

Aplicação da Fotogrametria Analítica por VANT na Hidrografia

Paulo NUNES*¹, Sónia GODINHO¹, Alexandre CARVALHO¹, João GASPAR², e João CARVALHO³

¹ Instituto Hidrográfico, Lisboa

² CINAV, Escola Naval, Alfeite, Almada

³ Emílio de Azevedo Campos S.A., Lisboa

(antunes.nunes@hidrografico.pt)

Palavras-chave: VANT, fotogrametria, altimetria, sistemas sondadores multifeixe, modelos digitais de elevação

Resumo: O levantamento fotogramétrico com veículos aéreos não tripulados representa um método de baixo custo para aquisição de dados geográficos de alta resolução espacial. A combinação entre as evoluções tecnológicas dos sensores, a redução da complexidade na operação dos veículos, a proliferação de aplicações para processamento fotogramétrico e a diminuição do custo de aquisição dos veículos aéreos não tripulados permite a utilização desta tipologia de levantamento fotogramétrico com vários fins. Sendo uma tecnologia relativamente recente ainda subsistem dúvidas sobre o nível de precisão que é possível obter com esta metodologia. Todas estas dimensões obrigam a uma análise séria sobre a viabilidade do uso de veículos aéreos não tripulados para aquisição de dados com qualidade posicional compatível com os levantamentos hidrográficos nas zonas de fronteira territorial, zonas intertidais, praias e infraestruturas portuárias. No contexto da hidrografia estas metodologias têm potencial para tornar-se relevantes na aquisição de dados 3D de alta resolução em zonas remotas onde o acesso não é seguro.

O artigo descreve uma análise comparativa entre dados de levantamento fotogramétrico por veículo aéreos não tripulados e levantamento hidrográfico por multifeixe e tem por objetivo avaliar a aplicabilidade da integração dos produtos resultantes do processamento de levantamento fotogramétrico em complemento aos dados recolhidos nos levantamentos topo-hidrográficos do Instituto Hidrográfico.

1. Introdução

A topografia e geodesia têm beneficiado dos desenvolvimentos tecnológicos operados ao nível dos sensores. A evolução da tecnologia torna possível a aquisição de um maior volume de dados com qualidade, adaptados à diversidade de necessidades dos utilizadores.

Os sistemas de sondador multifeixe (SSMF) no caso da hidrografia e os veículos aéreos não tripulados (VANT) no caso da Fotogrametria são exemplos de metodologias que têm apresentado um incremento de utilização e oferecem aos utilizadores produtos de alta densidade.

No presente, os levantamentos fotogramétricos (LF) por VANT são métodos viáveis para a obtenção de nuvens de pontos de alta densidade e geração de modelos digitais de superfície de alta resolução. Os princípios teóricos que sustentam as técnicas não são novos, todavia a evolução dos equipamentos e a maior capacidade computacional de processamento têm permitido melhorar a qualidade dos produtos derivados 2D e 3D. Este incremento de capacidade reflete-se numa aquisição de dados mais rápida e a consequente diminuição dos custos associados ao trabalho de campo.

O Instituto Hidrográfico pela natureza da sua missão realiza normalmente levantamentos hidrográficos (LH) para atualização cartográfica, monitorização de dragagens e obras de hidráulica marinha. Paralelamente realiza levantamentos topográficos de suporte aos LH e à produção de cartografia das zonas adjacentes.

Este caso de estudo pretende avaliar se os produtos derivados através das técnicas da fotogrametria por VANT: nuvens de pontos, ortofotos e modelos digitais de superfície (McGlone, 2013) cumprem os requisitos de posicionamento para trabalhos topográficos de apoio aos LH em zonas de transição terra/água: zonas intertidais, sapais, praias e em zonas de difícil acesso.

O artigo apresenta-se organizado em cinco secções: introdução; a secção Problema e Objetivos dedicada a explicar o problema que se pretende estudar e os objetivos estabelecidos para a análise; a secção da Metodologia onde será apresentada a metodologia adotada; a secção Resultados onde serão expostos e principais resultados obtidos; e por fim uma secção com a conclusão do trabalho.

2. Problema e Objetivos

O trabalho foi desenvolvido para responder à seguinte questão: Os produtos obtidos por fotogrametria aplicada a imagens digitais de VANT garantem a qualidade posicional dos levantamentos topográficos (LT) e permitem gerar modelos digitais de superfície nas zonas de fronteira terra/água compatíveis com os requisitos dos LH? Quais as diferenças entre as superfícies geradas pelas duas metodologias?

Foi com base nestas questões que foi escolhida a área de estudo: uma zona de lodo intertidal situada no concelho do Seixal, junto à Base Hidrográfica da Azinheira (Figura 1).

Esta área apresenta aspetos característicos, tidos em consideração para os objetivos da análise: é uma zona intertidal, lodosa, com muita uniformidade de texturas, de difícil acesso para um LT pedestre ou de moto quatro. A área apresenta infraestruturas que permitem simular a aquisição de dados de posicionamento de infraestruturas portuárias.

Com a análise pretende-se cumprir os seguintes objetivos: (i) Analisar se a exatidão posicional dos produtos derivados de fotogrametria por VANT cumprem os requisitos dos LT para efeitos de Hidrografia; (ii) Verificar a adequabilidade dos produtos derivados da fotogrametria por VANT no enquadramento dos trabalhos topográficos de apoio aos levantamentos hidrográficos.

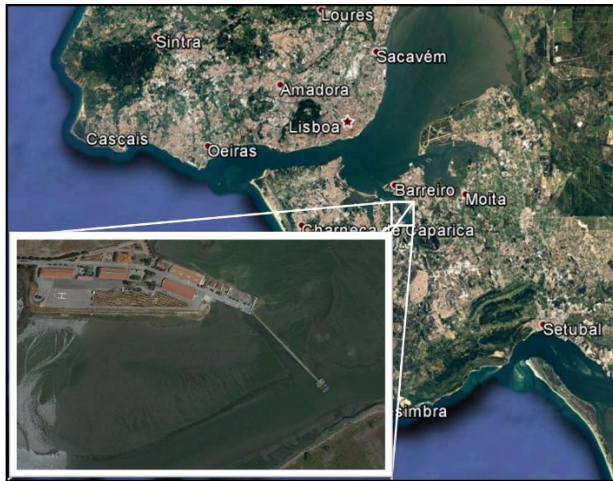


Figura 1 – Área de estudo



Figura 2 – Quadricóptero VANT DJI Phantom 3

3. Metodologia

A metodologia adotada consistiu no planeamento e realização de um levantamento fotogramétrico (LF) com VANT, no processamento das imagens recolhidas através de um software para processamento fotogramétrico e na análise dos produtos derivados. Posteriormente foi realizado um levantamento hidrográfico com SSMF numa área parcial do levantamento fotogramétrico. Os produtos derivados foram comparados a fim de inferir a adequabilidade e possibilidade da sua integração.

3.1 Levantamento Fotogramétrico Aéreo

O VANT utilizado no LF foi o quadricóptero *Phantom 3 Pro* (Figura 2). O *Phantom 3* está equipado de origem com câmara digital - FC300X com as características técnicas apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Características da câmara FC300X

Modelo	Resolução do sensor	Distância Focal	Dimensão do pixel	Pré-calibração
FC300X (3.61 mm)	4000x3000	3.61 mm	1.56x 1.56µm	Não

O equipamento tem integrado sensores de posição e atitude que permitem a aquisição e processamento dos sinais de código dos satélites dos sistemas de posicionamento globais (*Global Positioning Satellite* - GPS e *Global Navigation Satellite System* – GLONASS), e os sinais de atitude adquiridos por sensores *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS). Estes têm a capacidade de medir a aceleração nos três eixos de rotação do VANT, permitindo a determinação da posição e a orientação do equipamento e das imagens adquiridas (DJI, 2018).

3.1.1 – Planeamento do trabalho de campo e aquisição de imagens

O plano de voo e a realização do mesmo, foram efetuados com recurso ao software DroneDeploy. Foi realizado um voo cobrindo uma área de 47.4 m² no dia 14 de abril de 2018, durante o período da baixa-mar. O voo foi conduzido a uma altitude estimada de 28 m (o principal critério para a seleção da altitude do voo foi a segurança do equipamento devido à presença de estruturas com desenvolvimento vertical na área do levantamento, e.g. grua e edifícios); com sobreposição de 60%; com uma dimensão do *pixel* no terreno de 1.36 cm.

3.1.2 – Processamento dos dados

O processamento usou 340 imagens digitais, foi realizado com o software *Agisoft PhotoScan Professional vs.1.4* (versão Trial). Este software comercial de fotogrametria permite o processamento de imagens digitais através de algoritmos proprietários que implementam funções fotogramétricas como a correspondência automática das imagens e a aerotriangulação.

O processamento fotogramétrico com o Agisoft seguiu o fluxo de trabalho recomendado no manual (Agisoft, 2018) que é apresentado nas seções seguintes.

3.1.2.1 – Importação e preparação dos dados

Foi efetuada a importação das imagens selecionadas para processamento; tal como, dos parâmetros registados nos metadados de cada imagem, e.g. distância focal da câmara, coordenadas *World Geodetic System 1984* (WGS84) aproximadas do equipamento no momento da aquisição da imagem, dados de atitude do equipamento, dimensão da imagem. O planeamento e a execução do levantamento deram origem a uma boa sobreposição de imagens com a maior parte da área de levantamento observada em mais de nove imagens (Figura 3).

3.1.2.2 – Processo de orientação das imagens

Foi realizado um alinhamento automático das imagens, de precisão média, com base na localização e correspondência de pontos homólogos em pares de imagens estereoscópicas, e na determinação da posição da câmara para cada imagem, com base nos parâmetros de calibração da câmara. Como resultado deste processamento obteve-se uma nuvem de pontos esparsa e a junção das imagens.

3.1.2.3 – Identificação dos pontos fotogramétricos

Com o objetivo de fixar o mosaico de imagens ao terreno foi realizado o pós-processamento das imagens com recurso a cinco pontos fotogramétricos (PFs) (Figura 4). Os PFs fazem parte da rede local da base hidrográfica e foram coordenados com recurso a um equipamento *Global Navigation and Satellite System* (GNSS) (GPS Geodésico de dupla frequência) e software de processamento das respetivas observações, no sistema de referência ETRS89/PT-TM06. As cotas dos pontos foram obtidas por nivelamento geométrico realizado em agosto de 2010. O sistema referência vertical usado foi o nível médio adotado (NMA) para Portugal Continental – Datum de Cascais. Os PFs utilizados apresentam precisão horizontal inferior a 3 cm (GNSS) e vertical inferior a 0.8 cm (Nivelamento geométrico), compatíveis com o rigor exigido no processo. Para facilitar a identificação dos PFs nas imagens, foram colocadas chapas em acrílico (de cor cinza e forma quadrada) antes da realização do voo.

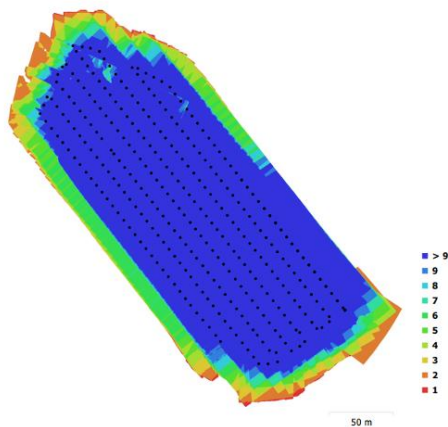


Figura 3 – Posição da câmara e sobreposição das imagens



Figura 4 – Localização dos PFs e Pontos de verificação

Os PFs estabelecem uma relação entre as imagens e o terreno, com elevado rigor, a partir das coordenadas do ponto a utilizar. Desta forma é possível realizar o ajustamento das imagens, em que todas as coordenadas dos pixels das imagens serão corrigidas através de coordenadas conhecidas no terreno. A análise da distribuição dos PFs na Figura 4 leva à conclusão de que a distribuição não é a mais adequada, nem o número de PFs seria o suficiente para uma aerotriangulação com um rigor posicional elevado. Contudo, a área do levantamento foi escolhida por ser de acesso difícil e perigoso (uma zona lodosa sob o efeito da maré) com o propósito de analisar os resultados numa situação em que a zona do LF não permite o acesso seguro para implantação correta de PFs ou a coordenação de pontos. Os pontos de verificação foram coordenados em 16 de junho com um equipamento GNSS (Trimble R2) realizando-se pós processamento das observações em relativo utilizando as estações da rede RENE. Estes pontos serviram para estimar a precisão do posicionamento horizontal e vertical da nuvem de pontos do LF.

3.1.2.4 – Processo de geração da nuvem de pontos densa

Com base na posição relativa de cada imagem foi possível determinar a informação da elevação dos pontos, gerando uma nuvem de pontos densa, com 16 971 716 pontos (Figura 5). A nuvem de pontos gerada foi exportada para um ficheiro no formato LAS (*point cloud data*), para posterior comparação com outros produtos. O Modelo Digital de Superfície (MDS) obtido apresenta uma resolução espacial de 5.45 cm, com uma densidade média de 337 pontos por m².



Figura 5 – Nuvem de pontos densa

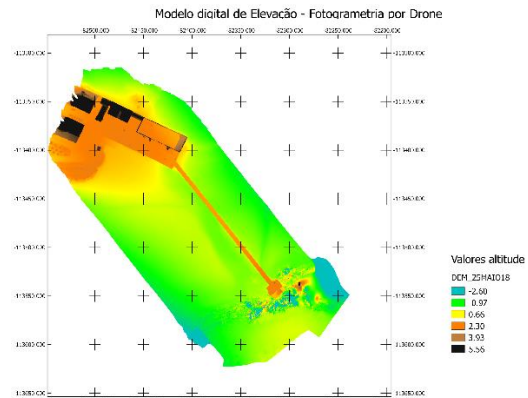


Figura 6 – MDS obtido a partir das imagens

A nuvem de pontos do LF apresenta uma elevada densidade que torna difícil a sua manipulação em ambiente SIG e a posterior comparação com dados de SSMF. Para resolver esta questão foi feita a reamostragem através de uma rotina em Python, a qual aplica uma média móvel à nuvem de pontos do LF e aos dados de SSMF para obter o valor médio de elevação numa célula regular de 25 cm por 25 cm. A resolução escolhida teve por base as resoluções das superfícies batimétricas derivadas dos LH para levantamentos de ordem especial nas profundidades médias da área de trabalho. Para comparação com o Modelo Digital de Superfície (MDS) do LH os valores de elevação do MDS LF (reamostrado) foram reduzidos ao nível do Zero Hidrográfico.

3.1 Levantamento Hidrográfico

O Levantamento Hidrográfico foi realizado em 09 de agosto de 2018 com um sistema sondador multifeixe Kongsberg EM 3002. O posicionamento foi realizado através de GNSS aplicando uma metodologia de posicionamento relativo - *Real Time Kinematic* (RTK). A redução dos valores das sondas ao Zero Hidrográfico (ZH) foi realizado pela aplicação da ondulação do geóide do modelo GeoPT08 às altitudes elipsoidais registadas por RTK.

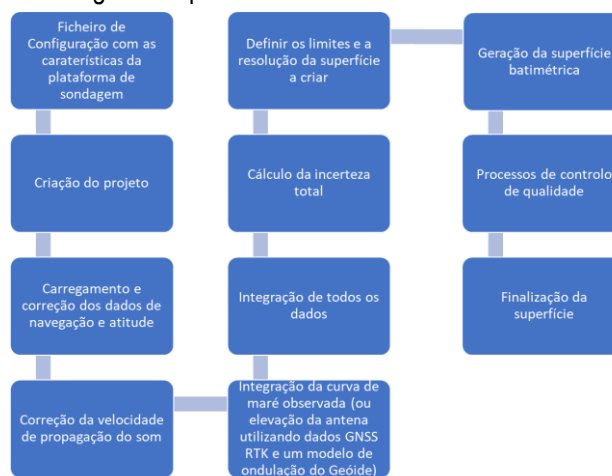


Figura 7 – CARIS HIPS Cube Bathymetry Processing Workflow; extraído do manual do CARIS HIPS

O processamento dos dados e geração das superfícies batimétricas finais seguiu o processo implementado no Instituto Hidrográfico (Figura 7).

A geração das superfícies batimétricas é feita com recurso a um algoritmo de modelação batimétrico CUBE (*Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator*). O CUBE é um algoritmo de interpolação que recorre a técnicas de geoestatística para estimar o valor da profundidade nos nós de uma grelha regular a partir das sondas medidas pelos sistemas de multifeixe, proposto por Calder em 2003 para o processamento automático de dados de SSMF. O algoritmo parte de uma estimativa dos erros planimétricos e altimétricos associados a cada sonda medida com base num modelo de propagação de variâncias associadas a cada um dos elementos que contribuem para o erro total. Depois de quantificada a incerteza total vertical e horizontal associada a cada ponto são determinados os pesos de cada sonda no valor da profundidade do nó com base em funções que levam em linha de conta a distância da sonda ao nó e a incerteza vertical. A estimação da profundidade do nó é feita com base num estimador *Bayesiano – Dynamic Linear Model*. (Calder, 2003) O algoritmo recorre ainda ao teste de hipóteses que permitem a escolha da mais provável para o valor da profundidade, tendo resultados sido comprovados em vários estudos, com diferentes sistemas e tipos de orografia do fundo do mar. Atualmente, é reconhecido pelos principais serviços hidrográficos internacionais como um algoritmo fidedigno para determinar o valor da profundidade a partir de dados de multifeixe de alta densidade. O processo está validado e permite cumprir os requisitos de levantamentos hidrográficos de ordem especial. Não cabe no âmbito deste artigo explicar em pormenor o algoritmo CUBE nem a metodologia dos levantamentos hidrográficos, para uma explicação mais aprofundada poderá ser consultada a informação disponível no CUBE Manual e nas fontes que o descrevem (Calder, 2003, Calder e Mayer, 2003, Vicente, 2011). Além da superfície batimétrica gerada pelo algoritmo CUBE com uma resolução de 25 cm foram extraídas todas as sondas observadas, devidamente georreferenciadas e reduzidas do efeito da maré (GNSS RTK). Este segundo conjunto de pontos foi sujeito à aplicação da média móvel seguindo o mesmo processo aplicado à nuvem densa. Esta metodologia permite a comparação de dados de LF e LH sujeitos ao mesmo algoritmo de geração de MDS. A Figura 8 apresenta a superfície batimétrica obtida pelo algoritmo CUBE.

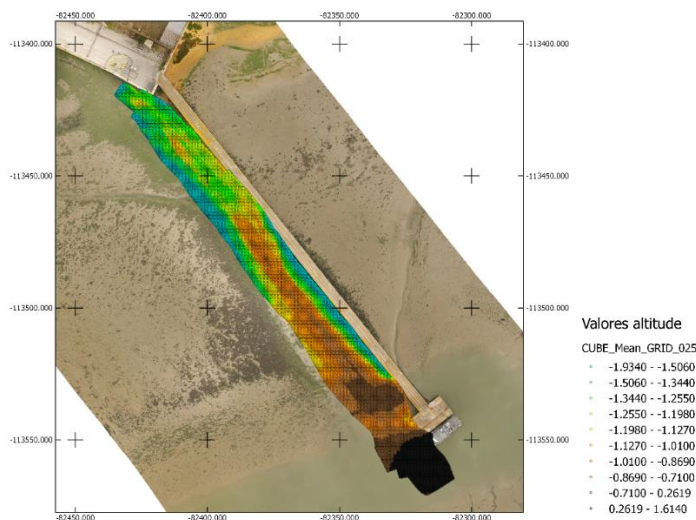


Figura 8 – Superfície batimétrica obtida com a aplicação do Algoritmo CUBE implementado na aplicação CARIS HIPS

4. Resultados

A avaliação da qualidade posicional dos resultados da fotogrametria por VANT foi realizada através da comparação dos produtos derivados, com informação de referência recolhida com recurso a equipamentos GNSS.

Como limiar de incertezas admissíveis, considera-se os 50 cm de incerteza horizontal previstos na Normas Técnicas para o planeamento, execução e processamento de levantamentos hidrográficos (NT.HI.01) para pontos de apoio e pontos hidrográficos (Instituto Hidrográfico, 2008). Outra referência relevante são as Especificações Técnicas do Modelo Topográfico MTop-ET-V0.4 (em fase de aprovação pela Direção-Geral do Território (DGT)). No MTop é considerado uma exatidão posicional planimétrica de 30 cm e altimétrica de 40 cm para Nível de Detalhe 1 (NdD1) (DGT, 2018). Através da análise do erro médio quadrático

(EMQ) dos pontos de verificação (Quadro 2), verifica-se que o ajustamento do mosaico com base nos PFs permitiu obter EMQ Total inferior a 20 centímetros, compatível com o rigor exigido nas duas referências apresentadas atrás.

Quadro 2 – Erro médio quadrático determinado nos Pontos Fotogramétricos e Pontos de Verificação

	N.º Pontos	Erro X (cm)	Erro Y (cm)	Erro Z (cm)	Total (cm)
Pontos Fotogramétricos	5	0.46	0.61	6.75	6.80
Pontos de Verificação	6	5.4	6.8	13	15.6



Figura 9 – Comparação com levantamento topográfico GNSS

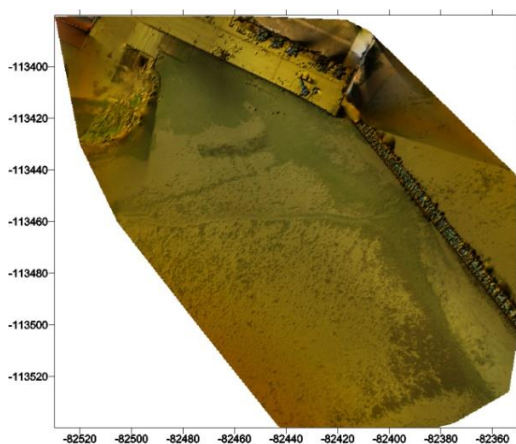


Figura 10 – Diferenças entre o MDS LF e MDS LS

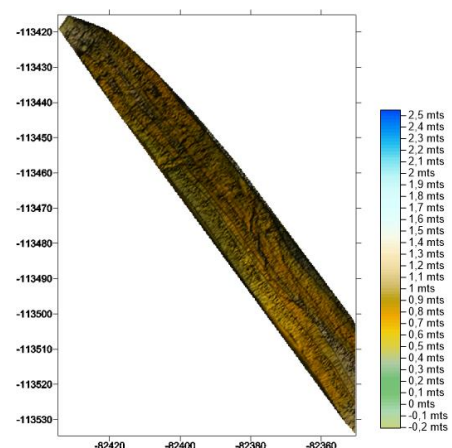


Figura 11 – Diferenças entre o MDS LH e MDS LF

A ortofoto gerada no processo foi comparada com o levantamento topográfico realizado na mesma zona, verificando-se que a diferença de posicionamento entre as estruturas representadas na ortofoto e as linhas recolhidas no levantamento topográfico GNSS, apresentam valores inferiores a 50 cm (Figura 9).

Uma das comparações que foi considerada pertinente neste trabalho foi a densidade de dados (número de amostras utilizadas para calcular o valor de elevação em cada célula dos MDS). Em média a superfície resultante da aplicação do algoritmo da média móvel ao LF apresenta 24 pontos por célula (p/c) e no LH 59 p/c. O valor máximo de pontos por célula no LF é de 646 p/c, bastante superior ao do SSMF com 273 p/c. O resultado justifica-se porque existem muitas células que correspondem à projeção de objetos com um grande desenvolvimento vertical, como o caso dos edifícios e do pontão existente na área.

As diferenças verticais nas zonas de sobreposição dos MDS (resolução: 25 cm) do LF e LH são da ordem dos 70 centímetros (Figura 11). Um valor elevado justificado pela ausência de pontos fotogramétricos nas imediações. Para efeito de análise dos resultados, o MDS do LF foi comparado com um levantamento de Laser Scan (LS) realizado na área em 04 de abril de 2018 tendo-se encontrado diferenças verticais da ordem dos 10 centímetros nas localizações próximas dos pontos fotogramétricos e da ordem dos 70 centímetros na zona do levantamento (Figura 10). Os valores extremos correspondem à altura dos telhados dos edifícios na zona.

5. Conclusões

A análise desenvolvida permitiu concluir que é possível utilizar a fotogrametria por VANT como uma alternativa aos LT tradicionais. Os LT por VANT cumprem os requisitos de posicionamento planimétrico exigidos no normativo técnico e adicionam a capacidade de gerar nuvens de pontos densas, modelos digitais de superfície de alta resolução e informação de contexto sobre os objetos na área do levantamento. A capacidade de sobrevoar zonas de difícil acesso, muitas vezes perigosas, permite a recolha de dados em zona sob o efeito da maré. Todavia, a exatidão altimétrica dos pontos obtidos por LF dependem da distribuição dos PFs e da precisão das suas coordenadas. Este fator condiciona a qualidade dos MDS em zonas onde o acesso humano está condicionado.

No âmbito do trabalho futuro considera-se ser necessário utilizar a aprendizagem obtida neste caso de estudo para melhorar o processo nas suas diferentes fases, torna-se necessário considerar metodologias de controlo de qualidade e propagação de incerteza que possibilitem a interligação dos modelos digitais de superfície LF e LH. Analisar a qualidade resultante de uma translação vertical do MDS resultante do LF com base nos valores do LH. Uma última questão que merecerá seguramente atenção é a identificação das zonas imersas no momento da aquisição das imagens para que seja feita a sua remoção do MDS em pós-processamento.

Referências Bibliográficas

- Agisoft (2018) Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition, Version 1.4. http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf, consultada em maio de 2018.
- Calder, B.R. 2003. Automatic Statistical Processing of Multibeam Echosounder Data. *International Hydrographic Review* 980.
- Calder, B.R. e Mayer, L.A. 2003. Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 4(6).
- DGT (2018). Especificações técnicas de cartografia e informação geográfica de referência.
- DJI (2018). "Phantom 3 Professional." <https://www.dji.com/phantom-3-pro/info#downloads>, consultada em maio de 2018.
- Instituto Hidrográfico (2008). NT.HI.01 - Norma Técnica para o planeamento, execução e processamento de levantamentos hidrográficos.
- McGlone, J. C. (2013). *Manual of Photogrammetry*, ASPRS.
- Vicente, J.P.D. 2011. Modelação de dados batimétricos com estimação de incerteza. *FCUL-DEGGE*. Lisboa, Universidade de Lisboa.