

Derivação de Batimetria a partir de Imagens Multiespectrais de Detecção Remota numa perspetiva operacional – Diferentes abordagens de modelação e de calibração

Pedro VILAR¹, Ana MOURA¹, Luísa LAMAS¹, José Paulo PINTO¹

¹ Instituto Hidrográfico (Portugal)

(pedro.vilar@hidrografico.pt; ana.moura@hidrografico.pt; luisa.lamas@hidrografico.pt; paulo.pinto@hidrografico.pt)

Palavras-chave: *Satellite-Derived Bathymetry*, Calibração, Modelação, Operacionalização, Sentinel-2, SAR

Resumo: A utilização de metodologias de derivação de batimetria por satélite (*Satellite-Derived Bathymetry* - SDB) recorrendo a imagens multiespectrais e *Synthetic Aperture Radar* (SAR) tem sido uma abordagem válida para caracterizar a dinâmica dos fundos costeiros. As metodologias SDB aplicadas a imagens multiespectrais que utilizam algoritmos empíricos necessitam de dados *in situ* para a calibração dos modelos batimétricos. No presente estudo, através de uma metodologia operacional para a derivação de informação SDB que tem vindo a ser desenvolvida no Instituto Hidrográfico, pretende-se avaliar a validade de modelos batimétricos calibrados com diferentes dados *in situ*. Para tal, na foz do rio Minho, Caminha, foi utilizada uma imagem da missão Sentinel-2 e vários conjuntos de valores de profundidade extraídos de levantamentos hidrográficos (LH), cartas náuticas e levantamentos *Light Detection and Ranging* (LiDAR) com diferentes densidades espaciais e/ou adquiridos em épocas temporais próximas e afastadas da data de aquisição da imagem. Foram também estudados diferentes formas de modelação de derivação de informação SDB, nomeadamente a modelação através de uma regressão linear, tal como proposta em vários algoritmos de cálculo de batimetria SDB, e a modelação polinomial de 2.º grau. Os modelos batimétricos derivados pelas várias modelações e abordagens de calibração testadas apresentaram valores de desvio-padrão entre 0.7~1.8 m quando comparados com valores de profundidade de referência adquiridos por LH. Os resultados indicam que é possível derivar modelos SDB calibrados através de *in situ* com datas de aquisição afastadas da data de aquisição da imagem, onde se identificam as mesmas estruturas do fundo com valores de profundidades consistentes com LH de referência. Assim, estes resultados apresentam-se promissores para a obtenção de informação batimétrica concordante com a data de aquisição da imagem, independentemente da fonte de aquisição de dados ou da época temporal em que estes foram adquiridos. Os resultados mostram também que os modelos SDB são influenciados pela variação da densidade espacial de diferentes amostras de calibração extraídas de uma mesma fonte de dados. A modelação quadrática devolveu resultados mais coerentes com o LH de referência em profundidades mais baixas (entre os -2 m e os 0 m) sem aplicação de uma correção atmosférica às imagens e sem aplicação de uma profundidade de corte, comparando com a modelação linear. Ao longo do presente estudo, de forma breve, será discutida a sinergia de metodologias de derivação de batimetria com dados multiespectrais e SAR. Este estudo foi desenvolvido no projeto *EU H2020 Coastal Waters Research Synergy Framework (Co-ReSyF)*.

1. Introdução

No âmbito das atividades desenvolvidas pelo Instituto Hidrográfico (IH) é de particular interesse o garante da segurança à navegação marítima em áreas costeiras. Para tal, nestas zonas é necessário ter batimetria atualizada, que normalmente é adquirida por levantamentos hidrográficos (LH) recorrendo a métodos acústicos. No entanto, em zonas costeiras nem sempre é possível realizar LH, dando origem à inexistência e/ou à desatualização de informação batimétrica. Nestes casos, a utilização de metodologias que utilizam algoritmos de derivação de batimetria por satélite (*Satellite-Derived Bathymetry* - SDB) através de imagens multiespectrais e *Synthetic Aperture Radar* (SAR) tem sido uma abordagem válida para adquirir informação (Jawak *et al.*, 2015). Recorrendo a metodologias SDB, têm surgido algumas publicações que utilizam imagens multiespectrais que empregam algoritmos empíricos que necessitam de dados adquiridos *in situ* para derivar profundidades. Nestas publicações, através de diferentes conjuntos de dados adquiridos por LH e Cartas Náuticas, foram investigadas diversas formas de calibração e de modelação de informação SDB, estudando diversos algoritmos de correção atmosférica e diferentes modelos de ajustamento para determinar a melhor relação entre dados *in situ* de calibração e rácios de bandas extraídos de imagens multiespectrais (Stumpf *et al.*, 2003; Hernandez *et al.*, 2016; Sam *et al.*, 2017).

O IH, através da sua participação no projeto H2020 *Coastal Waters Research Synergy Framework* (Co-ReSyF), tem implementado e automatizado metodologias de extração de informação batimétrica a partir de imagens de satélite multiespectrais e SAR (Vilar *et al.*, 2018a e Lamas *et al.*, 2018). O presente estudo desenvolvido no âmbito do projeto Co-ReSyF tem como objetivo avaliar modelos batimétricos SDB calibrados com diferentes dados *in situ* seguindo diversas abordagens e avaliar diferentes formulações para a modelação de informação SDB. Para tal, é utilizada uma metodologia operacional que tem sido desenvolvida por Vilar *et al.* (2018a) que recorre ao algoritmo de Stumpf *et al.* (2003) para a derivação de batimetria através de imagens de satélite multiespectrais das missões Landsat-8 (L8) e Sentinel-2 (S2). Complementarmente, será discutida a sinergia de metodologias de derivação de batimetria com dados multiespectrais e SAR.

2. Dados Utilizados e Metodologia

2.1 Caracterização da área de estudo

Caminha é uma vila do distrito de Viana do Castelo, região norte e sub-região do Minho-Lima. Em Caminha situa-se a foz do rio Minho, zona alvo do presente estudo (Figura 1). De acordo com LH realizados nesta área, o estuário do rio Minho é caracterizado por águas de baixas profundidades, apresentando uma profundidade média de 4m, e pela presença de bancos de areia que podem cobrir ou ficar a descoberto com a influência da maré.

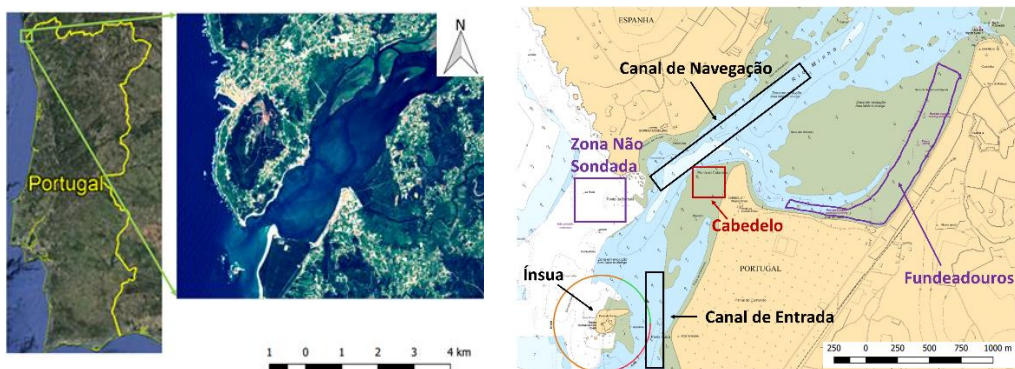


Figura 1 – Área de estudo: Foz do rio Minho, Caminha, Portugal (esquerda) e excerto da Carta Náutica 26409, 1.ª edição (direita).

No excerto da Carta Náutica 26409 (Figura 1, direita) é possível identificar as principais estruturas do fundo, nomeadamente zonas de muito baixa profundidade, os fundeadouros, e zonas importantes à navegação marítima, tais como canais de navegação, e zonas de muito baixas profundidades onde não foi possível adquirir informação batimétrica por LH. Assim, a foz do rio Minho, com as características apresentadas anteriormente aliada a fundos maioritariamente arenosos e com águas pouco turbidas, apresenta-se como uma área com potencial para adquirir informação batimétrica por métodos SDB.

2.2 Dados Utilizados

A imagem de satélite utilizada para a realização deste estudo foi adquirida pelo sensor MSI do satélite S2-A no mês de junho de 2016 (Quadro 1). As imagens S2 são disponibilizadas ao utilizador no sistema de coordenadas UTM/WGS84 (*Universal Transversa de Mercator / World Geodetic System 1984*). Foram utilizadas as bandas do azul e do verde da região do visível e as bandas do infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de comprimento de onda curto (SWIR) da região do infravermelho.

Quadro 1 – Imagem multiespectral Sentinel-2 utilizada no presente estudo.

Data de Aquisição	Sensor	Bandas utilizadas
29/06/2016	Sentinel - 2A MSI	Azul (490 nm), Verde (560 nm), NIR (842 nm), SWIR ₁ (1610 nm) e SWIR ₂ (2190 nm)

De forma a calibrar os modelos batimétricos SDB foram utilizados valores de profundidade extraídos de diferentes fontes de aquisição e em diferentes épocas temporais (Quadro 2) na zona da foz do rio Minho (Figura 1). Os valores de profundidade utilizados nestes conjuntos de dados estão expressos em metros (m) e encontram-se referidos ao Zero Hidrográfico. A validação dos modelos foi efetuada com o LH realizado com Sondador Acústico de Multifeixe (SMF) indicado no Quadro 2.

Quadro 2 – Conjunto de dados de calibração/validação dos modelos SDB adquiridos na foz do rio Minho, Caminha.

Fontes de Aquisição de dados	Época de Aquisição	Ordem de Levantamento S-44 da OHI (2008)	Sistema de Referência
LH a Sondador de Feixe Simples (SFS)	06/06/2011 – 15/07/2011	1b (OHI, 2008)	PT-TM06/ETRS89
Dados LiDAR topo-batimétricos	22/07/2011 – 19/08/2011	-	PT-TM06/ETRS89
Carta Náutica (CN) 26409	1.ª Publicação – dezembro de 2011	-	UTM/WGS84
LH a SMF	26/06/2016 - 8/08/2016	1a (OHI, 2008)	PT-TM06/ETRS89

2.3 Metodologia de Derivação de Batimetria – Diferentes abordagens de Modelação e de Calibração

2.3.1 – Derivação operacional de Informação SDB

A metodologia base de derivação de batimetria a partir de imagens de satélite multiespectrais utilizada no presente estudo é apresentada na Figura 2 e resultou de uma investigação efetuada no LH no âmbito do projeto H2020 Co-ReSyF (Vilar *et al.*, 2018a; Vilar *et al.*, 2018b) tendo por base a metodologia anteriormente desenvolvida por Guerreiro e Moura (2015), estando operacional e automatizada para imagens dos satélites L8 e S2 através de uma aplicação computacional desenvolvida por Vilar *et al.* (2018b). A discussão das suas capacidades operacionais em vários domínios de aplicação tem sido estudada no âmbito do projeto Co-ReSyF (Vilar *et al.*, 2018b, Vilar *et al.*, 2018c, Vilar *et al.*, 2018d). A metodologia SDB implementada é composta pelas seguintes fases (Figura 2): (1) seleção de imagens de satélite multiespectrais; (2) geração de um extrato da imagem correspondente à zona de estudo pretendida; (3) cálculo da refletância espectral, (4) separação água-não água, (5) correção das refletâncias do efeito do brilho solar e (6) utilização do algoritmo de Stumpf *et al.* (2003) através de uma modelação linear e polinomial de segundo grau (descrita com maior pormenor nas secções 2.3.2 e 3.2) entre os valores de profundidade *in situ* para calibração e o rácio dos logaritmos das bandas do azul e do verde. No processo de derivação de batimetria está implementado o cálculo da refletância *Top of Atmosphere* (TOA) para os sensores L8 e para o S2. De modo a considerar uma correção atmosférica (CA), a metodologia implementada permite a utilização da reflectância à saída da coluna de água (*Water-Leaving reflectance*) proveniente da aplicação ACOLITE (Vanhellemont e Ruddick, 2016). A separação água - não água é efetuada através do *Normalized Difference Water Index* (NDWI) (Gao, 1996). A correção do brilho solar nas refletâncias é realizada segundo o método proposto por Hedley *et al.* (2005). Na derivação da profundidade (Z), através do algoritmo de Stumpf *et al.* (2003), a formulação matemática através de uma regressão linear é a seguinte (equação 1):

$$Z = m_1 \frac{\ln(nR_w(\lambda_i))}{\ln(nR_w(\lambda_j))} - m_0 \quad (1)$$

Este algoritmo baseia-se no rácio dos logaritmos das refletâncias de duas bandas espectrais com diferentes níveis de absorção na água (denominado de modelo batimétrico relativo - MBR), sendo $R_w(\lambda_i)$ e $R_w(\lambda_j)$ a reflectância da banda azul e da banda verde, respetivamente. Através de uma relação linear entre o MBR e um conjunto de profundidades de referência o algoritmo é calibrado (determinação das variáveis m_1 e m_0) e consequentemente são determinados os modelos batimétricos. A variável n é uma constante inteira positiva para que os logaritmos tomem um valor positivo de modo a existir uma resposta linear do modelo (normalmente toma valores entre 500 e 1500), m_1 é uma constante que dimensiona o rácio com a profundidade de referência e m_0 representa o *offset* para a profundidade de 0 m (Stumpf *et al.*, 2003). A metodologia considera a derivação de profundidades tendo em conta uma profundidade de corte (P_c), isto é, a profundidade a partir do qual deixa de existir uma relação entre o MBR e as profundidades *in situ* de calibração. Com intuito de continuar a otimizar as capacidades operacionais desta metodologia, diversas abordagens de modelação e de calibração têm sido estudadas, sendo descritas seguidamente.

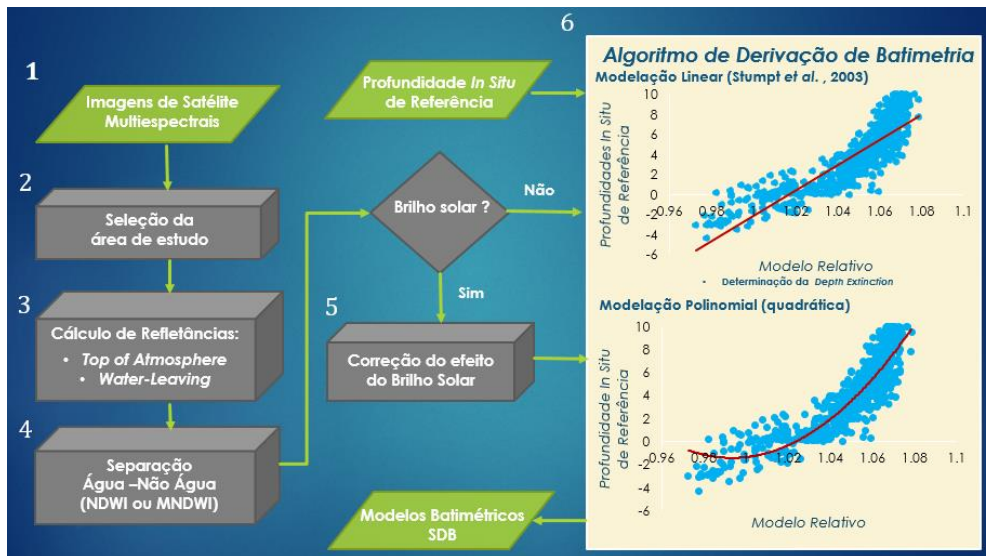


Figura 2 – Metodologia operacional para derivação de batimetria a partir de imagens de satélite multiespectrais.

2.3.2 – Modelação de informação SDB: modelação linear versus quadrática

Stumpf *et al.* (2003) propõem uma modelação linear (ML) para a derivação de batimetria (equação 1). No entanto, alguns estudos (Hernandez *et al.*, 2016; Sam *et al.*, 2017) têm investigado a modelação de informação SDB através de relações não lineares entre o rácio dos logaritmos das refletâncias e as profundidades *in situ* de referência, nomeadamente modelos quadráticos e exponenciais. Algumas publicações concluem que modelos polinomiais de segunda ordem obtêm resultados concordantes com batimetria *in situ* de referência (Hernandez *et al.*, 2016; Sam *et al.*, 2017). Através do estudo da relação de dispersão entre o MBR, derivado a partir da imagem S2 utilizada, e as profundidades *in situ* para calibração extraídas da CN 26409 foram efetuados alguns testes que aplicaram a ML (tal como proposto por Stumpf *et al.*, 2003) e polinomiais de segunda ordem para a modelação quadrática (MQ) (Ver Quadro 3). Os resultados obtidos por estas abordagens de modelação, nomeadamente a sua formulação matemática, são apresentados na secção 3.2 do presente artigo.

2.3.3 – Estudo da dependência temporal e da densidade espacial da amostra de calibração dos modelos SDB

Vários estudos (Stumpf *et al.*, 2003; Hernandez *et al.*, 2016; Sam *et al.*, 1017; Vilar *et al.*, 2018a) têm utilizado diferentes fontes de dados *in situ* para a calibração dos algoritmos de derivação de modelos SDB. Das diversas fontes de dados utilizadas destacam-se Cartas Náuticas, LH, levantamentos LiDAR, etc.. No presente estudo selecionaram-se valores de profundidade do conjunto de dados indicados no Quadro 2 com objetivo de estudar a dependência temporal e a dependência da densidade espacial e das amostras de calibração. O estudo da dependência temporal da época de aquisição dos dados *in situ* para a calibração dos modelos SDB em relação à data de aquisição da imagem consistiu, em primeiro lugar, na seleção de uma amostra comum de valores de profundidade em todas as fontes de dados referidas anteriormente (Quadro 2). Baseado neste pressuposto, foram derivados quatro modelos batimétricos SDB, correspondentes a cada um dos conjuntos de dados de calibração. A análise da dependência da densidade espacial do conjunto de dados de calibração compreendeu a seleção de diferentes amostras de valores de profundidade com diferentes densidades espaciais extraídas do LH SMF. Para tal, foram escolhidas três amostras diferentes, contendo, 29, 76 e 171 valores de profundidade, respetivamente. Utilizando estes conjuntos de dados foram derivados os respetivos modelos SDB e avaliada a respetiva consistência com valores de profundidade *in situ* de referência. Os resultados para o estudo da dependência temporal e da dependência da densidade espacial são apresentados e discutidos na seção 3.3 do presente artigo.

3. Resultados e Discussão

3.1 – Análise de Resultados

A análise dos resultados obtidos pelas várias abordagens de modelação e calibração foi realizada através das estatísticas das diferenças entre os modelos SDB obtidos e o LH SMF. De modo a avaliar os resultados, foram selecionadas várias amostras do LH SMF por vários intervalos de profundidades (ver Quadro 3). Complementarmente, para a análise das diferentes abordagens foi determinado e analisado o coeficiente de determinação (r^2) dos respetivos modelos de ajustamento.

3.2 Modelação linear versus modelação quadrática

A MQ resultante dos estudos efetuados exibiu a seguinte formulação matemática (equação 2):

$$Z = m_2 \left(\frac{\ln(nR_w(\lambda_i))}{\ln(nR_w(\lambda_j))} \right)^2 - m_1 \frac{\ln(nR_w(\lambda_i))}{\ln(nR_w(\lambda_j))} + m_0 \quad (2)$$

onde Z é o valor da profundidade SDB, m_2 , m_1 e m_0 são constantes de calibração. De forma a avaliar a informação retornada por ambas as abordagens de modelação foram calculados modelos SDB com e sem aplicação de uma CA. Paralelamente, foram comparados também modelos SDB calibrados com uma P_c de 6 m. Em primeiro lugar, avaliaram-se modelos SDB derivados com e sem CA sem aplicar a P_c . Estes primeiros resultados são apresentados na Figura 3 e no Quadro 3.

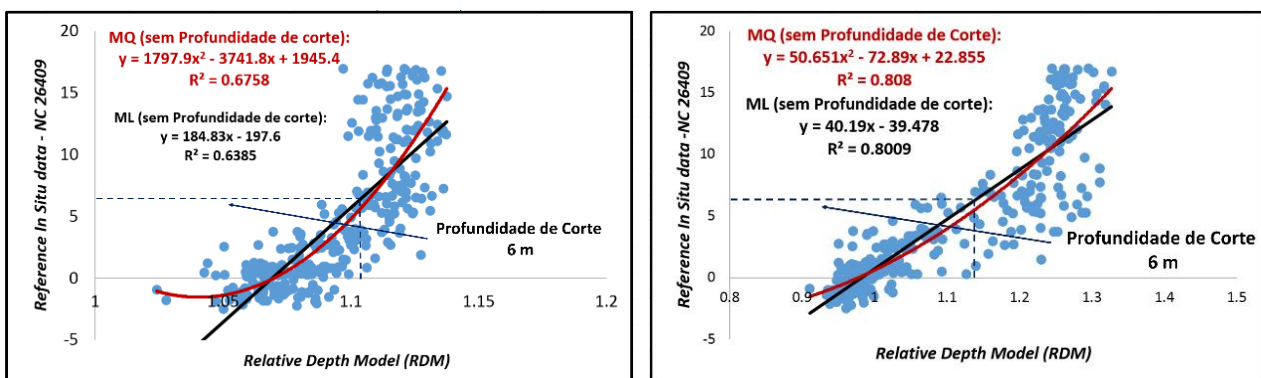


Figura 3 – ML vs. MQ sem determinação de uma P_c , sem aplicação de uma CA (esquerda) e com aplicação da CA (direita).

Para os modelos em que não foram aplicados a CA (Figura 3, esquerda), a MQ gerou um aumento do coeficiente de determinação em cerca de 4% em relação à ML, verificando-se as maiores diferenças entre o comportamento das duas

modelações em zonas de profundidades mais baixas, principalmente em zonas de profundidades inferiores a 0 m, onde a ML tende a subestimar os valores de profundidade SDB (ver Figura 3). Em relação ao MBR calculado com aplicação da CA, a utilização da MQ apresentou resultados muito similares à ML, tanto no valor do r^2 , como no comportamento das duas modelações, concluindo que com a aplicação de uma CA o comportamento entre as profundidades *in situ* e o MBR tende a aproximar-se de uma ML, tal como proposto por Stump *et al.* (2003). O valor de RMSE e o valor de desvio-padrão das diferenças entre os modelos SDB calculados sem CA e o modelo LH SMF de 2016 (Quadro 3) mostram que: (1) com P_c as duas modelações ML e MQ são idênticas. A aplicação da P_c melhora significativamente o desvio-padrão em ambas as modelações; (2) Sem P_c , a MQ aproxima-se da batimetria de referência no intervalo de profundidade dos -2 aos 0 m, zona de influência de maré. A ML subestima os valores neste intervalo, apresentando 0.40 m de diferença no desvio-padrão e no RMSE (Quadro 3); (3) Para os restantes intervalos de profundidade, dos 0 aos 6 m, sem P_c , a MQ e a ML, são idênticas para as modelações sem aplicação da CA. Futuramente, prevê-se a continuação do estudo da MQ e de outras modelações não lineares, tais como a exponencial, de forma a perceber o comportamento de modelos batimétricos SDB nos vários intervalos de profundidades.

Quadro 3 – Desvio-Padrão das diferenças e erro médio quadrático (RMSE) entre o modelo SDB CN 26409 - ML e o modelo SDB CN26409 - MQ com o LH SMF por intervalos de profundidade (sem CA).

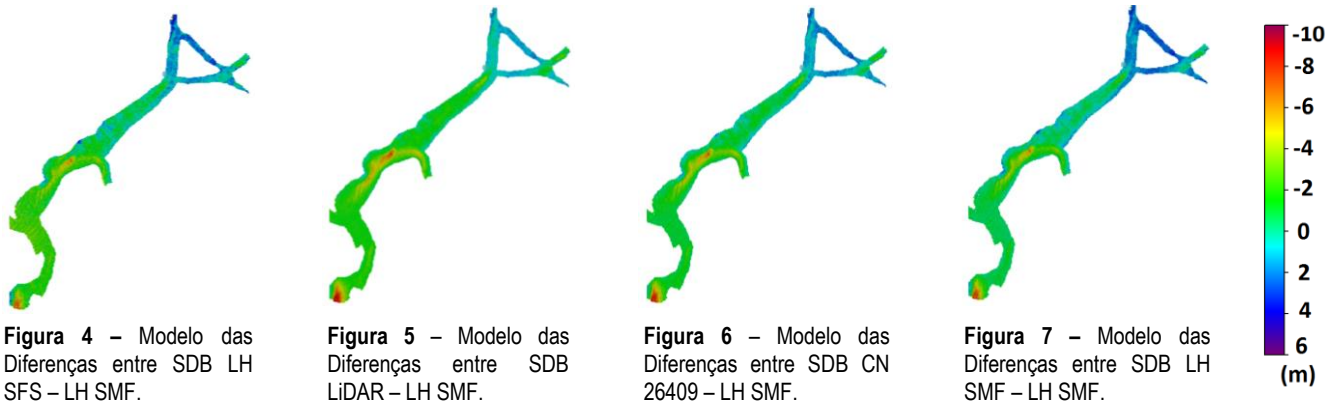
Intervalo de Profundidades	-2 aos 0 m				0 aos 2 m				2 aos 4 m				4 aos 6 m																			
	Número de amostras = 196								Número de amostras = 5 525								Número de amostras = 5 250								Número de amostras = 2 223							
	ML		MQ		ML		MQ		ML		MQ		ML		MQ		ML		MQ													
	s/ P_c	c/ P_c	s/ P_c	c/ P_c	s/ P_c	c/ P_c	s/ P_c	c/ P_c	s/ P_c	c/ P_c	s/ P_c	c/ P_c	s/ P_c	c/ P_c	s/ P_c	c/ P_c	s/ P_c	c/ P_c														
Desvio-Padrão (m)	1.6	0.7	1.2	0.6	2.1	1.0	2.0	1.2	1.5	0.7	1.4	0.8	1.4	0.7	1.5	0.8																
RMSE (m)	2.2	1.2	1.8	1.1	2.4	1.1	2.0	1.1	1.6	1.5	1.4	1.65	1.4	2.6	1.5	2.8																

Quadro 4 – Estatísticas das diferenças absolutas entre o modelo SDB SFS - LH SMF.

(m)	Média (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Desvio-Padrão (m)
SDB SMF – SDB SFS	0.26	0.00	0.81	0.15

3.3 Dependência temporal e da densidade espacial do conjunto de dados de calibração dos modelos SDB

A análise da dependência temporal e da densidade espacial dos dados de calibração foi realizada segundo a ML (equação 1), visto que neste estudo a MQ ainda se encontra em desenvolvimento. De forma a avaliar a dependência temporal das várias fontes de calibração (amostras com 76 valores de profundidade), nas Figuras 4 a 7 são apresentados os modelos das diferenças entre os modelos SDB obtidos pelas várias amostras de calibração provenientes das fontes de dados indicadas no Quadro 2 e o LH SMF tido como referência. Os respetivos valores de média, de desvio-padrão e RMSE são mostrados no Quadro 5. Observando as Figuras 4 a 7 identifica-se uma consistência nos modelos das diferenças estudados. Os vários modelos apresentam zonas comuns entre si com magnitudes dos valores das diferenças semelhantes independentemente da sua época de aquisição. Tendo por base estes modelos (Figuras 4 a 7) e o extrato da CN 26409 (Figura 1, direita) foram analisadas onde se encontram as maiores diferenças entre as profundidades SDB e as profundidades de referência. Constata-se que em todos os modelos apresentados as maiores diferenças encontram-se em zonas de profundidade superiores a 5 m (zonas a laranja e a vermelho), que está concordante com o valor de P_c determinado anteriormente (~6 m). Similarmente, as maiores diferenças também ocorrem em zonas de profundidades baixas (entre profundidades negativas e 1 m). Analisando o Quadro 5, verifica-se que o valor do desvio-padrão dos modelos apresentados é muito similar. Constata-se também que, de forma geral, o valor médio das diferenças, do desvio-padrão e do RMSE tendem a ser menores à medida que a época de aquisição dos dados *in situ* de calibração se aproxima da data de aquisição da imagem. Com o intuito de avaliar as máximas diferenças entre os modelos SDB adquiridos em épocas diferentes, no Quadro 4 apresentam-se os valores das estatísticas das diferenças absolutas entre o modelo calibrado com o LH SMF e o modelo calibrado com o LH SFS que apresentam o menor e o maior desvio-padrão, respetivamente. Verifica-se que, entre os dois modelos SDB o valor máximo da diferença entre ambos é cerca de 0.81 m que corresponde aproximadamente a metade do valor de desvio-padrão de validação dos respetivos modelos (~1.70 m – ver quadro 5), onde o desvio-padrão das diferenças é aproximadamente de 0.15 m. Estes resultados podem estar relacionados com a pouca variabilidade das estruturas do fundo, verificadas no período de aquisição entre os vários dados de calibração.



Quadro 5 – Média e Desvio-padrão das diferenças dos modelos SDB apresentados nas Figuras 4 a 7 com o LH SMF e o respectivo valor de RMSE.

Modelos SDB	LH SFS	LiDAR	CN 26409	LH SMF
Média (m)	-0.92	-1.38	-0.75	-0.23
Desvio-Padrão (m)	1.84	1.70	1.69	1.68
RMSE (m)	2.06	2.19	1.85	1.70

Quadro 6 – Média e Desvio-padrão das diferenças entre os modelos SDB LH SMF derivados com as amostras de calibração de 29, 76 e 141 valores de profundidade e o LH SMF.

Modelos SDB	Média	Desvio-Padrão	R ²
29 amostras	-0.5	2.21	0.49
76 amostras	-0.2	1.70	0.54
141 amostras	-0.8	1.81	0.67

Com objetivo de avaliar a influência da densidade espacial da amostra de calibração, tendo por base os modelos SDB LH SMF derivados a partir das amostras de 29, 76 e 141 valores de profundidade, são apresentados no Quadro 6 os respectivos valores de média e desvio-padrão das diferenças com o LH SMF e o correspondente valor de r^2 . Pelos resultados obtidos, verifica-se que a seleção da amostra de calibração a uma mesma fonte de dados *in situ* influencia a derivação de profundidades. Para a amostra com menor número de valores de profundidade, a modelação apresentou o valor mais baixo de r^2 , valor inferior a 50%. Este resultado, comparativamente com as restantes amostras consideradas, apresentou um pior ajustamento entre os dados *in situ* de calibração e o MBR, originando também o valor mais elevado de desvio-padrão. De forma geral, com o aumento do número de valores de profundidade da amostra, o desvio-padrão mostrou valores mais reduzidos, estando os respetivos modelos SDB mais concordantes com os valores de referência. No entanto, a amostra de 141 valores de profundidade, com o acréscimo da densidade espacial relativamente à amostra de 76 valores, mostrou um aumento de r^2 com um aumento do valor de desvio-padrão das diferenças. A análise efetuada leva a concluir que diferentes amostras de calibração tendem a gerar diferentes resultados na modelação para a derivação de profundidades SDB e que valores de r^2 mais elevados não significa melhor modelação SDB. De futuro prevê-se a realização de mais estudos com intuito de perceber a influência de dados de calibração tendo em conta outras variáveis para além da densidade espacial, tais como, amostras de diferentes tipos de fundos, etc..

4. Fusão de Metodologias Multiespectrais e SAR para derivação de Batimetria

O propósito da fusão de metodologias multiespectrais e SAR está relacionado com as características da área de interesse e com as limitações inerentes aos dois tipos de dados. Cada uma destas duas metodologias de derivação de batimetria são aplicadas em diferentes paradigmas. Os métodos multiespectrais fornecem batimetria até aos 10 m de profundidade em condições de mar calmo, sem nebulosidade e sem brilho solar, enquanto os dados SAR estimam profundidades entre os 100 m e as zonas de

rebatção (entre os 5 e os 10 m de profundidade) em condições de vento e ondulação moderadas (Lamas *et al.*, 2018). De forma a colmatar as limitações apresentadas por ambas as metodologias, o estudo do método de fusão será focado nas zonas de sobreposição entre ambas ou nas zonas onde existam *gap* de informação.

Conclusões

Os resultados obtidos pela modelação quadrática mostraram-se concordantes com a batimetria de referência. De uma forma geral, para intervalos de profundidade mais baixos (-2 aos 0 m), a modelação quadrática apresenta um desvio-padrão e um RMSE menor comparando com a modelação linear quando não se aplica a profundidade de corte e não aplicando uma correção atmosférica. Prevê-se a continuação do estudo da modelação quadrática e de outras modelações, tais como o modelo exponencial. Os resultados obtidos pelo estudo da dependência temporal dos dados de calibração mostraram-se promissores. A informação SDB calibrada tendo por base dados adquiridos em épocas diferentes à data da aquisição da imagem devolveu resultados coerentes com a batimetria *in situ* de referência mostrando resultados similares entre os vários modelos derivados. Verifica-se também que os modelos SDB obtidos são influenciados por diferentes amostras de calibração de uma mesma fonte de dados, sendo necessário possuir alguma acuidade na seleção da amostra de calibração. Contudo, perspectiva-se continuar a estudar a influência temporal e espacial das amostras de calibração de informação SDB. Devido às limitações e às características dos dados multiespectrais, objetiva-se o estudo e a operacionalização de uma metodologia de complementaridade com métodos que aplicam dados SAR para derivação de batimetria.

Referências Bibliográficas

- Gao, B. (1996). NDWI-A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sensing of Environment*, Vol., 58, No. 3, Pag.257-266.
- Guerreiro, R. e Moura, A. (2015). Aplicação de uma Metodologia de Derivação de Batimetria a partir de Imagens de Satélite. VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia. Lisboa, 29 e 30 de outubro.
- Hedley, J.D., Harborne, A.R., Mumby, P.J. (2005). Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, No. 10, Págs. 2107 – 2112.
- Hernandez, W.J. and Armstrong, R.A. (2016). Deriving Bathymetry from Multispectral Remote Sensing Data. *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 4, No. 1.
- Jawak, S.D., Vladlmani, S.S. e Alvarinho, J.L. (2015). A Synoptic Review on Deriving Bathymetry Information Using Remote Sensing Technologies: Models, Methods and Comparisons. *Advances in Remote Sensing*, Vol.4, 147-162.
- Lamas, L., Pinto, J.P., Vilar, P. e Moura, A. (2018). Estimation of coastal bathymetry from wave parameters retrieved with Synthetic Aperture Radar Data. 5^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Lisboa, 19-21 junho.
- Organização Hidrográfica Internacional - OHI (2008). Especificações da OHI para Levantamentos Hidrográficos, Publicação Especial n.º 44.
- Sam, L., Prusty, G. e Gahlot, N. (2017). Evaluation of optical remote sensing-based shallow water bathymetry for recursive mapping. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 32.
- Stumpf, R. P., Holdereid, M. e Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, Vol.48, No. 1, Part 2, 547-555.
- Vanhellmont, Q., e Ruddick, K. (2016). ACOLITE for Sentinel-2: aquatic application of MSI imagery. 2016 ESA Living Planet Symposium. Prague, 9-13 maio.
- Vilar, P., Moura, A., Guerreiro, R., Lamas, L., J. P. Pinto. (2018a). A multispectral earth observation approach for retrieving bathymetric data: models and in situ data evaluation. *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 20, EGU-2018-452.
- Vilar, P., Moura, A. e Lamas, L. (2018b). Operacionalização de Metodologias para a extração de batimetria a partir de dados de Deteção Remota. 5^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Lisboa, 19-21 junho.
- Vilar, P., Guerreiro, R., Moura, A., Monteiro, C. e Marques, C.V. (2018c). Produtos *Satellite Derived Bathymetry* no apoio à Decisão às Operações de remoção do navio 'Betanzos'. 5^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Lisboa, 19-21 junho.
- Vilar, P., Moura, A., Lamas, L., J. P. Pinto. (2018d). Coastal Dynamics Monitoring in mouth of the Minho River using Bathymetric Information derived from Satellite Imagery. IX Symposium on the Iberian Atlantic Margin. Coimbra, 4-7 setembro.