*CL* = 495 pixels) the drainage network extracted have a total length of 31.3 km, presenting a difference of 7.5 km in relation to the reference network. Choosing an independent value for the DEM rebuilt from ASTER of 250 pixels, a drainage network with a length of 38.9 km is obtained, corresponding to a difference of -0.1 km in relation to the reference one. For SA2 the *CL* of 255 pixels used for the DEM rebuilt from SRTM produced a drainage network with a total length of 2,752.4 km, presenting a difference of -18.6 km in relation to the reference drainage network. Using a *CL* nine times greater for DEM rebuilt from ASTER (2,295 pixels), a drainage network with a total length of 2,925.7 km is obtained, which corresponds to a difference of -191.9 km. If an independent *CL* of 2,650 pixels was used, produce a drainage network with a total length of 2,732.1 km is obtained, which corresponds to a difference of

Table 6. Total length of the Ordnance Survey drainage network (L_{OS}) and of the drainage networks extracted from the rebuilt DEMs (L_R) considering *CL* that provide drainage networks with characteristics similar to the reference drainage network, as well as the differences between the obtained values.

Study area	L_{OS} (km)	DEM used	<i>CL</i> (pixels)	L_R (km)	$L_{OS} - L_R$ (km)
SA1	38.8	SRTM	55	39.0	-0.2
		ASTER	495	31.3	7.5
		ASTER	250	38.9	-0.1
SA2	2,733.8	SRTM	255	2,752.4	-18.6
		ASTER	2,295	2,925.7	-191.9
		ASTER	2,650	2,732.1	1.7

1.7 km. The drainage networks shown in Figure 8 show that when *CL* are chosen that provide networks with similar length the networks obtained from the rebuilt DEMs are in fact very similar to the reference drainage networks.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The aim of the current work was to determine whether the watercourses available in OSM data could contribute to the creation of DEMs, generated using the ASTER and SRTM GDEMs, which enable the extraction of drainage networks with higher positional accuracy. The methodology uses only free geographic dataset and shows that the combination of OSM watercourses with ASTER and SRTM GDEMs generates DEMs that allow the extraction of more accurate drainage networks.

The study was applied to two areas located in the United Kingdom with different characteristics in terms of relief, dimension, coverage and completeness of OSM watercourses, which are some factors that may influence the accuracy of drainage networks. Authoritative data (from Ordnance Survey) was used as reference to assess the positional accuracy of the data used and results obtained.

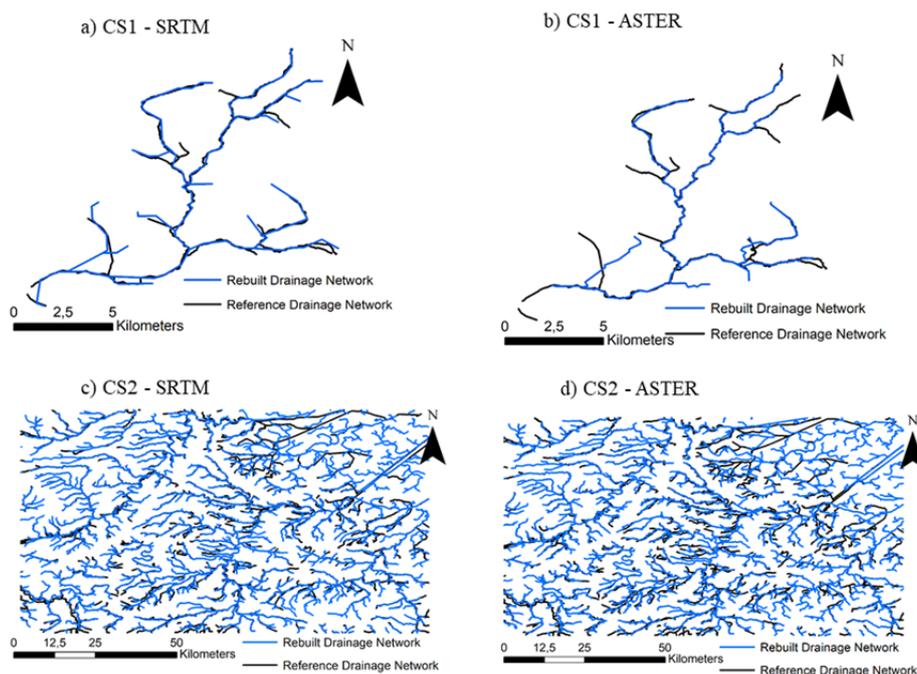


Fig. 8. Reference drainage networks and drainage networks extracted from the rebuilt DEMs, choosing the critical levels that approximate the length of the network under analysis to the reference network, for SRTM DEMs a) for SA1 and c) for SA2; and the rebuilt ASTER DEMs b) for SA1 and d) for SA2.

The results show that the positional accuracy of the drainage networks improved for both study areas and also for the data extracted from the SRTM and ASTER GDEMs, which proves the usefulness of the methodology. It can also be stressed that the positional accuracy improvement for both study areas is always higher for the data extracted from the SRTM DEM. That is, the data derived from this DEM takes more advantage of the transformation than those extracted from the ASTER DEM. The similarity of the obtained drainage networks with the reference network depends upon the *CL* parameter considered when extracting them from the DEMs, and therefore this value should be chosen independently for each DEM. This parameter also influences the topographic parameters derived from the drainage networks, such as the basin order as well as the number of segments and the segments length obtained for each stream order.

This methodology may be of particular interest for regions where there are no detailed and accurate topographic maps available, as the data sets used are free and available worldwide. It can also be useful when large areas are to be considered, covering more than one country, which would require merging detailed data from different institutions.

A fundamental aspect related to the application of this methodology is the positional accuracy of the OSM waterways. If mistakes are present in OSM data this will have negative impacts in the results. Therefore, the development of methods that enable the identification of erroneous data are particularly useful. Another limitation of the procedure is the coverage and completeness of OSM data, although the trend is that the volume of OSM data increases with an impressed speed (Haklay, 2010), and the waterways are one of the features that start to be inserted by the volunteers. Even if the completeness of OSM data in relation to the waterways is relatively low, the available waterways will likely still be useful, however this needs to be further investigated.

Future work will include the analysis of the impact of this transformation not only on the positional accuracy of the drainage network but also on other types of parameters extracted from the drainage network, such as bifurcation ratio and drainage density (Strahler, 1964), as well as the analysis of potential influence of the region's relief. Further investigations may analyse the variation of positional accuracy of those drainage networks in sub-areas of the global study area. An analysis of the accuracy of the rebuilt DEMs will be performed to ascertain whether they are also more accurate than the original DEMs.

Acknowledgements. This work has been supported by the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT) under project grant UID/MULTI/00308 / 2013.

REFERENCES

- Al-Bakri, M., Fairbairn, D., 2010. Assessing the accuracy of 'Crowdsourced' data and its integration with official spatial data sets. In: Proc. Symp. Accuracy 2010. Leicester, UK, pp. 317–320.
- Arun, P.S., Jana, R., Nathawat, M.S., 2005. A rule base physiographic characterization of drought prone watershed applying remote sensing and GIS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 32, 189–201.
- Bossard, M., Feranec, J. and Otahel, J., 2000. CORINE Land Cover Technical Guide: Addendum 2000. European Environment Agency, Copenhagen.
- Brovelli, M.A., Minghini, M., Molinari, E., Zamboni, G., 2016. Positional accuracy assessment of the OpenStreetMap buildings layer through automatic homologous pairs detection: The methodology and a case study. *The International Archives of the Photogrammetry*. In: Proc. XXIII ISPRS Congress Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLI-B2, , 12–19 July, Prague, Czech Republic.
- Cook, A.J., Murray, T., Luckman, A., Vaughan, D.G., Barrand, N.E., 2012. A new 100-m digital elevation model of the Antarctic Peninsula derived from ASTER Global DEM: Methods and accuracy assessment. *Earth System Science Data*, 4, 129–142.
- Das, S., Patel, P.P., Sengupta, S., 2016. Evaluation of Different Digital Elevation Models for Analysing Drainage Morphometric Parameters in a Mountainous Terrain: A Case Study of the Supin-Upper Tons Basin, Indian Himalayas. *Springer Plus*, 38 p. DOI: 10.1186/s40064-016-3207-0.
- Ebenezer, S.S., 2015. GIS Based Automated Drainage Extraction for the Analysis of Basin Morphometry in Vaniyar Sub-Basin, South India. *International Association of Scientific Innovation and Research (IASIR)*, pp. 31–34.
- Eckert, S., Kellenberger, T., Itten, K., 2005. Accuracy assessment of automatically derived Digital Elevation Models from ASTER data in mountainous terrain. *International Journal of Remote Sensing*, 9, 1943–1957.
- Elkhrachy, I., 2017. Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran City, Saudi Arabia. *Ain Shams Eng J.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2017.01.007>.
- Fisher, P., 1998. Improved modelling of elevation error with geostatistics. *GeoInformatica*, 2, 215–233.
- Florinsky, I.V., Kuryakova, G.A., 2000. Determination of grid size for digital terrain modelling in landscape investigations – Exemplified by soil moisture distribution at a micro-scale. *International Journal of Geographical Information Science*, 8, 815–832.
- Fonte, C.C., Minghini, M., Antoniou, V., See, L., Patriarca, J., Brovelli, M.A., Milcinski, G., 2016. An Automated Methodology for Converting OSM Data into a Land Use/Cover Map. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Cartography & GIS, Albena (Bulgaria)*, June 13–17, 2016, Bulgarian Cartographic Association, 1, pp. 462–473. ISSN 1314-0604.
- Forkuor, G., Maathuis, B., 2012. Comparison of SRTM and ASTER Derived Digital Elevation models over two regions in Ghana – Implications for hydrological and environmental modelling. In: Piacentini T. (Ed.): *Studies on environmental and applied geomorphology*. InTech, pp. 219–240.
- Freeman, T.G., 1991. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers and Geosciences*, 17, 413–422.
- Goodchild, M.F., 2007. Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, 4, 211–221.
- Greve, C. (Ed.), 1996. *Digital Photogrammetry – Addendum to the Manual of Photogrammetry*. Publication of the American Society of Photogrammetry and Remote Sensing.
- Haklay, M., 2010. How good is the volunteered geographic information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37, 682–703.
- Hanssen, R.F., 2001. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Heymann, Y., 1994. Commission of the European Communities, Directorate-General for Environment, N.S., C.P. CORINE Land Cover: Technical Guide. European Guide. European Commission. Directorate-General. Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, Luxembourg.
- Holmes, K.W., Chadwick, O.A., Kyriakidis, P.C., 2000. Errors in USGS 30-meter Digital Elevation Model and its impact on terrain modelling. *Journal of Hydrology*, 233, 154–173.
- Hutchinson, M.F., Xu, T., Stein, J.A., 2011. Recent progress in the ANNUDEM elevation gridding procedure. In: Hengel, T., Evans, I.S., Wilson, J.P., Gould, M. (Eds.): *Geomorphometry 2011*, pp. 19–22.

- Jenson, S.K., Domingue, J.O., 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for Geographic Information System analysis. *Photogrammetry Engineering and Remote Sensing*, 54, 1593–1600.
- Kääb, A., 2005. Combination of SRTM3 and repeat ASTER data for deriving alpine glacier flow velocities in the Himalaya. *Remote Sensing Environment*, 4, 463–474.
- Kenward, T., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., Fielding, E., 2000. Effects of Digital Elevation Model accuracy on hydrologic predictions. *Remote Sensing and Environment*, 3, 432–444.
- Kyriakidis, P.C., Shortridge, A.M., Goodchild, M.F., 1999. Geostatistics for conflation and accuracy assessment of Digital Elevation Models. *International Journal of Geographical Information Science*, 7, 677–707.
- Lacroix, M.P., Martz, L.W., Kite, G.W., Garbrecht, J., 2002. Using digital terrain analysis modelling techniques for the parametrization of a hydrologic model. *Environmental Modelling Software*, 17, 127–136.
- Lin, W.T., Chou, W.C., Lin, C.Y., Huang, P.H., Tsai, J.S., 2005. Automated suitable drainage network extraction from Digital Elevation Models in Taiwan's upstream watersheds. *Hydrological Processes*, 20, 2, 289–306. DOI: 10.1002/hyp.5911.
- Lin, W.T., Chou, W.C., Lin, C.Y., Huang, P.H., Tsai, J.S., 2008. WinBasin: using improved algorithms and the GIS technic for automated watershed modelling analysis from Digital Elevation Models. *International Journal of Geographical Information Science*, 22, 47–69.
- Liu, T., Yan, H., Zhai, L., 2015. Extract relevant features from DEM groundwater potential mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-7/W4, International Workshop on Image and Data Fusion, USA, pp. 113–119.
- Mark, D.M., 1984. Automated detection of drainage networks from Digital Elevation Models. *Cartographica*, 21, 168–178.
- Martz, L.W., Garbrecht, J., 1998. The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of Raster Digital Elevation Models. *Hydrological Processes*, 12, 843–855.
- Massonet, D., Feigl, K.L., 1998. Radar interferometry and its applications to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36, 441–500.
- Monteiro, E.V., Fonte, C.C., de Lima, J.L.M.P., 2015. Assessing positional accuracy of drainage networks extracted from ASTER, SRTM and OpenStreetMap. In: *Proceedings of AGILE 2015*, Lisbon, Portugal, June 9–12, 5 p.
- Mooney, P., Corcoran, P., Winstanley, A.C., 2010. Towards quality metrics for OpenStreetMap. In: *SIGSPATIAL GIS'10*, pp. 514–517.
- Mukherjee, S., Joshi, P.K., Mukherjee, S., Gosh, A., Garg, R.D., Mukhopadhyay, A., 2013. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 205–217.
- Mukul, M., Srivastava, V., Jade, S., Mukul, M., 2017. Uncertainties in the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula. *Scientific Reports*, DOI: 10.1038/srep41672, www.nature.com/scientificreports, 10 p.
- Neis, P., Zipf, A., 2012. Analysing the contributor activity of a volunteered geographic information project – The case of OpenStreetMap. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 1, 146–165.
- Neis, P., Zielstra, D., 2014. Recent developments and future trends in volunteered geographic information research: The case of OpenStreetMap. *Future Internet* 2014, 1, 76–106. DOI: 10.3390/fi6010076.
- O'Callaghan, J.F., Mark, D.M., 1984. The extraction of drainage networks from Digital Elevation Data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28, 323–344.
- Petrasova, A., Mitasova, H., Petras, V., Jeziorka, J., 2017. Fusion of high-resolution DEMs for water flow modelling. *Open Geospatial Data, Software and Standards*. DOI: 10.1186/s40965-017-0019-2.
- Planchon, O., Darboux, F., 2002. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of Digital Elevation Models. *Catena*, 2, 159–176.
- Rodriguez, E., Morris, C., Belz, J., 2006. A global assessment of SRTM performance. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72, 249–260.
- Roth, A., Knopfle, W., Strunz, G., Lehner, M., Reinartz, P., 2002. Towards a global elevation product: Combination of multi-source Digital Elevation Models. In: *Proceedings of Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications*, Ottawa 2002, 5 p.
- Schellekens, J., Broolsma, R.J., Dahm, R.J., Donchyts, G.V., Winesemius, H.C., 2014. Rapid setup of hydrological and hydraulic models using OpenStreetMap and the SRTM derived Digital Elevation Model. *Environmental Modelling & Software*, 61, 98–105.
- Sefercik, U.G., 2012. Performance estimation of ASTER Global DEM depending upon the terrain inclination. *Journal of Indian Society of Remote Sensing*, 4, 565–576.
- Strahler, A.N., 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: *Chow, V.T. (Ed.): Handbook of Applied Hydrology*, pp. 4–39.
- Tarboton, D.G., Bras, R.L., Rodriguez-Iturbe, I., 1991. On the extraction of channel networks from Digital Elevation Data. *Hydrologic Processes*, 5, 81–100.
- Tarboton, D.G., 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in Grid Digital Elevation Models. *Water Resources*, 2, 309–319.
- Toutin, T., 2002. Impact of terrain slope and aspect on radargrammetric DEM accuracy. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, 228–240.
- Varga, M., Bašić, T., 2013. Quality assessment and comparison of Global Digital Elevation Models on the territory of Republic of Croatia. *Cartography and Geoinformation*, 20, 4–17.
- Vieux, B.E., 1993. DEM aggregation and smoothing effects on surface runoff modelling. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 3, 310–338.
- Weydahl, D.J., Sagstuen, J., Dick, O.B., Ronning, H., 2007. SRTM DEM accuracy over vegetated areas in Norway. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 3513–3527.
- Yadav, S., Indu, J., 2016. Estimation of vertical accuracy of Digital Elevation Models over complex of Indian Subcontinent. *IGARSS, 978-1-5090-3332-4/16, IEEE*, 6036-6039.
- Zhang, W., Montgomery, D.R., 1994. Digital Elevation Model grid size, landscape representation, and hydrologic simulation. *Water Resources Research*, 30, 1019–1028.
- Zielstra, D., Zipf, A., 2010. OpenStreetMap quality research in Germany. In: *Sixth International Conference on Geographic Information Science*, pp. 15–17.

Received 4 September 2017
Accepted 30 November 2017

Note: Colour version of Figures can be found in the web version of this article.

Assessing positional accuracy of drainage networks extracted from ASTER, SRTM and OpenStreetMap

Elisabete V. Monteiro
UDI-Research Unit for Inland
Development-Polytechnic
Institute of Guarda / Institute for
Systems Engineering and
Computers at Coimbra
Av. Dr. Francisco Sá Carneiro,
50 6300-559
Guarda, Portugal
emonteiro@ipg.pt

Cidália C. Fonte
Department of Mathematics
University of Coimbra / Institute for
Systems Engineering and Computers
at Coimbra
Apartado 3008, EC Santa Cruz,
3001-501
Coimbra, Portugal
cfonte@mat.uc.pt

João L.M.P. de Lima
Department of Civil Engineering
of University of Coimbra / MARE -
Marine Environmental Sciences
Centre
Faculty of Sciences and
Technology, University of Coimbra,
Rua Luís Reis Santos, Pólo II
University of Coimbra, 3030-788
Coimbra, Portugal
plima@dec.uc.pt

Abstract

This study intends to evaluate the positional accuracy and compare the completeness of the drainage networks extracted from three sources of free geographic data, namely from the Digital Elevation Models ASTER and SRTM and the collaborative project OpenStreetMap (OSM), in an area included in the basin of Mondego river, located in the centre of continental Portugal. The drainage networks extracted from ASTER and SRTM are generated considering several values of flow accumulation as the critical level to identify the water courses and the feature “waterway” was extracted from OSM. To assess the completeness and positional accuracy of these water courses the drainage network of the 1/25000 topographic map of the Portuguese Army Geographical Institute was used as reference. The distance between the ASTER, SRTM and OSM derived water courses to the reference data was computed as well as the length of the water courses and the results compared.

Keywords: drainage networks, waterways, OpenStreetMap, SRTM, ASTER, DEM.

1 Introduction

Drainage networks are fundamental for many types of studies and applications, namely in the field of hydrological modelling. These can however be obtained from different sources and have different characteristics and quality, which may influence their usability for certain applications. Additionally, official data have frequently restricted access, which may involve considerable costs and therefore alternative sources of data may have to be used.

In this study we intend to analyse and compare the positional accuracy of the drainage networks extracted from three sources of free data, namely the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Digital Elevation Model (DEM), the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) DEM and the data available in the collaborative project OpenStreetMap (OSM).

The DEM derived from the SRTM and ASTER data are used in a wide range of applications, due to their close-to-global coverage [8]. However, DEM are subject to errors, which depend on several factors, such

as the DEM resolution [13], and the terrain characteristics [12].

The global DEM SRTM and ASTER are constructed with data acquired by satellite, using different technologies and represent the altimetry of the terrain. To obtain the drainage networks from the ASTER and SRTM DEM it is necessary to extract them from the DEM using analysis operations available in GIS software.

Another type of free geographic data may be obtained from OSM (<http://www.openstreetmap.org/>), which is a collaborative project where geographical information of the world is created by volunteers. Goodchild [9] has coined a term to describe this type of data as “Volunteered Geographic Information” (VGI). There are many VGI initiatives that provide many types of data, such as photographs, descriptions of locations, classification of land cover and vector data (e.g. [11]), which correspond to a large quantity of data available for free use. OSM is one of the most known VGI initiatives, created with the main motivation of providing free access to digital geographical information [10]. The volunteers create vector data

using a large diversity of available feature types (http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map_Features), which can be downloaded by the public. In OSM data there is a feature named “waterway” that correspond to water courses, which was used in this study.

A key issue related to VGI is the quality of the data produced (e.g. [5], [1], [2]). Some authors have evaluated the accuracy of VGI against reference data sources (e.g. [10], [5]) and other non-authoritative maps, such as Google Maps and Bing Maps [1]. As other crowdsourced data, the quality and completeness of OSM data varies greatly with the region of the world.

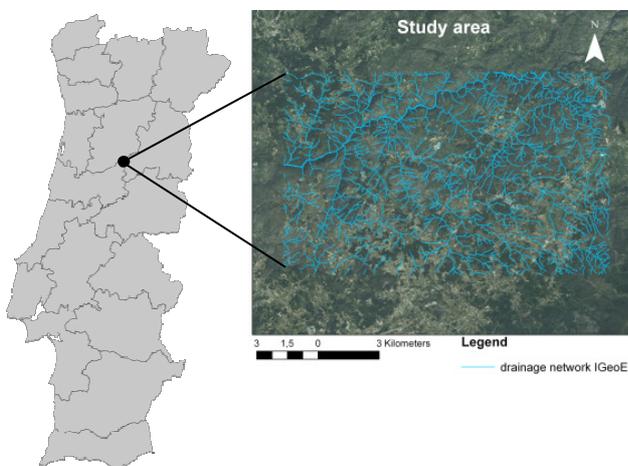
To assess the positional accuracy and completeness of the drainage networks mentioned above, the drainage network of the Portuguese Army Geographical Institute (IGeoE - Instituto Geográfico do Exército) topographic map at 1/25000 scale was used as reference data, which is obtained using photogrammetric methods and aerial photography.

The study was applied in an area for which the reference data was available, corresponding to a region in central Portugal with an area of 160 km².

2 Study Area and Data

The study area is a region corresponding to the sheet 201 of the M888 series of the 1/25000 IGeoE topographic map, located in Guarda municipality in continental Portugal. This region is part of the Mondego river basin and is characterized by steep relief, with deep valleys and rough mountains. Figure 1 shows the location of study area with the IGeoE 1/25000 topographic map drainage network overlaying the satellite image.

Figure 1: Location of study area (Gouveia – Guarda).



The global and free DEM ASTER and SRTM were used in this study for the area under analysis. These DEM have spatial resolutions of 30 m and 90 m, respectively and are in the WGS84 (World Geodetic System 1984) reference system.

Water courses (features waterways) were extracted from OSM on the 25th November 2014, using Geofabrik.

3 Methodology

In this section the methodology used to create the drainage networks from the ASTER and SRTM DEM is explained, as well as the methodology used to assess the positional accuracy of the drainage networks.

3.1 Extraction of drainage networks from SRTM and ASTER

The extraction of the drainage networks from the DEM ASTER and SRTM was performed using the D8 algorithm (e.g. [4] and [7]). A critical level of the flow accumulation was used to identify the water courses. The selection of different critical levels of flow accumulation, take into account the spatial resolution of both DEM. As the SRTM DEM has a spatial resolution of 90m and the ASTER DEM 30 m, one pixel of SRTM DEM includes 9 pixels of ASTER DEM. Therefore, the corresponding critical levels of flow accumulation in each DEM were identified multiplying the value used for SRTM by 9 to generate a correspondent value for ASTER DEM. The critical levels of flow accumulation tested were: 10, 7 and 5 cells for SRTM DEM and 90, 63 and 45 cells for ASTER DEM.

3.2 Assessing the positional accuracy of the drainage networks

To assess the positional accuracy of the water courses the distance between these lines to the reference was computed. For that, it was necessary to convert the lines in points corresponding to the ends of the segments that form the lines. The determination of the distance from each of these points to the reference line was done. The distance between each point and the reference line is the shortest distance from the point to each of the line segments forming the line, which may be the length of the segment defined by the point and the line segment, perpendicularly to the line segment, or the distance between the point and one of the line segment ends. With this approach, for each point of the lines to be evaluated, a distance to the reference line is obtained.

To assess the distance between the lines, the mean error (ME) of the distance between each point and the reference line was computed, as well as the root mean squared error (RMSE) using respectively formulas (1) and (2), where d_i is the horizontal distance of point i of the ASTER, SRTM or OSM water course to the IGeoE reference drainage network, n is the total number of points, and \bar{D} is the mean value of the distances of ASTER, SRTM and OSM lines to IGeoE drainage network.

$$ME = \bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{D})^2}{n-1}} \quad (2)$$

4 Results

4.1 Waterlines completeness

Figures 2, 3 and 4 show the OSM, SRTM and ASTER derived drainage networks overlaid with the reference drainage network (IGeoE). It can be seen in Figure 2 that OSM water courses just cover the main rivers of the region, and therefore can only be used when only the main water courses are of interest. A more detailed analysis also shows that some water courses are disconnected from the drainage network. This just happened in one place of the study area, as shown in Figure 2, in the location with the red circumference. In the entire area of basin Mondego we can observe this situation in several locations.

In Figure 3 and 4 we can observe that the drainage networks extracted from the SRTM and ASTER DEM using the critical levels of flow accumulation with values 5 and 63 respectively, have a coverage and completeness that approximates the reference data.

However they both have less water courses than the reference data, showing that even lower values of the critical level of flow accumulation might not produce the same water courses than the reference. For the critical level of flow accumulation illustrated in Figures 3 and 4, we can observe that the drainage network extracted from ASTER DEM is smoother than the drainage network extracted from SRTM DEM.

Figure 2: Drainage network extracted from OSM overlaying the reference drainage network.

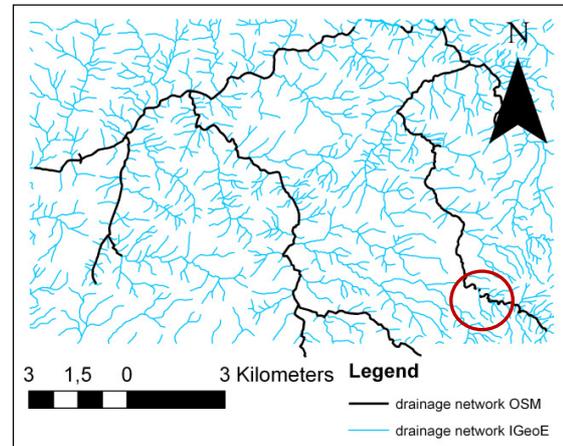


Figure 3: Drainage network derived from SRTM considering a critical level of flow accumulation of 5 cells.

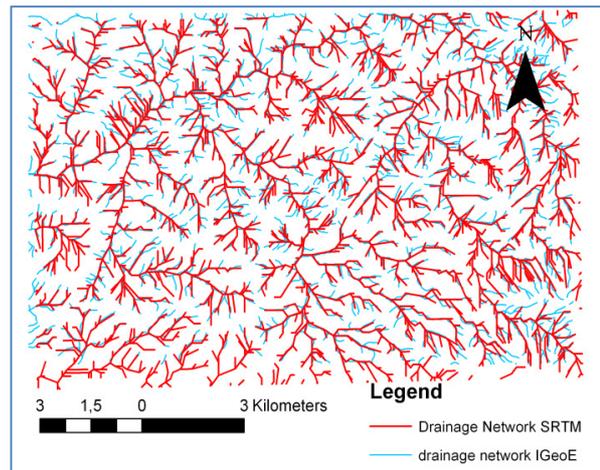
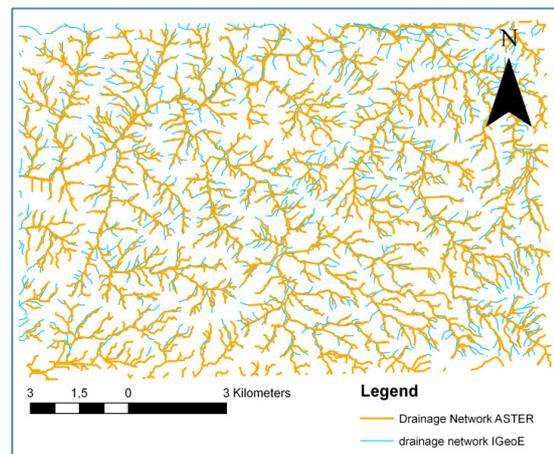


Figure 4: Drainage network derived from ASTER considering a critical level of flow accumulation of 63 cells.



4.2 Water courses positional accuracy

The horizontal distance between the three drainage networks under analysis and the IGeoE reference drainage network was computed as indicated in section 3.2. Table 1 shows the obtained results for the mean error (ME) and the root mean squared error (RMSE).

Table 1: Positional accuracy of the OSM, SRTM and ASTER derived drainage networks.

Distance	ME [m]	RMSE[m]
OSM - IGeoE	7	15
SRTM - IGeoE	26	27
ASTER - IGeoE	40	36

The results show that the water courses extracted from OSM in this study area have higher positional accuracy (with a ME of 7m to the reference lines and a RMSE of 15m) than the ones derived from SRTM and ASTER. The comparison of the results obtained for the ASTER and SRTM derived water courses show that, even though SRTM has lower spatial resolution, the water courses have a higher positional accuracy (ME to the reference line of 26m and RMSE of 27m) than the ones extracted from ASTER (ME of 40m and RMSE of 36m). These values are in agreement with the conclusions obtained in [3] and [6].

The topographic parameter total length of the drainage networks derived from the ASTER and SRTM DEM was also computed. As mentioned above the drainage network reference has a detail correspondent to a scale of 1/25000. Thus, the critical levels of flow accumulation that produce drainage networks more comparable with this reference were tested, namely the values of 10, 7 and 5 cells for SRTM and 90, 63 and 45 cells for ASTER. Table 2 shows the results obtained.

Table 2: Total length of drainage networks derived from ASTER and SRTM for the critical levels (CL) of flow accumulation of 90, 63 and 45 cells for ASTER and 10, 7 and 5 cells for SRTM.

CL	Length [m]	CL	Length [m]
ASTER		SRTM	
90	462498	10	403299
63	562179	7	491088
45	666412	5	591929

The total length of the IGeoE reference drainage network is 555661m. The critical levels that produces drainage networks with a total length closer to the reference is the critical level 5 for SRTM and critical level 63 for ASTER. The variations of total length obtained are present in Table 3.

Table 3: Difference between the total length of the drainage networks ASTER and SRTM and the IGeoE reference drainage network.

CL	Difference to IGeoE [m]	CL	Difference to IGeoE [m]
ASTER		SRTM	
90	93163	10	152362
63	-6518	7	64573
45	-110751	5	-36268

Observing the variation of the topographic parameter total length (Table 3), for ASTER, the drainage network obtained with the critical level 63 is the one closer to the total length of the IGeoE drainage network.

5 Conclusions

The three types of geographical data used in this work, ASTER and SRTM DEM and the feature waterways available in OSM constitute an important source of free geographic information that can be applied in the study of several problems. In the study area that was considered, and in terms of the horizontal positional accuracy of the drainage networks, we may conclude that OSM water courses presents better results when compared with the considered reference drainage network. In terms of completeness the situation is very different, because the only water courses represented are the major rivers and some water courses are disconnected from the main drainage network. In the study area, in the data downloaded from OSM there are some water courses that are not connected with the main network, so there is not a real network of drainage lines. The drainage networks derived from SRTM and ASTER are effectively networks with all segments linked and cover water courses of lower lengths. With critical levels of flow accumulation of 5 and 63 cells for SRTM and ASTER the drainage networks stay more closely to reference. We conclude also the drainage network SRTM (according the results presented in Table1), has a higher performance in terms of positional accuracy than drainage networks ASTER in spite of its lower resolution (90 m).

Since the waterways extracted from OSM showed to have high positional accuracy, it will be tested if they may be used to generate DEM with more accuracy, complementing with other available data, such us the ASTER and SRTM DEM.

Acknowledgements

Special thanks to Portuguese Army Geographical Institute (IGeoE - Instituto Geográfico do Exército), who kindly providing the drainage network of sheet 201

of M888 series of IGeoE derived by topographic map 1/25000.

This work was partially supported by Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) under project grant UID/MULTI/00308/2013.

References

- [1] B. Cipeluch, R. Jacob, A. Winstanley and P. Mooney. Comparison of the accuracy of OpenStreetMap for Ireland with Google Maps and Bing Maps. In: N. J. Tate and P. F. Fisher (eds.), *Proceedings, Ninth International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, Accuracy 2010*, Leicester, UK, July 20-23, 337-340, 2010.
- [2] C.C. Fonte, L., Bastin, L. See, G. Foody and F. Lupia. Usability of VGI for Validation of Land Cover Maps. *International Journal of Geographic Information Science*, 2015. Accepted for publication.
- [3] C. Huggel, D. Schneider, P. Miranda, H. Granados, and Kääb. Evaluation of ASTER and SRTM data for Lahar modelling: a case study on Lahars from Popocatepetl Colcano, Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 170, 2008.
- [4] D.M Mark. Automated detection of drainage networks from digital elevation models. *Cartographica* 21, 168–178, 1984.
- [5] J.E. Girres and G. Touya. Quality assessment of the French OpenStreetMap dataset, *Transactions in GIS*, 14 (4), 435-459, 2010.
- [6] J. Thomas, S. Joseph, K.P Thrivikramjic. and K.S. Arunkumard. Sensitivity of digital elevation models: The scenario from two tropical mountain river basins of the Western Ghats, *Geoscience Frontier*, 30, 1-17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2013.12.008>, 2014.
- [7] J. O’Callaghan and D. Mark. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics & Image Processing*, 28, 323–344, 1984.
- [8] K.G Nikolakopoulos. and N. Chrysoulakis. Updating the 1:50 000 topographic maps using ASTER and SRTM DEM: the case of Athens, Greece. *Remote Sensing for Ehlrs*, Ulrich Michel, Proc. of SPIE Vol. 6366 636606-1, 2006.
- [9] M.F. Goodchild. Citizens as voluntary sensors: spatial data infrastructure in the world of the web 2.0, *International Journal of Spatial Data Infrastructures Research*, 2, 24-32, 2007a.
- [10] M. Haklay. How good volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37 (4), 682-703, 2010.
- [11] M. Haklay. Citizen science and volunteered geographic information: Overview and typology of participation, In: *D Sui, S. Elwood, and M. Goodchild, eds. Crowdsourcing Geographic Knowledge. Springer Netherlands*, 105–122, 2013.
- [12] P.V. Bolstad and E. Stowe. An evaluation of DEM accuracy: elevation, slope and aspect, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 60(11), 1327-1332, 1994.
- [13] R.N. Armstrong and L.W. Martz. Topographic Parameterization in continental hydrology: a study in scale, *Hydrology Processes*, 17, 3763-3781, 2003.

PARÂMETROS TOPOGRÁFICOS DERIVADOS DO RELEVO E UTILIZADOS NA CARATERIZAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Elisabete S. V. Monteiro*, João L. M. P. de Lima e Cidália C. Fonte*****

* *Instituto Politécnico da Guarda; INESC Coimbra- Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra; emonteiro@ipg.pt*

** *Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra; IMAR–CMA Centro de Investigação do Mar e Ambiente, IMAR-Instituto do Mar, c/o Dep. Ciências da Vida, Universidade de Coimbra; plima@dec.uc.pt*

*** *Departamento de Matemática, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra; INESC Coimbra- Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra, cfonte@mat.uc.pt*

Resumo

No estudo de bacias hidrográficas o conhecimento das características fisiográficas é necessário para se efetuar a modelação do seu comportamento hidrológico. Tais características estão relacionadas com a geometria da bacia, com o sistema de drenagem e com o seu relevo, sendo traduzidas por parâmetros ou índices que apresentam variabilidade em termos espaciais, sendo normalmente extraídos a partir de Modelos Digitais de Terreno (MDT). A automatização da extração de informação que caracteriza a bacia, embora mais eficiente que os processos tradicionais executados sobre cartografia convencional, levantam no entanto questões que merecem atenção, tendo aberto perspectivas inovadoras na investigação ligada à modelação hidrológica e, consequentemente na gestão de recursos hídricos.

No presente estudo listam-se essas características fisiográficas, identificam-se alguns parâmetros ou índices topográficos inerentes à bacia e ao sistema de drenagem, tecem-se considerações sobre a sua determinação, fazendo-se também algumas análises à variabilidade dos resultados obtidos num caso de estudo realizado sobre duas bacias hidrográficas localizadas no território de Portugal continental.

Palavras-chave: bacias hidrográficas, características fisiográficas, parâmetros topográficos.

1. Introdução

As bacias hidrográficas constituem unidades fundamentais para o planeamento e gestão dos recursos hídricos, desempenhando por isso um papel fundamental na vida das populações. Para compreender o comportamento das bacias hidrográficas é necessário conhecer as suas características fisiográficas como, por exemplo, a geometria, o sistema de drenagem, o relevo, a geologia, os solos e a vegetação. Neste estudo, focar-se-á a atenção nas características relativas à geometria e ao sistema de drenagem da bacia e também em alguns parâmetros que lhes estão subjacentes.

A representação das bacias hidrográficas no passado era feita recorrendo a cartografia analógica. Atualmente, essas operações são executadas de forma automatizada, recorrendo a software de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Estes sistemas possuem a capacidade de combinar grande volume de dados com diferentes tipologias, tendo aumentado a sua utilização nas aplicações hidrológicas (e.g., Prodanovic, 2009). Este tipo de sistemas permite gerar a rede de drenagem e a bacia de forma automatizada a partir do MDT da zona de estudo, possibilitando a posterior extração de diversos parâmetros topográficos. Os MDT são vastamente utilizados em áreas como a geomorfologia, a erosão de solos, a hidrologia e

noutros domínios da geo-análise (Moore *et al.*, 1991; Goodchild *et al.*, 1993; Wise, 2000). No contexto nacional, os SIG e os MDT são utilizados em diversos domínios da Engenharia Portuguesa, nomeadamente a Engenharia Civil e do Ambiente, no Ordenamento do Território e na Gestão Agrícola e Florestal (*e.g.*, Valadares Tavares, 2001).

Neste artigo pretende-se listar algumas características fisiográficas relacionadas com o relevo, identificar os parâmetros ou índices topográficos que lhes estão subjacentes e analisar a variabilidade desses parâmetros perante diferentes condições escolhidas para a geração do sistema de drenagem. Far-se-á uma análise sobre a variabilidade dos parâmetros e se essa variabilidade influencia a análise hidrológica da bacia. O estudo de caso foi realizado em duas bacias hidrográficas localizadas no território continental de Portugal, uma localizada numa zona de maior altitude (Beira Alta), outra numa zona mais plana (Alentejo).

2. Características fisiográficas

Uma característica importante das bacias hidrográficas é a sua geometria, da qual dependem parâmetros como a área e o perímetro. A área da bacia é um parâmetro que influencia a quantidade de escoamento gerado. O cálculo da área da bacia requer a sua prévia delimitação, para o que é necessário identificar as linhas de fecho ou cumeeiras.

Outra característica relevante no estudo das bacias é o seu sistema de drenagem. O tipo de ramificação da rede de drenagem influencia a quantidade de cursos de água gerados e por isso a resposta hidrológica da bacia, sendo o número de cursos de água um parâmetro que é influenciado diretamente pelo relevo da bacia. O conhecimento do sistema de drenagem permite determinar a maior ou menor constância do escoamento da água ao longo de um determinado período (Lencastre & Franco, 2003). A estrutura do sistema de drenagem é influenciada pelo relevo da superfície, onde regiões bastante acidentadas terão uma maior densidade de cursos de água que regiões mais planas, ou seja, o relevo “modela” a estrutura da rede de drenagem, contribuindo para o tempo de concentração da bacia e também para a erosão hídrica e para o transporte líquido e sólido na bacia.

O relevo topográfico da bacia é normalmente representado por MDT do tipo matricial, sendo constituídos por uma matriz de pixéis com uma determinada dimensão (resolução do MDT), cada um possuindo um valor correspondente à elevação. São vários os parâmetros ou índices topográficos que se podem extrair da rede de drenagem e que irão ser abordados no ponto 3.

3. Parâmetros topográficos

Na caracterização de bacias hidrográficas existem parâmetros derivados da geometria e outros derivados do sistema de drenagem. Em relação à geometria, neste artigo iremos apenas considerar a área e o perímetro. A área da bacia é a superfície plana da bacia projetada em plano horizontal. O perímetro é o comprimento total da linha divisória topográfica.

São vários os parâmetros que se podem extrair a partir do sistema de drenagem. Um dos métodos foi desenvolvido por (O’Callaghan & Mark, 1984), onde a cada pixel é atribuído um valor correspondente ao número de pixéis que para ele drenam, construindo-se desta forma a matriz de acumulação de escoamento, que está na base do cálculo de diversos parâmetros topográficos. Neste estudo, iremos estimar os parâmetros: comprimento total da rede de drenagem, ordem de cada curso de água que permite definir a ordem da bacia, relações de bifurcação, sinuosidade do rio principal e densidade de drenagem. O Quadro 3.1 lista alguns dos parâmetros inerentes ao sistema de drenagem.

Quadro 3.1: Parâmetros do sistema de drenagem.

Parâmetros do sistema de drenagem	Significado
Comprimento total da rede de drenagem (L).	Soma do comprimento de todos os cursos de água que compõem o sistema de drenagem.
Ordem do curso de água (μ)	Número inteiro que define a hierarquia do curso de água pertencente ao sistema de drenagem.
Relação de bifurcação (R_b)	Relação entre o n° de cursos de uma dada ordem (μ) sobre o n° de cursos de ordem a seguinte ($\mu+1$).
Sinuosidade (S)	Relação entre o comprimento do curso de água e o comprimento do seu talvegue.
Densidade de drenagem (D_d)	Relação entre o comprimento total da rede de drenagem e a área da bacia.

O presente estudo tem por objetivo analisar a variabilidade destes parâmetros fazendo variar determinadas condições no processamento informático do relevo das bacias.

4. Extração automática de parâmetros topográficos

No processo foi utilizado o MDT global ASTER (Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer) do JET Propulsion Laboratory, NASA, que apresenta uma resolução espacial de 30 metros, tendo sido convertido para um sistema de referência local (Datum 73) Tendo por base este modelo foram identificadas as bacias hidrográficas indicadas na Fig. 4.1. A primeira (Bacia 1) com uma área de cerca de 167 km² localizada na região da Beira Alta, a segunda (Bacia 2) com uma área de cerca de 56 km² e localizado no Alentejo. A extração da rede de drenagem foi feita escolhendo o limiar crítico de acumulação, que é o número de pixéis a partir do qual um pixel é considerado como pertencendo a uma linha de água. Fazendo variar este valor obter-se-ão redes de drenagem mais ou menos ramificadas e detalhadas. Os limiares utilizados nas duas bacias foram: 2000, 1000, 500 e 100 pixéis.

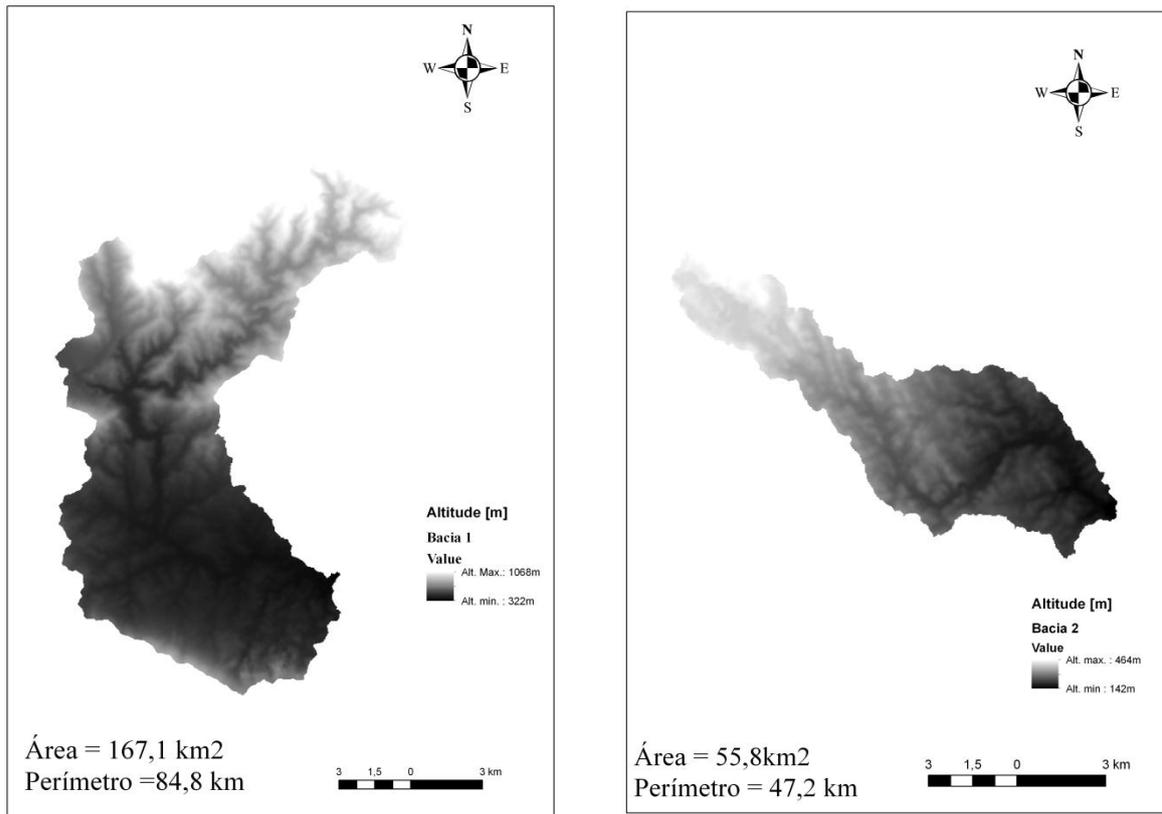
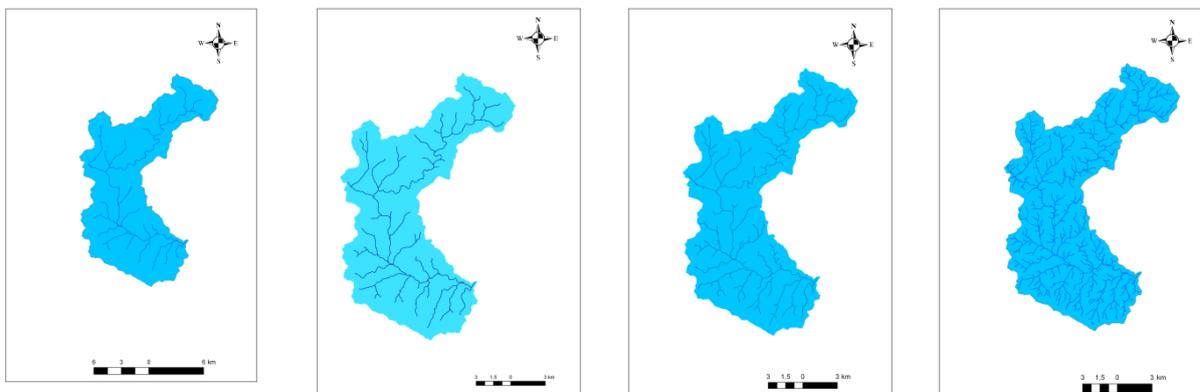


Fig. 4.1: MDT das duas bacias hidrográficas estudadas (Bacia 1 e Bacia 2).

5. Resultados e discussão

Após o processamento efetuado, observa-se que a variabilidade do limiar crítico considerado gera redes de drenagem cada vez mais ramificadas com a diminuição desse valor, isto porque irão ser consideradas linhas de água com menor valor de acumulação de escoamento. A Fig. 5.1, apresenta as redes de drenagem geradas para a Bacia 1 e para a Bacia 2 para os 4 limiares considerados.



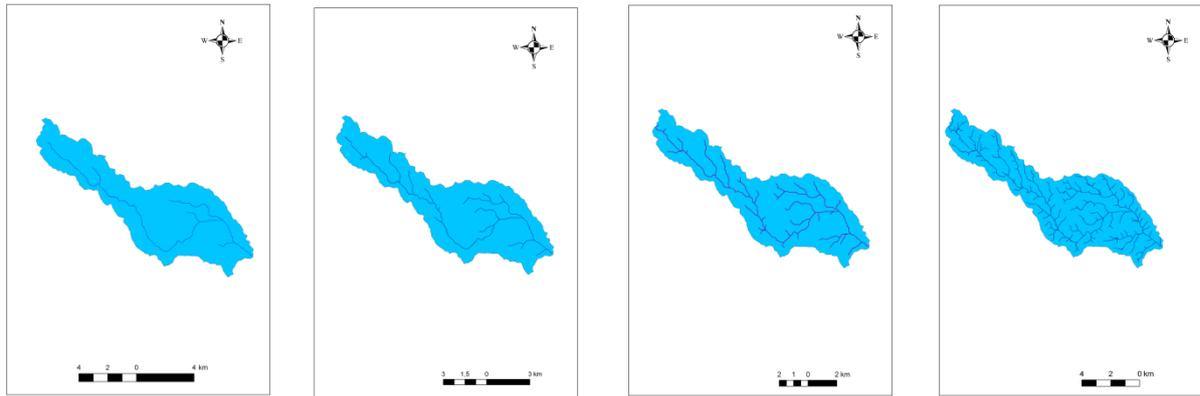


Fig. 5.1: Redes de drenagem geradas com limiares de 2000, 1000, 500 e 100 pixéis para as duas bacias.

Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 5.1, onde se indica o comprimento total da rede, a ordem da bacia e o número total de cursos de água gerados, considerando os limiares críticos respetivos de 2000, 1000, 500 e 100 pixéis. Tal como já foi referido anteriormente, o comprimento total da rede vai aumentando à medida que este limiar diminui, o que é natural pois com a diminuição desse valor produzem-se redes cada vez mais densas. A ordem da bacia foi determinada pelo método de Strahler (1957), que define que os cursos de água sem tributários se consideram de primeira ordem (as nascentes), a junção de dois cursos de igual ordem gera um curso de ordem seguinte e a junção de dois cursos de ordem diferente gera um curso com ordem igual ao do tributário de maior ordem. Verificou-se que a diminuição do limiar aumenta a ordem da bacia.

Quadro 5.1: Valores de comprimento da rede, ordem da bacia e número total de cursos de água para as duas bacias.

Bacias	Limiare críticos	Comprimento total da rede	Ordem	Número total cursos de água
Bacia 1	2000 pixéis	98,3km	3	51
	1000 pixéis	128,9km	3	91
	500 pixéis	167,8km	4	185
	100 pixéis	336,3km	5	873
Bacia 2	2000 pixéis	30,4km	2	13
	1000 pixéis	42,9km	3	33
	500 pixéis	59,6km	3	98
	100 pixéis	119,5km	4	293

A partir do comprimento total da rede e da área da bacia determinou-se o parâmetro densidade de drenagem (D_d). Posteriormente foram também medidos o comprimento do rio principal e o respetivo talvegue para os limiares críticos considerados. O Quadro 5.2 apresenta, para cada bacia e para cada limiar, os valores obtidos para o comprimento do rio principal e para o comprimento do respetivo talvegue.

Quadro 5.2: Valores de comprimento do rio principal e comprimento do talvegue para as duas bacias estudadas.

Bacias	Limiare críticos	Comprimento do rio principal	Comprimento do talvegue
Bacia 1	2000 pixéis	36,3km	16,9km
	1000 pixéis		17,1km

	500 pixéis	36,5km	17,5km
	100 pixéis	37,2km	18,0km
		37,4km	
Bacia 2	2000 pixéis	21,4km	16,3km
	1000 pixéis	21,7km	16,6km
	500 pixéis	22,4Km	16,9km
	100 pixéis	23,2Km	17,1km

O Quadro 5.3 apresenta os valores obtidos para a densidade de drenagem (D_d) e para a sinuosidade (S) do rio principal da bacia. Verifica-se que, para as duas bacias, a densidade de drenagem aumenta com a diminuição do limiar crítico, o que se deve ao facto de existirem mais cursos de água na bacia. A sinuosidade do rio principal varia pouco com a utilização de diferentes limiares, ou seja, o resultado obtido não é muito sensível à escolha de diferentes valores para esse limiar.

Quadro 5.3: Valores de densidade de drenagem e sinuosidade do rio principal para as duas bacias estudadas.

Bacias	Limiares críticos	Densidade de drenagem (km/km ²)	Sinuosidade do rio principal
Bacia 1	2000 pixéis	0,59	2,15
	1000 pixéis	0,77	2,13
	500 pixéis	1,00	2,13
	100 pixéis	2,01	2,08
Bacia 2	2000 pixéis	0,54	1,31
	1000 pixéis	0,77	1,31
	500 pixéis	1,07	1,33
	100 pixéis	2,14	1,36

Um outro parâmetro determinado para os diferentes limiares críticos foi a relação de bifurcação (R_b) entre as várias ordens que compõem a bacia e que se apresentam no Quadro 5.4, onde $R_{\mu, \mu+1}$ é a relação de bifurcação entre a ordem μ e a ordem $\mu+1$. Verifica-se que existe uma grande variabilidade na relação de bifurcação em função dos limiares estabelecidos. Nas duas bacias (Bacia 1 e Bacia 2), verifica-se que a relação de bifurcação nas ordens de menor valor (R_{12} e R_{23}), para os diferentes limiares, apresenta variabilidade evidente.

Quadro 5.4: Valores de relação de bifurcação (R_b) para as duas bacias, utilizando os 4 limiares.

Bacias	Limiares críticos	R_{12}	R_{23}	R_{34}	R_{45}
Bacia 1	2000 pixéis	2,36	0,79		
	1000 pixéis	2,19	0,88		
	500 pixéis	1,69	6,88	0,28	
	100 pixéis	2,35	1,42	1,68	2,82
Bacia 2	2000 pixéis	1,17			
	1000 pixéis	1,31	4,33		
	500 pixéis	2,43	1,21		
	100 pixéis	2,28	2,10	0,63	

6. Conclusões

Neste estudo abordou-se a variabilidade de alguns parâmetros topográficos extraídos da bacia, em função de um limiar de acumulação escolhido. Esse valor (número de pixéis) permite validar como linhas de água apenas as que são definidas por valores iguais ou superiores a esse valor, sendo as de valor inferior rejeitadas. Este processo vai permitir gerar redes de drenagem mais ou menos detalhadas. O estudo foi realizado sobre duas bacias hidrográficas com áreas consideravelmente distintas, tendo-se verificado que o respetivo limiar de acumulação influencia decisivamente o grau de ramificação das redes geradas, influenciando consequentemente outros parâmetros topográficos derivados, como o comprimento total da rede, a ordem da bacia, a densidade de drenagem e as relações de bifurcação. O comprimento do rio principal e o comprimento do seu talvegue também apresentam variabilidade em função dos limiares considerados, porém não se traduz em variabilidade no parâmetro sinuosidade. Este resultado pode ser explicado pelo facto da medição do talvegue ter sido feita sobre a rede de drenagem, logo, apesar dos sub-parâmetros da sinuosidade (comprimento do rio principal e comprimento do talvegue) variarem, eles variam na mesma proporção. Concluiu-se que a escolha do número de pixéis utilizados na definição da rede de drenagem pode influenciar a modelação do comportamento hidrológico da bacia, influenciando entre outros fatores o transporte líquido e sólido da bacia, ou seja, com repercussões em termos de planeamento e gestão.

7. Bibliografia

- Goodchild, M. F., Parks, B. O., Steyaert, L. T. (eds) (1993) *Geographic Information System and Environmental Modeling*, Oxford University Press: Oxford.
- Lencastre, A., Franco, F. M. (2003) *Lições de Hidrologia*, Fundação Armando Lencastre, 31p.
- Moore, I. D., Grayson, R. B., Ladson, A. R. (1991) Digital Terrain Modeling: a review of Hydrological Geomorphological and Biological Applications, *Hydrological Processes*, 5, 3-30.
- O'Callaghan, J., Mark, D. (1984) The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data, *Computer Vision Graphics & Image Processing*, 28, 323-344.
- Prodanovic, D., Stanic, M, Milivojevic, V., Simic, Z., Arsic, M. (2009) DEM Based GIS Algorithms for Automatic Creation of Hydrological Models Data, *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, vol. 3, 64-85.
- Strahler, A. N. (1957) *Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology*. New Halen: Transactions: American Geophysical Union, 38, 913-920.
- Valadares Tavares, L. (2001) *A Engenharia e a Tecnologia ao Serviço do Desenvolvimento de Portugal: Prospectiva e Estratégia 2000-2020*. CESUR, IST-UTL, Lisboa, 105p.
- Wise, S. (2000) Assessing the Quality for Hydrological Applications of Digital Elevation Models Derived from Contours, *Hydrological Processes*, 14, 1909-1929.



Exatidão posicional de redes hidrográficas extraídas de MDE gerados a partir de MDE globais e de dados extraídos do OpenStreetMap

Elisabete V. MONTEIRO^{1,2}, Cidália C. FONTE^{3,2} e João L. M. PEDROSO DE LIMA^{4,5}

¹ UDI/IPG-Unidade de Desenvolvimento do Interior do Instituto Politécnico da Guarda (Portugal)

² INESC-Coimbra-Instituto de Engenharia de Sistemas de Computadores de Coimbra (Portugal)

³ Departamento de Matemática, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (Portugal)

⁴ Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (Portugal)

⁵ IMAR – Instituto do Mar e MARE – Centro de Ciências do Mar e do Ambiente, c/o Dep. Ciências da Vida, Coimbra (Portugal)

(emonteiro@ipg.pt; cfonte@mat.uc.pt; plima@dec.uc.pt)

Palavras-chave: exatidão posicional, redes hidrográficas, ASTER, SRTM e *OpenStreetMap*

Resumo: A posição das linhas de água é necessária para vários tipos de análises no âmbito da Hidrologia, podendo a sua localização ser obtida a partir de dados oficiais com elevada exatidão. No entanto, por vezes, esta informação não está disponível ou pode ter custos elevados. Em alternativa, a rede hidrográfica pode ser obtida a partir de dados de acesso livre, como os Modelos Digitais de Elevação (MDE) globais ASTER e SRTM, ou ainda de dados disponibilizados por voluntários, de que é exemplo o *OpenStreetMap* (OSM) que, entre outro tipo de dados, inclui linhas de água (*waterways*). Embora a completude desta informação possa ser baixa, um estudo inicial realizado numa zona da bacia hidrográfica do rio Mondego (Portugal), mostrou que a exatidão posicional das linhas de água disponíveis no OSM é superior à exatidão posicional das linhas de água extraídas dos MDE.

O presente trabalho tem por objetivo verificar se a rede hidrográfica obtida a partir de um MDE gerado com dados extraídos dos MDE globais e das linhas de água disponíveis no OSM, apresenta maior exatidão posicional do que a rede hidrográfica gerada a partir dos MDE originais. Foi avaliada a exatidão posicional da rede hidrográfica através da comparação com a rede hidrográfica da série cartográfica M888 à escala 1/25000 do Instituto Geográfico do Exército (IGeoE). O estudo foi aplicado à área acima referida. Os resultados obtidos mostram que a combinação das duas fontes de informação de acesso livre (MDE ASTER e SRTM e linhas de água do OSM) permitiu aumentar a exatidão posicional das redes hidrográficas.



1. Introdução

As redes hidrográficas são necessárias para diversos estudos de natureza hidrológica, extraindo-se delas parâmetros topográficos necessários à caracterização das bacias hidrográficas, tais como, comprimento das linhas de água, comprimento total da rede, densidade de drenagem e relações de bifurcação. As redes hidrográficas podem ser obtidas recorrendo a Modelos Digitais de Elevação (MDE). Têm sido desenvolvidos diversos sistemas de satélites e de sensores para produzir dados altimétricos em formato digital (Hirano *et al.*, 2003), de que são exemplo os modelos ASTER e SRTM. Estes MDE têm livre acesso, cobrem quase toda a superfície terrestre, e na área de estudo possuem resoluções espaciais de 30 e 90 m, respetivamente. Estes MDE são bastante úteis, nomeadamente em situações em que há dificuldade na obtenção de dados cartográficos oficiais, que apesar de normalmente possuírem uma maior exatidão, possuem custos relevantes que o utilizador poderá não ter possibilidade de suportar. Além disso, em determinadas regiões do mundo não existem dados oficiais, o que torna este tipo de modelos ainda mais úteis. Em determinados estudos, a área abrangente pode envolver zonas pertencentes a mais do que um país, pelo que, não se pode apenas utilizar dados de uma única fonte oficial. Nos últimos anos a sua vasta utilização deve-se à sua abrangência quase global (Nikolakopoulos e Chrysoulakis, 2006), permitindo estudar zonas remotas da superfície terrestre. Todavia, como qualquer fonte de dados geográficos, os MDE globais não estão isentos de erros, assim como os parâmetros deles extraídos. Diversos estudos já publicados analisam a exatidão dos MDE e dos parâmetros deles derivados (e.g., Zhang *et al.*, 2008 e Kenward *et al.*, 2000, Gopinath *et al.*, 2014).

Nos últimos anos surge uma nova forma de informação geográfica, designada de “Informação Geográfica Voluntária-IGV”. A IGV representa um recurso crescente de dados potencialmente valiosos para muitas aplicações (Fonte *et al.*, 2015) onde os utilizadores produzem e publicam essa informação. A IGV, segundo Goodchild (2007) é um fenómeno que rompe com todas as formas mais convencionais de informação geográfica, enfatizando também o esforço dos voluntários que a recolhem, a processam e a publicam. O *OpenStreetMap* (OSM) é um exemplo de IGV e consiste num projeto colaborativo onde os voluntários recolhem, processam e publicam dados geográficos de diverso tipo, como cartografia, imagens, atributos descritivos, entre outros. É uma fonte de dados geográficos de acesso livre, com a representação cartográfica de diversas entidades geográficas. Uma dessas entidades é designada “*waterways*” e corresponde a linhas que representam cursos de água, tendo sido esta a informação utilizada no presente estudo.

Um assunto chave relacionado com IGV é a qualidade dos dados produzidos (e.g., Fonte *et al.*, 2015, Girres e Touya, 2010 e Cipeluch *et al.*, 2010). Alguns autores tem avaliado a exatidão da IGV comparando com outras fontes de dados usados como referência (e.g., Haklay, 2010 e Girres e Touya, 2010) e também com mapas disponíveis na internet, tal como, o *Google Maps* e *Bing Maps* (Cipeluch *et al.*, 2010). Relativamente à cobertura dos dados OSM, apresenta-se variável em função da região, sendo normalmente nas zonas urbanas, onde reside mais população, que existe maior completude.

Num estudo previamente realizado (Monteiro *et al.*, 2015) e aplicado a uma área inserida na bacia hidrográfica do Rio Mondego (Portugal) foi analisada a exatidão posicional das redes hidrográficas extraídas dos MDE ASTER e SRTM e das linhas de água disponibilizadas no OSM, tendo-se concluído que as linhas de água do OSM possuem uma maior exatidão posicional que as redes hidrográficas extraídas dos MDE globais. As redes hidrográficas extraídas dos MDE globais e do OSM foram comparadas com a rede hidrográfica da carta 1/25 000 do Instituto Geográfico do Exército (IGeoE), que serviu de referência. Neste contexto, propõe-se a realização de um estudo que permita analisar se os MDE globais ASTER e SRTM obtidos a partir da integração de dados do OSM (linhas de água) com dados extraídos dos MDE globais (pontos com cota associada), permitem a extração de linhas de água com maior exatidão posicional que as linhas de água extraídas dos MDE originais.

2. Metodologia

2.1 Transformação dos MDE globais

A extração das redes hidrográficas geradas depende essencialmente da qualidade do MDE (Gopinath *et al.*, 2014). Por isso, uma melhoria na exatidão de MDE traduz-se normalmente na melhoria da exatidão dos parâmetros deles extraídos.

A melhoria da exatidão do MDE pode ser conseguida com a integração de informação de melhor qualidade. O desafio para este estudo sustentou-se na ideia de que, visto que em trabalho anteriormente desenvolvido (Monteiro *et al.*, 2015) provou-se que, na região em estudo, as linhas de água extraídas do OSM possuíam uma maior exatidão posicional que as linhas de água extraídas dos MDE globais, julgou-se oportuno analisar se, os MDE resultantes da integração das linhas de água do OSM com uma amostra de pontos derivados dos MDE originais, produzem linhas de água com maior exatidão posicional que a exatidão posicional obtida para as linhas de água extraídas dos MDE originais. Assim, os MDE globais originais foram convertidos em informação vetorial do tipo ponto. A conversão dos MDE originais do modelo matricial para pontos no modelo vetorial permite obter uma amostra regular de pontos, onde cada píxel da matriz de elevações origina um ponto localizado no centro do píxel com valor de elevação associado. De seguida, utilizou-se um método de interpolação baseado no algoritmo de ANUDEM (Hutchinson *et al.*, 2011) que utiliza como dados de entrada, pontos com valor de cota e linhas. Considerou-se este método o mais apropriado, em função dos dados a utilizar. A Figura 1 ilustra o processo de reconstrução do MDE com introdução de informação sobre a posição dos cursos de água (linhas de água extraídas do OSM).

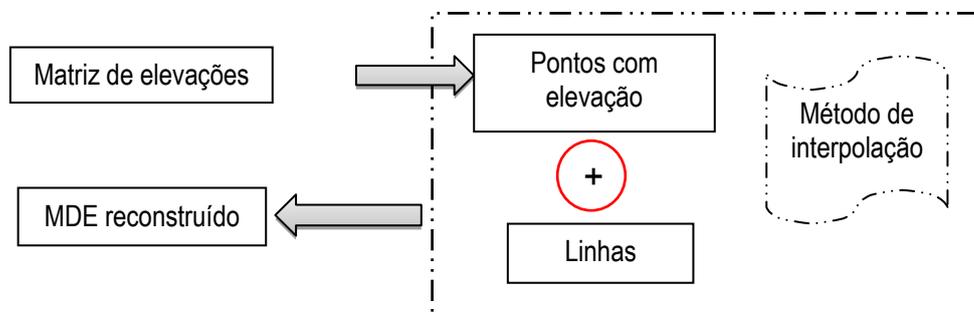


Figura 1 – Fluxograma de reconstrução do MDE integrando informação de pontos com cota associada e linhas (linhas de água do OSM)

2.2 Extração das redes hidrográficas

A extração das redes hidrográficas foi efetuada aplicando o algoritmo D8 (e.g., Mark, 1984, O'Callaghan e Mark, 1984; Tarboton, 1997). O processo tem início com a remoção das depressões artificiais que ocorrem durante os métodos de geração dos MDE e de seguida, tendo por base a matriz das elevações gera-se a matriz de direção do escoamento. Nesta matriz o atributo de cada píxel, define uma das oito direções de escoamento possíveis. Tendo por base a matriz de direção do escoamento, gera-se a matriz de acumulação de escoamento. Nesta matriz cada píxel tem um valor que indica o número de píxeis que para ele drenam. Por último, extraem-se as redes hidrográficas impondo uma condição à matriz de acumulação de escoamento. A condição diz que o valor do píxel deve ser superior a um valor (nível crítico) que define se o píxel pertence ou não à linha de água.

2.3 Exatidão posicional das redes hidrográficas

Após a extração das redes hidrográficas interessa saber a sua exatidão posicional. Para isso, é necessário determinar a distância horizontal (desvio) que separa as redes extraídas dos MDE modificados e a rede de referência. Em termos de geometria plana consiste em resolver o problema da distância horizontal entre duas linhas que não são paralelas. Assim, optou-se por transformar uma das linhas em pontos (ponto médio de cada segmento que forma a linha) e de seguida determinar a distância de cada um desses pontos ao ponto mais próximo da linha tomada como referência, tendo um raio de abrangência pré-definido. Traduzindo-se assim o processo num problema de determinação da distância entre pontos e uma linha, constituída por segmentos. A distância de cada ponto à linha de referência considerada é o mínimo da distância entre o ponto e a extremidade do segmento mais próximo da linha de referência e a distância da perpendicular baixada do ponto ao segmento da linha de referência mais próximo, de acordo com a Figura 2. Obtendo-se para cada

ponto o valor da distância do ponto à linha de referência. Determinou-se em seguida, a média das distâncias (M) de cada rede hidrográfica em análise à rede de referência e também o desvio padrão (σ).

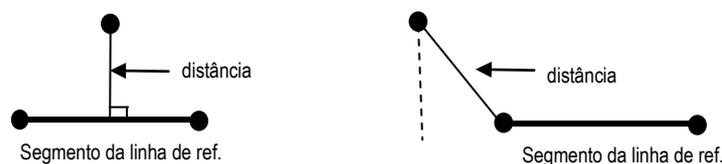


Figura 2 – Determinação da distância entre um ponto e um segmento da linha de referência

3. Caso de estudo

3.1 Caracterização e localização da área de estudo

A área de estudo localiza-se na bacia hidrográfica do rio Mondego, na região de Gouveia, distrito da Guarda, Portugal. É uma região declivosa e de vales encaixados, onde o rio Mondego serpenteia e contorna as montanhas, possui aproximadamente 160 km² de área e uma altitude média de 690 metros. A rede hidrográfica de referência utilizada no estudo pertence à folha nº 201 da carta topográfica à escala 1/25 000 da série cartográfica M888 do IGeoE que se apresenta na Figura 3.

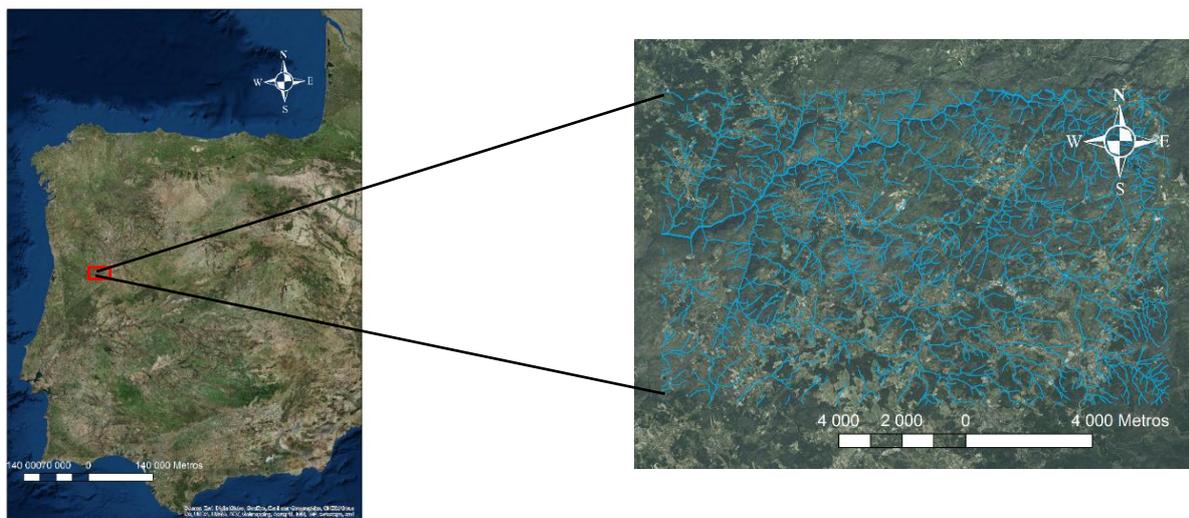


Figura 3 – Localização da área de estudo (concelho de Gouveia, Guarda, Portugal)

3.2 Dados

Foram utilizadas três fontes de dados de acesso livre, os MDE globais ASTER e SRTM, respetivamente com resoluções espaciais de 30 e 90m e também a entidade geográfica “waterways”, correspondente à rede hidrográfica disponível no *OpenStreetMap*, onde apenas estão cartografados os rios principais (Mondego e três afluentes da margem Sul) e que se apresentam na Figura 4. Os MDE estavam originalmente no sistema de coordenadas geográficas WGS 84 (*World Geodetic System*, 1984). Como dados de referência foi utilizada a rede hidrográfica cedida pelo IGeoE apresentada na Figura 3.

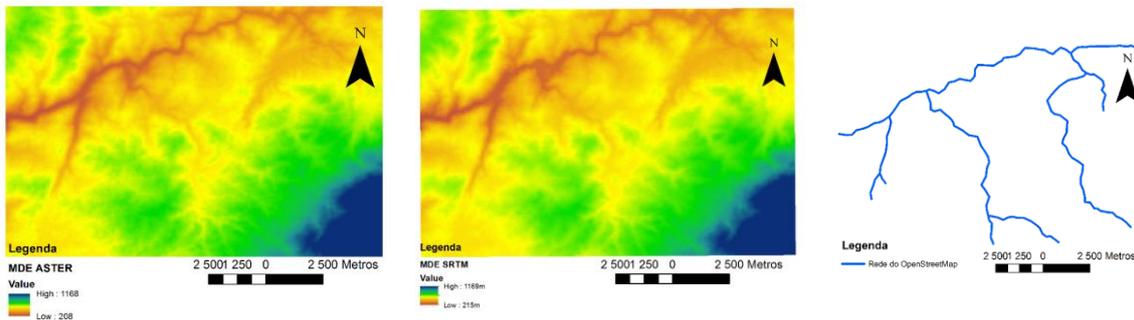


Figura 4 – MDE ASTER e SRTM e rede hidrográfica do OSM

3.3 Exatidão posicional das redes hidrográficas

Os MDE globais foram convertidos num ficheiro de pontos com valor de elevação associado, pontos esses posicionados no centróide de cada píxel que o gerou, originando assim uma amostra regular de pontos de elevação. A Figura 5a) mostra uma porção do MDE convertido em pontos. De seguida, de acordo com a metodologia descrita, foi feita uma interpolação utilizando os respetivos pontos de elevação conhecida e as linhas de água do OSM, obtendo-se dois novos modelos, respetivamente com os dados provenientes do ASTER e do SRTM e do OSM. A Figura 5b) mostra os dados utilizados no método de interpolação para a reconstrução dos MDE.

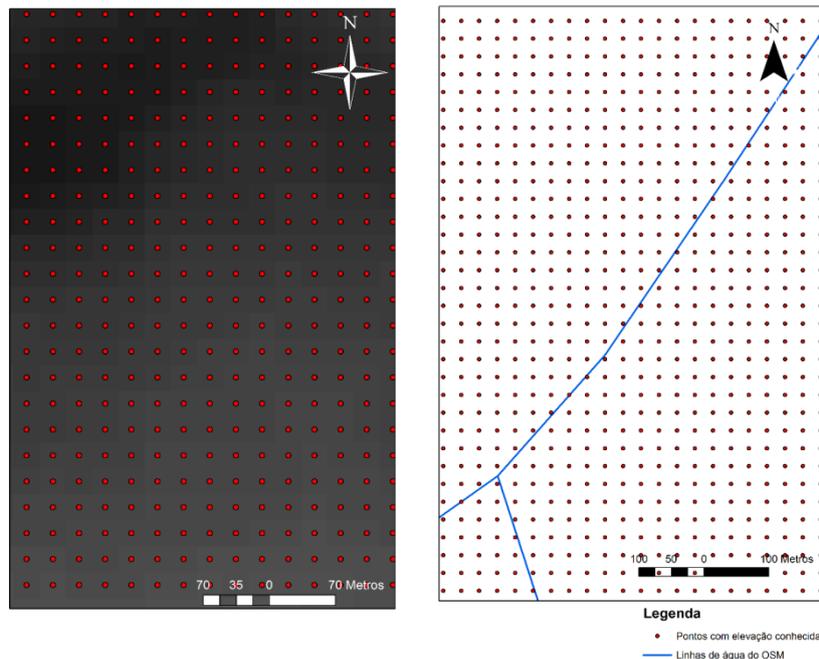


Figura 5 – a) MDE convertido em pontos com elevação conhecida; b) Extrato de uma das zonas da área de estudo com os pontos de elevação conhecida extraídos de um dos MDE e as linhas de água do OSM

Para a extração das redes de drenagem dos MDE, como já foi mencionado anteriormente, foi necessário definir um nível crítico (nc) que corresponde a um valor inteiro de píxeis que valida as linhas de água. Foram escolhidos os níveis críticos utilizados em estudo anterior (Monteiro *et al.*, 2015). Para o MDE ASTER, foram escolhidos os níveis críticos de 45, 63 e 90 píxeis, já para o MDE SRTM foram escolhidos os níveis críticos de 5, 7 e 10 píxeis. A escolha dos níveis críticos teve em conta dois fatores: produzir redes hidrográficas com um nível de detalhe similar à rede hidrográfica de referência e também a diferente resolução espacial dos dois MDE. Por conseguinte, os níveis críticos definidos para o MDE ASTER resultam da multiplicação por nove dos níveis críticos escolhidos para o MDE SRTM. As redes hidrográficas são



extraídas impondo uma condição à matriz de acumulação de escoamento que diz que, o valor do píxel deverá ser superior ao nível crítico definido.

Para avaliar a exatidão posicional das redes hidrográficas originais e as obtidas com os novos modelos, foi determinada a distância horizontal das redes extraídas dos MDE modificados e a rede de referência, utilizando-se a metodologia descrita anteriormente. A determinação da distância horizontal que separa a rede derivada de um MDE e a rede de referência é dada pelo comprimento entre os pontos médios de cada segmento que forma a linha dos MDE até ao ponto mais próximo da rede de referência, considerando um raio de abrangência máximo e que neste estudo foi considerado de 200m. Determinaram-se os parâmetros estatísticos média das distâncias (M) e o desvio padrão (σ), para cada rede gerada pelo nível crítico considerado e para cada MDE.

4. Resultados e discussão

Os resultados obtidos mostram que a exatidão posicional das linhas de água extraídas dos MDE transformados é maior que a exatidão posicional das redes hidrográficas extraídas dos MDE originais. O Quadro 1 apresenta os resultados obtidos para cada nível crítico considerado para os MDE originais e para os MDE transformados. Globalmente, observa-se uma diminuição dos valores do desvio padrão e da média aritmética da distância que separa a rede hidrográfica extraída dos MDE transformados e a linha de referência, relativamente aos correspondentes valores obtidos para os MDE originais, em todos os casos analisados.

Quadro 1 – Valores da média e do desvio padrão da distância horizontal entre as linhas de água extraídas dos MDE originais e MDE transformados, e a rede hidrográfica de referência

MDE	nc	MED originais		MDE transformados		Variações	
		M_o [m]	σ_o [m]	M_t [m]	σ_t [m]	ΔM [m]	$\Delta \sigma$ [m]
ASTER	45	41,3	41,8	34,8	37,0	6,5	4,8
	63	39,4	40,0	34,1	36,3	5,3	3,7
	90	37,8	37,8	33,3	36,3	3,5	1,5
SRTM	5	40,8	43,0	40,4	39,1	0,4	3,9
	7	38,7	40,2	37,0	37,7	1,7	2,5
	10	35,4	37,9	35,4	36,7	0,0	1,2

Observa-se ainda que para os mesmos níveis críticos essas variações são de maior amplitude para os MDE ASTER que para os MDE SRTM, o que nos leva a concluir que a transformação dos MDE com a inclusão da informação do *OpenStreetMap* é mais vantajosa para o MDE ASTER do que para o MDE SRTM. No estudo previamente realizado (Monteiro *et al.*, 2015) concluiu-se que as redes derivadas do MDE SRTM apresentavam uma maior exatidão posicional que as redes derivadas do MDE ASTER. Assim, pode concluir-se que neste caso, a introdução de informação adicional sobre a posição de alguns cursos de água (linhas de água do OSM) melhorou mais o MDE que produzia redes com menor exatidão posicional (MDE ASTER).

Observando a coluna 3 e 5 do Quadro1, onde se apresenta a média das distâncias das linhas de água extraídas dos MDE originais (coluna 3) e dos MDE transformados (coluna 5), constata-se que as linhas de água derivadas do MDE originais que apresentavam os piores resultados, com a transformação dos modelos passaram a produzir os melhores resultados. E isto acontece para os dados ASTER. Analisando ainda o Quadro 1 observa-se que o valor mais elevado das diferenças do desvio padrão para o MDE ASTER é obtido para o nível crítico 45, com um valor de 4,8 m, enquanto a variação para nível crítico correspondente do MDE SRTM foi menor, com um valor de 3,9m. Em relação à variação obtida para a média aritmética, verifica-se que as maiores variações também se obtêm para as linhas de água extraídas do

MDE ASTER, obtendo-se o maior valor para o nível crítico de 45 píxeis, onde a variação foi de 6,5m. Já a variação obtida para o nível crítico corresponde no MDE SRTM foi apenas de 0,4m.

Visualmente também se pode observar que a posição das linhas de água melhorou particularmente nas zonas onde existia informação OSM, essas zonas correspondem aos rios principais da área de estudo, rio Mondego e respetivos afluentes. Na Figura 6a) observa-se um melhor posicionamento da linha de água do MDE ASTER transformado (a vermelho) que a linha derivada do MDE ASTER original (violeta). Na Figura 6b), observa-se o posicionamento das linhas derivadas dos MDE transformados ASTER (vermelho) e SRTM (verde) relativamente à rede de referência (azul). Verifica-se um melhor posicionamento da linha de água extraída do MDE ASTER transformado, o que está de acordo com a análise estatística efetuada.

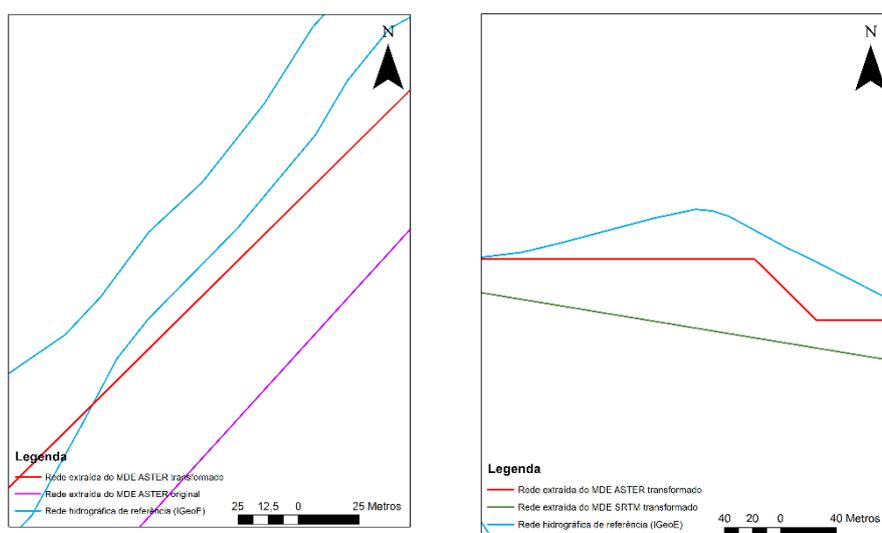


Figura 6 – a) Linhas de água derivadas dos MDE ASTER original (violeta) e transformado (vermelho); b) Comparação das linhas de águas derivadas dos MDE transformados ASTER (vermelho) e SRTM (verde)

5. Conclusões

O estudo desenvolvido permite concluir que na área estudada a inserção das linhas de água extraídas do OSM nos MDE globais melhoram a exatidão posicional das linhas de água extraídas dos modelos que resultam da combinação dessas duas fontes de dados de livre acesso. Para os níveis críticos utilizados conclui-se que o MDE ASTER consegue tirar maior vantagem da transformação do modelo que o MDE SRTM pois o desvio padrão obtido para o MDE ASTER transformado é quase sempre de menor valor que o desvio padrão obtido para o MDE SRTM transformado. Visto que em estudo anterior (Monteiro *et al.*, 2015) as linhas de água derivadas do MDE ASTER tinham menor exatidão posicional que as linhas derivadas do MDE SRTM, com a reconstrução dos modelos, aquele que apresentava os piores resultados (ASTER), passou a ser o que apresentou os melhores pois teve mais a melhorar em termos de exatidão posicional.

O estudo também permitiu verificar que a melhoria na posição das linhas de água é mais notória nas zonas onde existe informação OSM, ou seja, junto aos rios principais da área de estudo. Em abordagens posteriores será interessante analisar se com amostras semelhantes em número de pontos para os dois modelos digitais de elevação, os resultados produzidos seriam semelhantes. A aplicação do presente estudo a outras áreas de maior dimensão, com outro tipo de características de relevo vai permitir averiguar se a fusão destas duas fontes de dados de livre acesso (MDE ASTER e SRTM e dados do OSM) é também vantajosa e se a melhoria conseguida é variável em função das características e dimensão da área de estudo, tendo presente que, essa melhoria estará sempre dependente da exatidão posicional das linhas de água disponíveis no *OpenStreetMap* para a área estudada e também da completude, ou seja, a qualidade da informação disponível no OSM é determinante para a utilidade deste processo.



Agradecimentos

Agradece-se Instituto Geográfico do Exército (IGeoE) a cedência da rede hidrográfica correspondente à folha nº 201 da série cartográfica M888 à escala 1/25 000.

Referências Bibliográficas

- Cipeluch, B., Jacob, R., Winstanley, A. e Mooney, P. (2010). Comparison of the accuracy of OpenStreetMap for Ireland with Google Maps and Bing Maps. In: N. J. Tate and P. F. Fisher (eds.), *Proceedings, Ninth International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, Accuracy 2010*, Leicester, UK, July 20-23, 337-340, 2.
- Fonte, C.C., Bastin, L., See, L., Foody, G. e Lupia, F. (2015). Usability of VGI for Validation of Land Cover Maps. *International Journal of Geographic Information Science*. 29 (7), 1260-1291.
- Girres, J.E. e Touya, G. (2010). Quality assessment of the French OpenStreetMap dataset, *Transactions in GIS*, 14 (4), 435-459.
- Goodchild, Michael F. (2007). Citizens as Sensors: The World of Volunteered Geography. *GeoJournal* 69 (4): 211-21. doi:10.1007/s10708-007-9111-y.
- Gopinath, G., Swetha, T.V. e Ashitha, M.K. (2014). Automated extraction of watershed boundary and drainage network from SRTM and comparison with survey of India Toposheet, *Arab Journal. Geosci.*, 7, 2625-2632.
- Haklay, M. (2010). How good volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37 (4), 682-703.
- Hirano, A., Welch, R. e Lang, H. (2003). Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, 356-370.
- Hutchinson, M.F., Xu, T. e Stein, J.A. (2011). Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure. In: *Geomorphometry 2011*, edited by T. Hengel, I.S. Evans, J.P. Wilson and M. Gould, Redlands, California, 19-22.
- Kenward, T., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F. e Fielding, E. (2000). Effects of digital elevation model accuracy on hydrologic predictions. *Remote Sensing of Environment*, 74 (3), 432-444.
- Mark, D.M. (1984). Automated detection of drainage networks from digital elevation models. *Cartographica* 21, 168-178.
- Monteiro, E.V., Fonte, C.C. e Pedroso de Lima, J.L.M. (2015). Assessing positional accuracy of drainage networks extracted from ASTER, SRTM and OpenStreetMap, *Proceedings of AGILE 2015*, Lisbon, Portugal, June 9-12.
- Nikolakopoulos, K.G. e Chrysoulakis, N. (2006). Updating the 1:50 000 topographic maps using ASTER and SRTM DEM: the case of Athens, Greece. *Remote Sensing for Ehlens, Ulrich Michel, Proceedings of SPIE Vol. 6366* 636606-1.
- O'Callaghan, J. e Mark, D. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics & Image Processing*, 28, 323-344.
- Tarboton, D.G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, *Water Resour. Res.*, 33(2), 309-319.
- Zhang, J.X., Chang, K.T. e Wu, J.Q. (2008). Effects of DEM resolution and source on soil erosion modelling: a case study using the WEPP model. *International Journal of Geographical Science*, 22 (8), 925-942.

Utilização de Informação Geográfica Voluntária para aumentar a exatidão de redes hidrográficas extraídas de Modelos Digitais de Elevação

Elisabete V. MONTEIRO^{1,2*}, Cidália C. FONTE^{3,2} e João L. M. PEDROSO DE LIMA^{4,5}

¹UDI/IPG-Unidade de Desenvolvimento do Interior do Instituto Politécnico da Guarda

²INESC-Coimbra-Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra

³Departamento de Matemática, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

⁴Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

⁵IMAR – Instituto do Mar e MARE – Centro de Ciências do Mar e do Ambiente, c/o Dep. Ciências da Vida, Coimbra

(emonteiro@ipg.pt; cfonte@mat.uc.pt; plima@dec.uc.pt)

Objetivo: Verificar se as linhas de água extraídas de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) criados a partir dos MDEs globais ASTER e SRTM e de linhas de água existentes no projeto colaborativo OpenStreetMap (OSM) possuem maior exatidão vertical que as linhas de água extraídas dos MDEs originais.

Metodologia: A reconstrução dos MDEs ASTER e SRTM é feita utilizando um interpolador que utiliza pontos cotados extraídos dos modelos originais ASTER e SRTM e as linhas de água do OSM. Após a reconstrução dos modelos é calculada a diferença altimétrica entre um MDE considerado de referência e os MDEs ASTER e SRTM originais e modificados. As redes hidrográficas são extraídas dos MDEs originais e dos transformados e são calculadas as diferenças altimétricas entre a rede extraída do MDE de referência e as redes extraídas dos MDEs originais e modificados, sendo calculado a média, o desvio padrão e os valores máximo e mínimo.

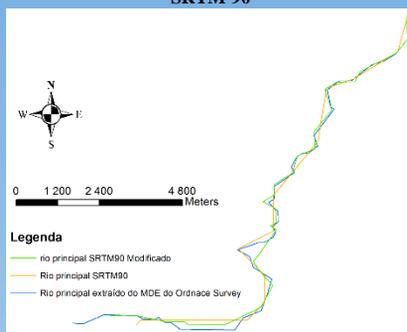
Fluxograma



Área de estudo: A metodologia foi aplicada a uma bacia localizada na Escócia (Reino Unido) com uma área aproximada de 42 km², gerada usando a ferramenta “Basin” do software ArcGIS.

PLANIMETRIA – Rio Principal

SRTM 90



SRTM 30

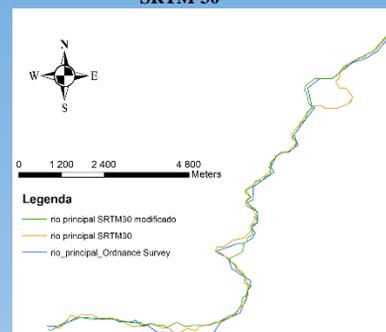


Tabela 1: Diferença altimétrica entre as linhas de água extraídas dos MDE originais e transformados

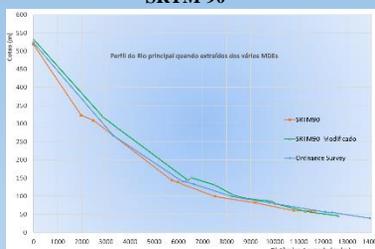
DIFERENÇAS ALTIMÉTRICAS ENTRE AS LINHAS DE ÁGUA		Análise Estatística			
MDE DE REFERÊNCIA	MDEs Transformados	média (m)	desvio padrão (m)	máximo (m)	mínimo (m)
MDE ORDNANCE SURVEY	SRTM 90	-6,1	11,8	9	-49
	SRTM 30	-0,6	5,2	17	-19
	ASTER	11,8	8,0	28	-4
MDEs Originais	média (m)				
	desvio padrão (m)				
	máximo (m)				
MDE ORDNANCE SURVEY	SRTM 90	-9,8	9,8	4	-34
	SRTM 30	-5,3	6,3	4	-25
	ASTER	2,1	6,5	17	-17

Tabela 2: Diferença altimétrica entre os MDEs originais e transformados

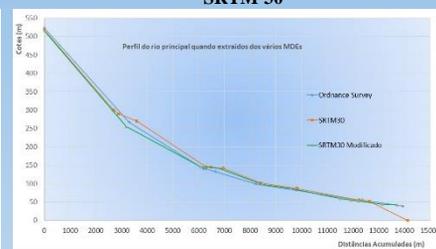
DIFERENÇAS ALTIMÉTRICAS ENTRE OS MODELOS		Análise Estatística			
MDE DE REFERÊNCIA	MDEs Transformados	média (m)	desvio padrão (m)	máximo (m)	mínimo (m)
MDE ORDNANCE SURVEY	SRTM 90	2,8	28,8	59	-54
	SRTM 30	2,5	29,5	53	-49
	ASTER	3,4	23,0	48	-39
MDEs Originais	média (m)				
	desvio padrão (m)				
	máximo (m)				
MDE ORDNANCE SURVEY	SRTM 90	-3,8	30,4	75	-77
	SRTM 30	-3,0	28,4	47	-62
	ASTER	0,9	22,9	45	-47

ALTIMETRIA – Rio Principal

SRTM 90



SRTM 30



Análise dos resultados: Verifica-se uma melhoria na exatidão vertical dos modelos transformados SRTM 30 e SRTM 90, o mesmo não acontece com o MDE ASTER onde o modelo original possui menor diferença média relativamente ao MDE de referência do que o modelo transformado. Assim, o MDE ASTER não tira partido da inclusão das linhas de água do OSM no processo de transformação, pelo contrário agrava-a. A média das diferenças altimétricas das linhas de água extraídas de cada modelo em relação à rede de referência diminui para as linhas extraídas dos MDEs SRTM 30 original e transformado com os valores, respetivamente, de -5,3 m para -0,6 m, e para as linhas extraídas do SRTM 90 original e transformado com os valores de, respetivamente, -9,8 m para -6,1m. Já a média das diferenças entre a rede de referência e as linhas extraídas do modelo ASTER original e ASTER modificado apresenta os valores de 2,1 m e 11,8 m, respetivamente. Um estudo anterior (Monteiro et al., 2017) demonstrou para a mesma área de estudo, que em termos planimétricos a exatidão aumentava com a transformação dos modelos quer para o ASTER quer para o SRTM. Verifica-se assim que em termos altimétricos o mesmo não acontece. De realçar também que planimetricamente e altimetricamente o modelo SRTM possui um melhor desempenho na metodologia aplicada sendo que, de acordo com a Tabela 2, o SRTM 30 possui uma melhor exatidão que o SRTM 90.

Referências

Monteiro, E.S.V., Fonte, C.C. e de Lima, J.L.M.P., 2017. Improving the Positional Accuracy of Drainage Networks Extracted from Global Digital Elevation Models using OpenStreetMap Data, Journal of Hydrology and Hydromechanics. Aceite para publicação a 30/11/2017.

Influência da geomorfologia no transporte e deposição de materiais litíferos em bacias hidrográficas - Caso de estudo de uma mina localizada na região da Guarda

Elisabete V. MONTEIRO^{1,2*}, António F. MONTEIRO¹, Ana M. ANTÃO^{1,3} e Ana M. FERREIRA⁴

¹IPG/UDI Instituto Politécnico da Guarda e ²INESC (Coimbra)

¹IPG/UDI Instituto Politécnico da Guarda e ³CGEO (UC)

⁴Instituto Politécnico de Castelo Branco

(emonteiro@ipg.pt; amonteiro@ipg.pt; anantao@ipg.pt; amferreira@ipcb.pt)

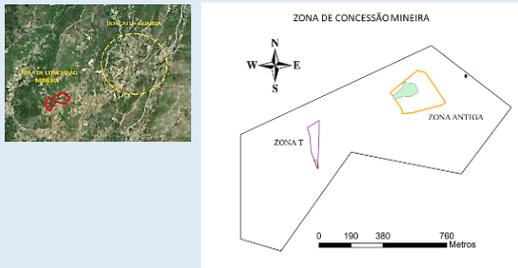
Projeto n.º 023720 (AAC/02/SAICT/2016)
Apoio no âmbito do sistema de incentivos do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização

Objectivo: A exploração mineira a céu aberto da mina C57 causa escorrências, transporte e acumulações de saibros graníticos ricos em feldspatos litíferos ao longo das linhas de água. Estes materiais provocam um efeito erosivo, acumulando-se em zonas habitacionais e/ou campos agrícolas localizados a jusante das zonas de exploração. O presente estudo visa analisar a influência da geomorfologia e do relevo topográfico no transporte e acumulação deste tipo de materiais ao longo das redes hidrográficas.

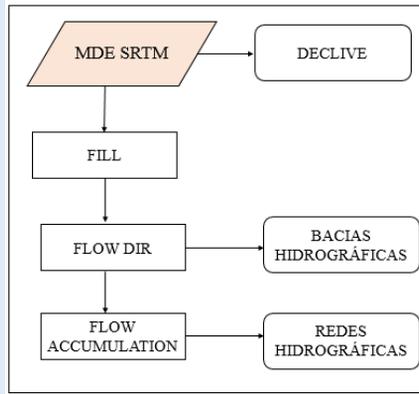
Metodologia: Foi construído o Modelo Digital de Elevação (MDE), SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), através do qual se extraiu a direção do escoamento ao longo da superfície. De seguida, foram geradas zonas de acumulação de escoamento que servirão de base para a extração da rede hidrográfica. As bacias hidrográficas são geradas tendo por base o MDE. Todo o processamento é feito em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (software ArcGIS®) com recurso a ferramentas que contêm algoritmos de processamento hidrológico. O sistema de fracturação da zona de estudo foi feito através de técnicas de fotointerpretação de imagens aéreas, sustentados pelos levantamentos de campo realizados por [3] nos finais do séc. XX.

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

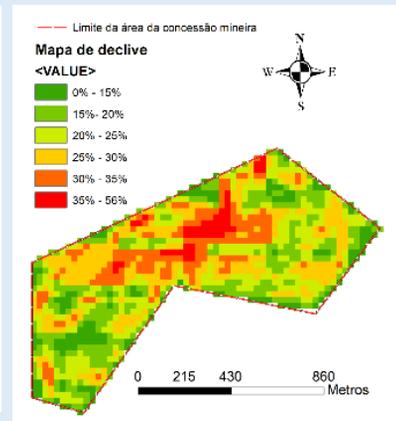
A área de concessão mineira localiza-se em Gonçalo, distrito da GUARDA.



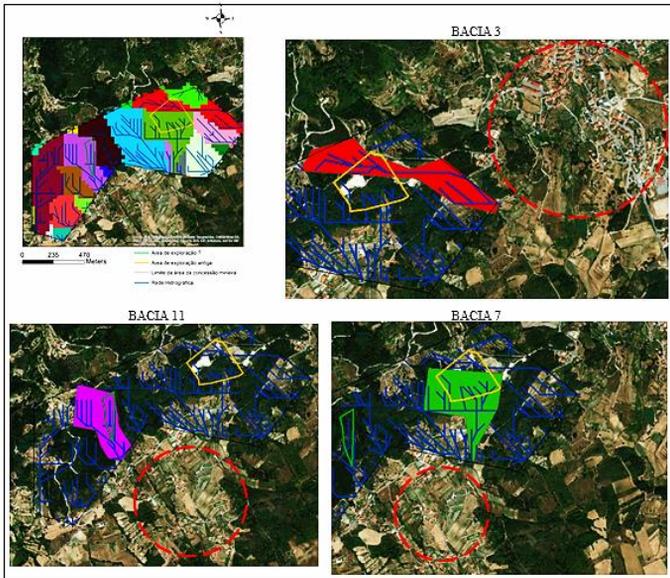
FLUXOGRAMA



MAPA DE DECLIVE



ZONAS AFECTADAS PELO TRANSPORTE DE MATERIAIS LITÍFEROS



LOCALIZAÇÃO DE FRACTURAS

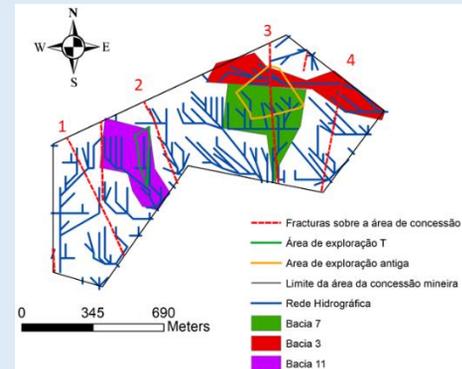


TABELA 1: Comprimento, área, densidade de drenagem (D_d) e fator de forma (k_f)

Bacias	Comprimento total dos cursos de água (km)	Área da bacia (km ²)	D_d (km/km ²)	Comprimento do curso de água principal (km)	k_f
3	1,8	0,09	20	0,9	0,11
7	1,9	0,1	19	0,6	0,28
11	1,6	0,08	20	0,5	0,32

Análise dos resultados:

Das três bacias que interseam as duas áreas de exploração (Zona T e Zona Antiga), a que apresenta maior valor de área é a bacia 7 (0,1km²), apresentando um menor valor para a densidade de drenagem ($D_d=19$ km/km²). Os valores da D_d para as 3 bacias apresentam-se muito próximos e são valores que correspondem a bacias excepcionalmente bem drenadas. A bacia 3 apresenta um fator de forma [1,2] menor (0,11), seguido da bacia 7 (0,28) e da bacia 11, que apresenta um fator de forma maior, igual a 0,32. Assim, e tendo em conta que as três bacias apresentam áreas semelhantes, pode-se concluir que a bacia 3 (bacia estreita e alongada), relativamente às outras duas, se encontra menos sujeita a ocorrência de cheias, havendo menor probabilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo simultaneamente toda a sua extensão. Atendendo a que a densidade de drenagem nas bacias é elevada, poderá haver acumulação de materiais litíferos a jusante das respetivas linhas de água. Refira-se ainda que, as bacias que podem provocar um efeito direto e imediato de deposição de sedimentos junto de habitações são as bacias 11 e 7, dado que as mesmas localizam-se a jusante das linhas de água principais da respetivas bacias. Já a bacia 3 afeta de forma mais direta campos agrícolas, pois a vila de Gonçalo localiza-se a Nordeste em relação ao exutório. Pela análise de fotografias aéreas da região e pelos levantamentos efetuados por [3], verifica-se que os alinhamentos de fraturas 2 e 3 são coincidentes com pequenos vales encaixados na zona de concessão mineira, sendo o alinhamento de fratura 3 o mais importante em termos de drenagem de água pluviais que escoam da atual zona de exploração (Zona Antiga), pelo que deverá merecer especial cuidado. Prevê-se o dimensionamento de canais em superfície livre e bacias de retenção em cascata de forma a minimizar o efeito erosivo e ambiental nos terrenos a jusante.

[1] Horton, R.F., 1945. "Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology", Geological Society of America Bulletin, 56, 275-370.
[2] Schumm, S.A., 1956. "Evolution of drainage systems & slopes in Badlands at Perth Anby, New Jersey", Bulletin of the Geological Society of America.
[3] Fariña Ramos, J., 2010. "Aplitepegmatitos com mineralizações de metais raros de Seixo Amarelo - Gonçalo. O recurso geológico." In J. Neiva, A. Reibeiro, L. Victor, F. Noronha, M. Ramalho (Coords), Ciências geológicas - Ensino e Investigação e sua História. Vol. II, 121-130.



VARIABILITY OF TOPOGRAPHIC PARAMETERS OBTAINED FROM THE ASTER AND SRTM DIGITAL ELEVATION MODELS

E. S. V., MONTEIRO⁽¹⁾, C. C., FONTE⁽²⁾, S. M. S., GUERRA⁽³⁾ & J. M. P., DE LIMA⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Instituto Politécnico da Guarda, INESC - Coimbra, Portugal, emonteiro@ipg.pt ⁽²⁾ Departamento de Matemática da Universidade de Coimbra, INESC - Coimbra, Portugal, cfonte@mat.uc.pt ⁽³⁾ Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brazil, smsguerra@hotmail.com ⁽⁴⁾ Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, IMAR, Portugal, plima@dec.uc.pt

To model drainage basins hydrologic behaviour it is necessary to know their physiographic characteristics, which are defined by topographic parameters or indices and enable their morphometric analysis.

This study aims to make a comparative analysis of the variability of topographic parameters extracted from the respectively global and near global ASTER and SRTM DEMs. The delineation of basins will be made using both DEMs and some topographic parameters of the basin will be computed (e.g. area, perimeter). The objective is to analyze to what extent topographic parameters are changed and to identify the areas where there is uncertainty. Extracted drainage networks from both terrain models and respective computed parameters that characterized the basins and the river network are compared and analysed.

The study will be applied to two drainage basins: one of them located in one region of Brazil other a small rural basin located in mainland of Portugal. These basins have distinct characteristics, namely in terms of relief with mountain areas and flatter lowland areas. Both terrain models were used for the analyses of the two basins. The variability of parameters in some specific areas into watersheds will also be presented.