

Aerofotogrametria Digital como Ferramenta Integrativa para Geração de Modelos Digitais Topobatimétricos de Reservatórios D'água

Digital Photogrammetry as an Integrative Tool for Digital Topobathymetric Modelling of Water Reservoirs

Fábio Barros Curado Fleury^{1,2} , Henrique Llacer Roig¹ , Giuliano Sant'Anna Marotta¹ ,
Rejane Ennes Ciccerelli¹  & Marco Ianniruberto¹ 

¹Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil

²Laboratório de Oceanografia Costeira, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil

E-mails: fleury.fabio@gmail.com; roig@unb.br; marotta@unb.br; rejaneig@unb.br; ianniruberto@unb.br

Resumo

Modelos Digitais Topobatimétricos (MDTB) de alta resolução espacial e precisão posicional são dados preciosos à gestão de reservatórios d'água. Para geração dessas superfícies digitais, geralmente são integrados dados derivados de LiDAR aerotransportado e ecobatímetros. A superfície digital resultante dessa interpolação apresenta tipicamente uma região de ausência (gap) de informações entre as nuvens de dados dos dois sensores em áreas submersas rasas, em função de limitações de cada um dos métodos. Esse vazio é geralmente resolvido por interpolação, se tornando uma área de valores batimétricos de precisão planialtimétrica duvidosa. Assim, o trabalho avalia o uso de fotogrametria digital com ARP (Aeronave Remotamente Pilotada) para aquisição de dados batimétricos de margens rasas de reservatórios e investiga a possibilidade de utilização da ferramenta para complementar o gap de dados do MDTB convencional. Para isso, foi avaliada a qualidade posicional da porção batimétrica do Modelo Digital de Terreno (MDT) fotogramétrico comparativamente à dados de receptor GNSS. O MDT fotogramétrico apresentou Ground Sampling Distance (GSD) de 3,75 cm/ pixel, restituindo batimetrias com profundidades até 0,9 m, recobrando todo o gap entre os dados de LiDAR e ecobatímetro nas regiões mais rasas que isso. Regiões mais profundas apresentaram, em média, 40% do gap recoberto. Testes de hipótese e teste de precisão do PEC mostraram que os Pontos de Verificação (PV) submersos apresentam maiores magnitudes de discrepância altimétrica do que os PV da porção seca, enquanto, planimetricamente, as discrepâncias apresentam comportamentos semelhantes. Coeficientes de correlação de Pearson e Spearman, validados por reamostragem Bootstrap com $n = 1000$, indicaram alta correlação entre as discrepâncias altimétricas da porção submersa do MDT fotogramétrico e a profundidade do corpo hídrico, sugerindo controle das discrepâncias por parte da refração da luz, descrita pela Lei de Snell. Encontramos que o uso da técnica como subsídio à integração topobatimétrica de reservatórios se mostra adequada, porém há de se considerar que a parte fotogramétrica do MDTB tenderá a ser mais rasa que a realidade.

Palavras-chave: Fotogrametria; Topobatimetria; Batimetria ótica

Abstract

Digital Topobathymetric Models (MDTB) of high spatial resolution and positional accuracy are precious data for the management of water reservoirs. For the generation of these digital surfaces, data derived from airborne LiDAR and echo sounders are usually integrated. The digital surface resulting from this interpolation typically presents a region of absence (gap) of information between the data clouds of the two sensors in shallow submerged areas, due to the limitations of each method. This void is usually resolved by interpolation, becoming an area of bathymetric values of doubtful planialtimetric precision. Thus, the work evaluates the use of digital photogrammetry with UAV (Unmanned Aircraft Vehicle) to acquire bathymetric data from shallow reservoir margins and investigates the possibility of using the tool to complement the conventional MDTB data gap. For this, the positional quality of the bathymetric portion of the photogrammetric MDT was evaluated in comparison to GNSS receiver data. The photogrammetric MDT had a Ground Sampling Distance (GSD) of 3.75 cm / pixel, restoring bathymetry with depths up to 0.9 m, covering the entire gap between the data of LiDAR and echo sounder in the shallower regions than that. Deeper regions had, on average, 40% of the covered gap. Hypothesis tests and PEC accuracy tests showed that the Submerged Checkpoints (PV) have higher altimetric discrepancy magnitudes than the dry portion PVs, while planimetrically the discrepancies show similar behaviors. Pearson and Spearman's correlation coefficients, validated by Bootstrap resampling with $n = 1000$, indicated a high correlation between the altimetric discrepancies of the submerged portion of the photogrammetric MDT and the depth of the water body, suggesting control of the discrepancies by the light refraction, described by the light refraction. Snell's law. We found that the use of the technique as a subsidy for the topobatimetric integration of reservoirs is adequate, but it must be considered that the photogrammetric part of the MDTB will tend to be shallower than reality.

Keywords: Photogrammetry; Topobathymetry; Optical bathymetry

1 Introdução

A gestão de lagos em grandes centros urbanos torna-se cada vez mais complexa frente ao desafio de satisfazer múltiplos usos, quais captação de água para consumo humano, composição paisagística, lazer, melhoria do microclima e geração de energia elétrica. Tais demandas podem ser comprometidas pelo impacto de ações antrópicas, que acarretam tanto a degradação da qualidade das águas, quanto a perda de capacidade de armazenamento por assoreamento. As maiores mudanças físicas do reservatório, provocadas pela erosão e assoreamento, interessam geralmente uma estreita faixa ao longo das margens, onde ocorre erosão e mobilização dos sedimentos de fundo, e as áreas onde os tributários despejam os sedimentos transportados, formando leques aluvias. Modelos Digitais Topobatimétricos (MDTB) de alta resolução espacial e precisão posicional são o ponto de partida para a identificação de tais mudanças. Um MDTB nada mais é do que a representação digital contínua de uma superfície única resultante da combinação da topografia emersa e a topografia submersa (Danielson et al. 2016; National Oceanic and Atmospheric Administration 2007), de determinado reservatório (Erena et al. 2019), curso d'água (Dietrich 2017; Javernick, Brasington & Caruso 2014) ou ambiente costeiro (Danielson et al. 2016). A necessidade de que o MDTB apresente alta resolução espacial e precisão posicional adequada é compreendida ao entender que dele depende a performance de modelos numéricos multidimensionais e hidrodinâmicos utilizados, entre outros razões, para a definição do balanço hídrico do reservatório (Lane et al. 2010; Tonina et al. 2018; Tonina et al. 2020).

Considerados o estado da arte, MDTBs gerados pela integração de medições topográficas de LiDAR (*Light Detection And Ranging*) aerotransportado e ecobatimétricas são extremamente onerosos. Ainda, equipamentos LiDAR cujo laser opera na faixa próxima aos 1064 nm, região do infravermelho, não são capazes de restituir batimetria. Dessa forma, MDTBs resultantes da interpolação entre estes dados e os dados batimétricos obtidos por ecossonda, apresentam tipicamente uma região de ausência (*gap*) de informações entre as nuvens de dados em áreas submersas rasas (Hogrefe, Wright & Hotchberg 2008). Isso ocorre pela impossibilidade dos dois sensores em adquirir dados na porção marginal rasa de corpos hídricos. No caso do LiDAR, o comprimento de onda do laser utilizado é próximo a 1064 nm, região do espectro do infravermelho, e por isso é fortemente absorvido pela água, limitando o alcance do sinal abaixo da interface ar-água. Medições por ecobatímetro nessa porção rasa tampouco são possíveis, visto que não apresentam profundidade suficiente para trânsito seguro

da embarcação que transporta o sensor (Hogrefe, Wright & Hotchberg 2008). Este problema pode ser contornado pelo uso de sensores LiDAR que utilizem também o laser de comprimento de onda da luz verde (Bailily et al. 2010; Tonina et al. 2018). Porém, o uso desses equipamentos torna a aquisição ainda mais onerosa que a aquisição por LiDAR convencional. Resta, assim, uma faixa de área submersa não amostrada, que geralmente é preenchida por técnicas de interpolação, resultando em uma zona de baixa confiabilidade altimétrica, afetando a utilidade do MDTB para cartografia e estudos hidrográficos (Danielson et al. 2016; Hogrefe, Wright & Hotchberg 2008).

Nos últimos anos, diversos trabalhos foram realizados para investigar a possibilidade de medição de batimetria de águas rasas e cristalinas utilizando fotogrametria digital (Dietrich 2017; Javernick, Brasington & Caruso 2014; Woodget et al. 2015; Skarlatos & Agrafiotis 2018), comprovando que é possível, contanto que haja suficiente luz e cristalinidade. Esse tipo de mapeamento é conhecido como Fotogrametria Entre Dois Meios (FEDM) – “Two Media Photogrammetry” (Dietrich 2017; Lane et al. 2010; Murase et al. 2008; Tewinkel 1963; Westaway 2000; Woodget et al. 2015; Skarlatos & Agrafiotis 2018). Trata-se da fotogrametria realizada com a câmera posicionada em um meio de diferente densidade do meio em que o objeto alvo se encontra, sendo ambos meios capazes de propagar a luz. Apesar de possível, a FEDM apresenta uma grande limitação, visto que as reconstruções tridimensionais dentro d'água são afetadas pela refração da luz ao passar do ar para a água (Dietrich 2017; Skarlatos & Agrafiotis 2018).

O efeito de refração, considerando os meios citados, faz com que as mensurações de objetos ou terrenos submersos aparentem ser mais rasos do que a realidade. São chamadas de “profundidade aparente” (Dietrich 2017; Javernick, Brasington & Caruso 2014; Skarlatos & Agrafiotis 2018; Woodget et al. 2015).

Assim, o presente trabalho procura avaliar o uso de fotogrametria digital com câmera acoplada em ARP (Aeronave Remotamente Pilotada) para aquisição de dados batimétricos de margens rasas de reservatórios e sua efetividade em reduzir o gap de dados do MDTB de alta resolução e precisão convencional. Para tanto, foi definido o Lago Paranoá como área de estudo, um reservatório urbano de grande porte, localizado em Brasília, Distrito Federal.

2 Metodologia

A realização deste trabalho envolveu: (1) Definição da área de estudo; (2) Distribuição, coleta e determinação do padrão de distribuição espacial dos Pontos de Apoio; (3) Planejamento do sobrevoo e aquisição das imagens; (4)

Determinação do número mínimo de Pontos de Controle necessários para realização de um levantamento em margem de reservatório; (5) Determinação da influência da profundidade na magnitude dos erros altimétricos da porção batimétrica do MDT fotogramétrico.

2.1 Definição da Área de Estudo

De forma a atender à condição de cristalinidade para penetração da luz sugeridos por Dietrich (2017) e Woodget et al. (2015), a fim de possibilitar a realização

do trabalho, foi definida a orla da Ermida Dom Bosco, às margens do Lago Paranoá, como área de estudo (Figura 1). Esta área se encontra longe das fontes de sedimentos e em uma região preservada, com águas pouco turvas e fundo de baixa declividade. Também, a margem da área de estudos é praticamente livre de objetos acima do terreno, como árvores e construções, fator este essencial para o estudo, visto que a análise da qualidade da filtragem de objetos acima da superfície para geração do MDTB não faz parte do escopo deste trabalho. A Figura 1 mostra a localização e características da área de estudo.

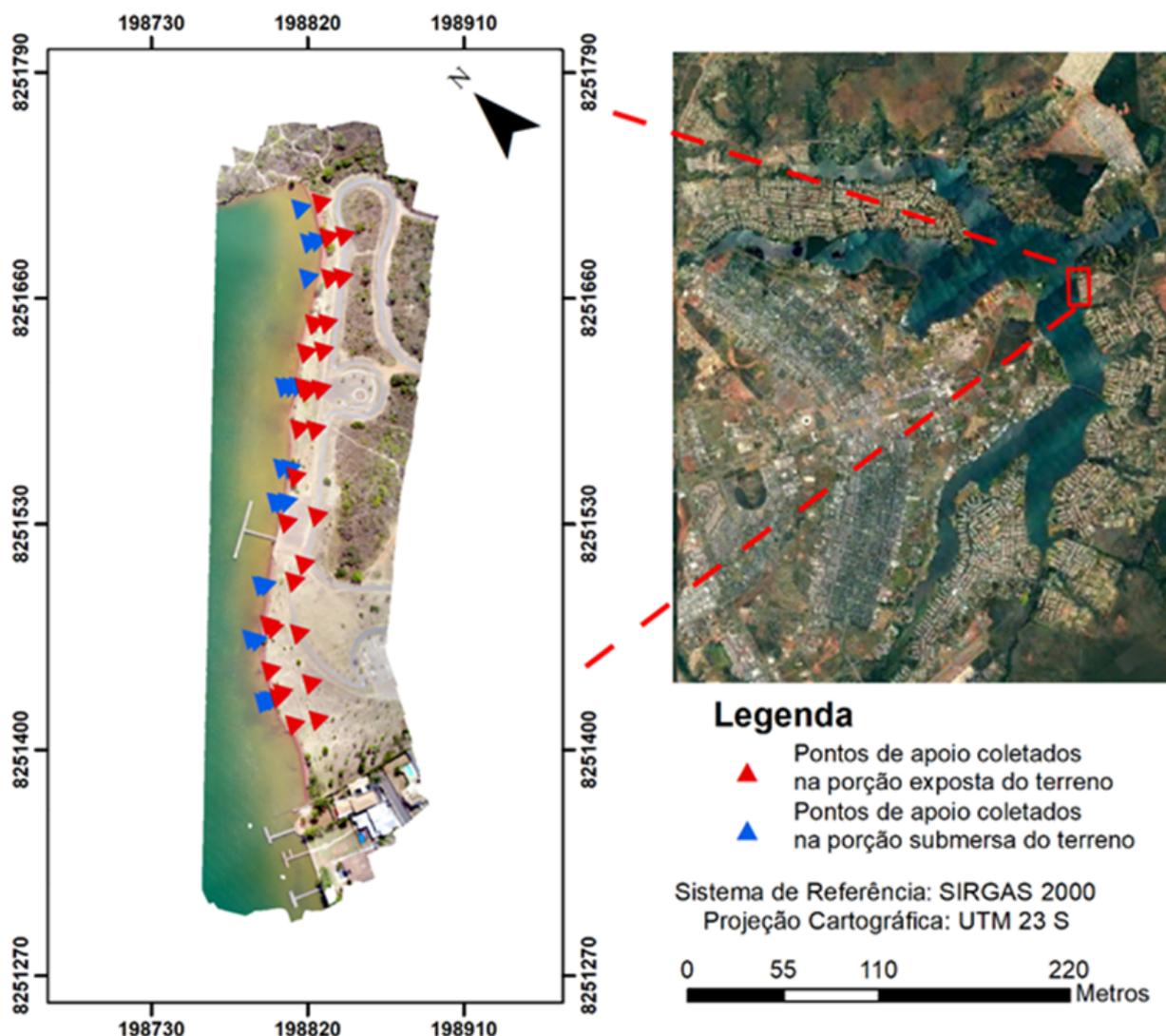


Figura 1 Área de estudos e distribuição dos Pontos de Apoio em campo. Triângulos vermelhos representam os pontos utilizados para controle e verificação do MDTB na porção emersa do terreno; triângulos azuis representam pontos utilizados para verificação do MDTB na porção submersa do terreno.

2.2 Distribuição, Coleta e Determinação do Padrão de Distribuição Espacial dos Pontos de Apoio

Ao todo, foram rastreados quarenta e sete (47) Pontos de Apoio (PAs) com um receptor GNSS Trimble R8s. Desses, sendo vinte e sete (27) na porção topográfica e vinte (20) na porção batimétrica da área de estudo (Figura 1). As coordenadas para cada ponto foram determinadas pela técnica de posicionamento relativo *Real Time Kinematic* (RTK), resultando em precisão de 1 mm. Para isso, anteriormente ao levantamento, foi instalado um ponto base que coletou dados de posicionamento por aproximadamente cinco (5) horas. Esse ponto foi pós processado pelo serviço de Posicionamento por Ponto Preciso disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE-PPP), disponível no endereço www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico.

Os Pontos de Apoio (PAs) foram utilizados em dois momentos distintos: a) Determinação do número mínimo de Pontos de Controle (PCs) necessários à cada sobrevoo para mapeamento de margem de reservatório; b) Avaliação posicional da porção batimétrica do MDT fotogramétrico. Para o momento “a)” foram utilizados apenas os PAs localizados na porção emersa do MDT. Nesta etapa, parte dos PAs foram utilizados como PCs na determinação da orientação externa das fotografias durante os processamentos fotogramétricos. Os demais PAs foram utilizados como referência para as análises de qualidade posicional do MDT, sendo chamados de Pontos de Verificação (PVs). No momento “b)” foram utilizados todos os PAs, tanto da porção emersa quanto submersa, com exceção dos pontos utilizados como PCs na geração do MDT.

É sabido que a distribuição espacial dos PAs em campo é tão importante quanto o número de pontos (*e.g.*, Marotta et al. 2015; Santos et al. 2016). De acordo com Santos et al. (2016), em uma avaliação posicional, os pontos de verificação devem ser planejados de modo a abranger toda a área de estudo.

Para analisar o padrão de distribuição dos PAs neste trabalho, foi utilizado o programa Geopec, desenvolvido por Santos et al. (2016), que utiliza a Estatística do Vizinheiro Mais Próximo de Alta Ordem (EVMPAO).

A EVMPAO, segundo Santos et al. (2016), funciona comparando a distância média entre um conjunto de pontos que tem o padrão definido teoricamente e a distância média entre os vizinhos mais próximos dos pontos em teste para diversas ordens distintas. A primeira ordem utiliza a menor distância entre os pontos, a segunda ordem utiliza a segunda menor distância entre os pontos e assim sucessivamente.

Desta maneira, a EVMPAO testa a distribuição espacial dos pontos de apoio para várias escalas, classificando as amostras em “Distribuição Dispersa”, “Distribuição Aleatória” e “Distribuição Agrupada”. Para significância do estudo, foi definido que as amostras não devem apresentar padrão de distribuição agrupado.

2.3 Planejamento do Sobrevoo e Aquisição das Imagens

Para a realização do experimento, foi cumprida a rotina de seis (6) procedimentos proposta por Marotta et al. (2015), sendo eles: (1) seleção da área, (2) análise da segurança, (3) planejamento do sobrevoo, (4) preparação dos equipamentos, (5) verificação dos equipamentos e (6) coleta de dados.

O planejamento e execução do sobrevoo foi realizado no aplicativo MapPilot, da empresa Maps Made Easy, desenvolvido apenas para iOS. Para este trabalho, foram definidas altura de voo de 80 m e sobreposições longitudinais e laterais entre as fotos de 80% e 70%, respectivamente, recobrando uma área de 7,42 ha. Também, foram definidas quatro linhas de voo, sendo que o eixo central do plano de voo recai sobre a linha de margem do lago. Assim, é garantida a sobreposição necessária para a restituição fotogramétrica na região de interesse.

O ARP utilizado no aerolevanteamento foi um Phantom 4 Advanced, produzido pela empresa chinesa DJI. Trata-se de um ARP comercial altamente acessível e de fácil uso. O sensor utilizado é do tipo RGB CMOS (*Complementary Oxide Semiconductor*) de uma polegada e 20 megapixels, com 4096 x 2160 elementos, original da aeronave.

2.4 Determinação do Número Mínimo de Pontos de Controle Necessários para Realização de Levantamento em Margem de Reservatório

A coleta de pontos de controle é uma etapa primordial que determina a qualidade final do MDT fotogramétrico. Entretanto, é uma das etapas que mais demandam tempo durante o processo de geração desses produtos. Tal procedimento exige equipamento, pessoal e processamentos que acabam sendo também onerosos. Por isso, foi realizado um experimento para definir o número mínimo de PCs necessários para a construção de um MDT que receba classificação “A” no Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) na escala 1:2.000 e curvas de nível equidistantes em 1 m. O PEC é definido pelo Decreto-lei nº 89.817, de 20 de junho de 1984 e atualizados pela publicação das Especificações Técnicas

de Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV), em 2010, com a criação de uma classificação mais restritiva destinada a produtos cartográficos digitais (PEC-PCD).

Para isso, foram realizados seis (6) processamentos fotogramétricos independentes com o programa Agisoft Metashape, utilizando números variados de PCs (4, 5, 7, 9, 11 e 15), distribuídos apenas na porção emersa do terreno. Para cada um dos processamentos, os PAs que não foram utilizados como PCs foram utilizados como PVs, resultando em 23, 22, 20, 18, 16 e 11 PVs, respectivamente. Os seis processamentos foram realizados com os parâmetros de alinhamento e densificação de nuvem de pontos em “máxima qualidade”, resultando em um GSD (*Ground Sampling Distance*) de 2,08 cm/pixel e nuvem de 107.913 pontos 3D, com densidade de 712 pontos/m². O MDT gerado apresentou resolução espacial de 3,75 cm, onde aproximadamente 40% do terreno é encontrado submerso.

2.5 Determinação da Influência da Profundidade na Magnitude dos Erros Altimétricos da Porção Batimétrica do MDT Fotogramétrico

A influência da profundidade na magnitude dos erros altimétricos da porção batimétrica do MDT fotogramétrico foi aferida pela aplicação de testes de hipótese t de Student e f, confecção de mapas de predição de discrepâncias, regressão linear, cálculo dos coeficientes de correlação de Pearson e Spearman e recálculo dos mesmos coeficientes por análise de reamostragem por *Bootstrap*. De acordo com Carvalho & Silva (2018) e Santos et al. (2016), está implícito no Decreto-lei nº 89.817 que as amostras de discrepância posicional devem apresentar uma distribuição normal para serem aplicados os testes do PEC. O mesmo é válido para aplicação dos testes de hipótese t de Student e f (Carvalho & Silva 2018; Trauth et al. 2007). Logo, anteriormente à utilização destes testes, foi realizado o teste de normalidade Shapiro-Wilk para os PAs.

Os testes de hipótese f e t de Student foram realizados com nível de significância de 5% para as duas amostras a serem comparadas: Terreno Emerso e Terreno Submerso. Os testes foram aplicados separadamente para altimetria e planimetria, de forma a determinar se as amostras são estatisticamente distintas vertical e horizontalmente.

As distribuições espaciais contínuas das discrepâncias em terreno emerso e submerso foram obtidas mediante interpolação por Krigagem (Método Gaussiano de Regressão) utilizando o programa ArcGIS. Como resultado foram gerados dois mapas, sendo um relacionado às discrepâncias altimétricas ($|ZGNSS - ZMDT|$) e outro às discrepâncias

planimétricas ($|XYGNSS - XYMDT|$). Optou-se por este interpolador por tender a suavizar a superfície final, diminuindo o efeito pepita ou “*bull's eye*” (Li & Heap 2014).

Optou-se por utilizar não só o coeficiente de Pearson, apesar de ser o mais utilizado na literatura, pois esse é sensível à valores espúrios (outliers). Já o coeficiente de Spearman, uma forma não paramétrica de mensurar a correlação, é menos sensível a esse tipo de dado.

Bootstrapping é uma ferramenta estatística não paramétrica de reamostragem com substituição e tem como resultado uma distribuição empírica de “n” amostras simuladas com base na amostra original, do mesmo tamanho da primeira. A técnica foi utilizada para obter melhor estimativa e confiabilidade dos coeficientes de correlação. Para determinação dos coeficientes de correlação por reamostragem foram utilizadas as medianas e não as médias das distribuições, uma vez que não é possível assumir que as distribuições empíricas sejam normais.

Por fim, o MDT utilizado nesta etapa foi o que apresentou menor número de PCs necessários para receber classificação A no PEC-PCD, para geração de curvas de nível de 1 m de equidistância em escala de 1:2000.

3 Resultados e Discussões

A distribuição da amostra dos PAs apresentou comportamento normal, evidenciado pelo teste Shapiro-Wilk, possibilitando a aplicação do teste de precisão do PEC e testes de hipótese. O teste de padrão de distribuição espacial dos PAs, EVMPOA, resultou em padrão aleatório para 1^a, 2^a e 3^a ordens para amostra Terreno Emerso; o mesmo teste, aplicado para a amostra Terreno Submerso, resultou em padrão aleatório para 1^a ordem e disperso para 2^a e 3^a ordens. Tais resultados foram considerados satisfatórios para prosseguimento do estudo, uma vez que os PA não se mostraram agrupados em análise de nenhuma ordem.

Com relação à análise da qualidade posicional do MTDB em função da quantidade de pontos de controle, a Figura 2 apresenta o erro médio quadrático (RMSE) planimétrico (a) e altimétrico (b) observado nos pontos de verificação em terra resultantes dos seis (6) processamentos fotogramétricos utilizando números distintos de pontos de controle. Percebe-se que a inserção de mais do que cinco (5) PCs no processamento não resulta em melhoras significativas em relação ao MTDB, dependendo da qualidade esperada na aplicação. Em média tem-se 2 a 3 centímetros de precisão posicional. Assim optou-se por utilizar o modelo gerado a partir dos 5 pontos de controle para as análises posteriores.

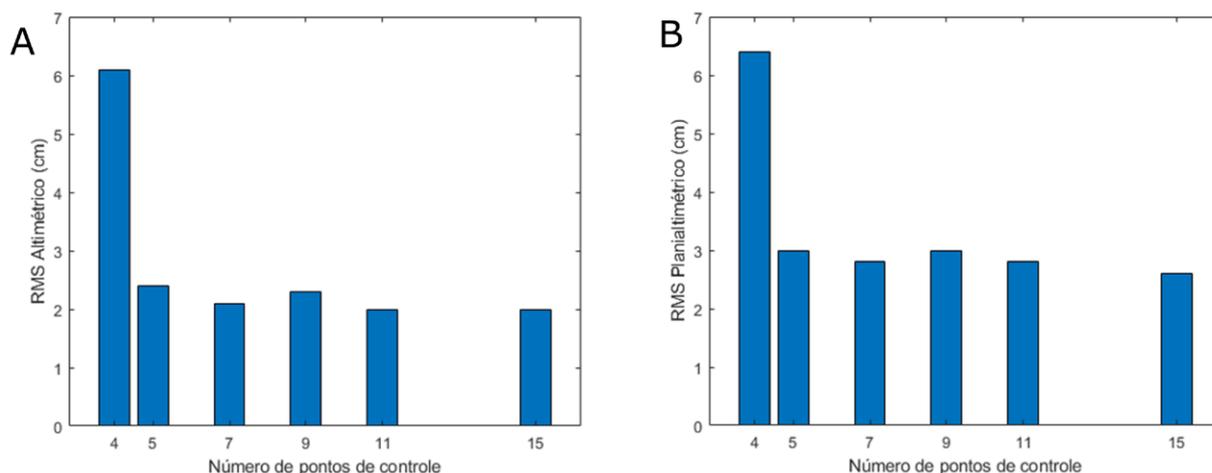


Figura 2 Comportamento do erro RMS: A. altimétrico; e B. planialtimétrico em relação ao número de Pontos de Controle utilizados na etapa de processamento fotogramétrico.

O processamento fotogramétrico digital utilizando cinco (5) PCs reconstituiu 107.913 pontos topográficos (Figura 3), com densidade de 712 pontos/m² e comportamento visualmente coerente em sua porção batimétrica até a profundidade de 0,9 m, correspondendo a uma distância média de 16 m contados a partir da linha de margem até o centro do reservatório. Profundidades superiores a 0,9 m se mostraram extremamente ruidosas, com pontos anômalos tanto em porções intermediárias da coluna d’água, quando acima do nível d’água.

Por consequência, para geração do MDT foram interpolados apenas a porção visualmente coerente da nuvem de pontos. O MDT resultante apresentou GSD de 3,75 cm, com valores de RMSE altimétrico de 2,4 cm e

de RMSE planialtimétrico de 3,0 cm. Assim, a superfície interpolada resultante recobriu todo o vazio de informação batimétrica entre os dados de LiDAR e de batimetria multifeixe onde as profundidades não excederam 0,9 m (Figura 4). Entretanto, nas áreas mais profundas que 0,9 m, o vazio de informação batimétrica diminuiu em média 40%, variando entre 30 e 60%.

A área exposta do MDT apresentou RMSE altimétrico = 0,024 m e RMSE planimétrico = 0,034 m, sendo classificado como “Classe A” no PEC planimétrico e altimétrico. Já a porção batimétrica do MDT apresentou RMSE altimétrico = 0,304 m e RMSE planimétrico = 0,030 m e classificada altimetricamente como “Classe B” e planimetricamente como “Classe A” (Tabela 1).



Figura 3 Nuvem de pontos fotogramétrica. Porções mais profundas apresentam pontos anômalos.

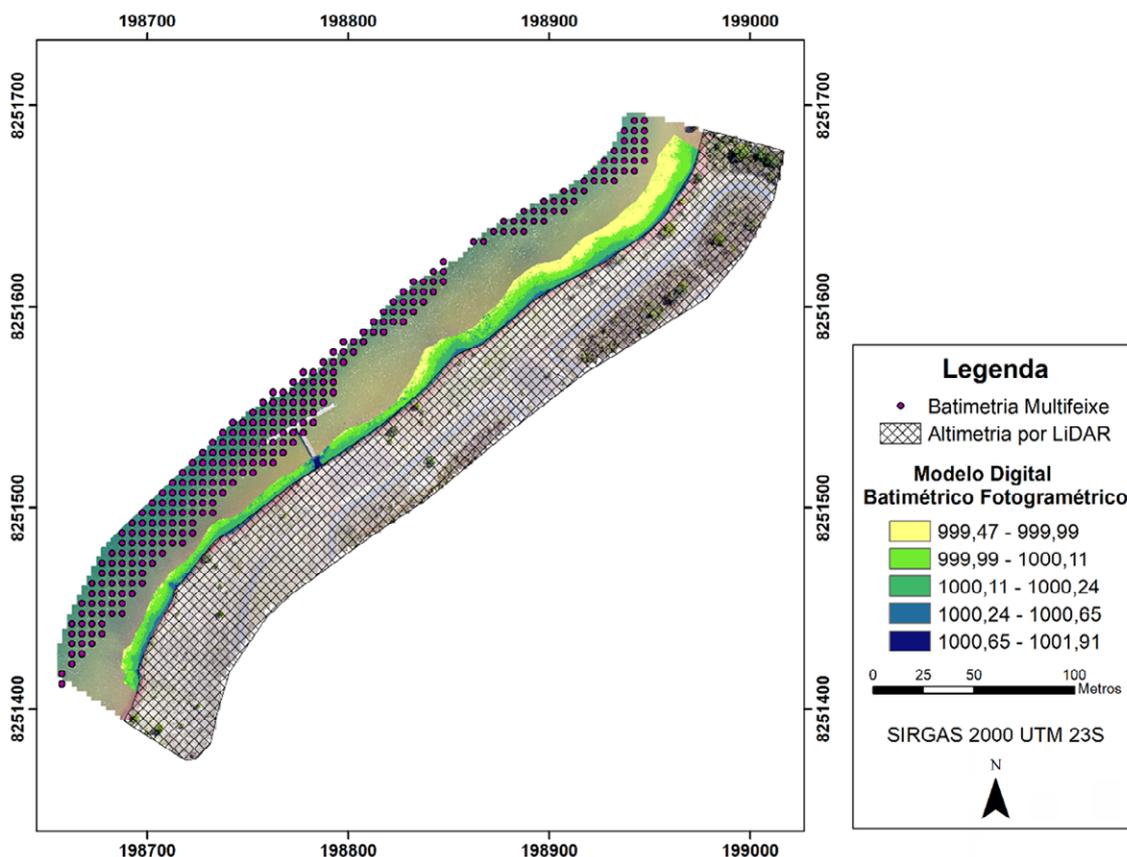


Figura 4 Modelo Digital de Terreno Fotogramétrico sobreposto aos dados de ecobatímetro multifeixe e LiDAR. O MDT completa a lacuna de dados onde as profundidades não ultrapassam 0,9m.

Tabela 1 Valores RMSE e classificação quanto ao Padrão de Exatidão Cartográfica para geração de curvas de nível espaçadas em 1 metro em escala 1:2000.

	Terreno Exposto		Terreno Submerso	
Altimetria (m)	RMSE = 0,024 m	PEC Classe A	RMSE = 0,304 m	PEC Classe B
Planimetria (m)	RMSE = 0,034 m	PEC Classe A	RMSE = 0,030 m	PEC Classe A

Nos testes de tendência t de Student e f aplicados a 95% de confiança (Tabela 2) aos erros permitiram identificar que, planimetricamente, as amostras coletadas em terreno exposto e terreno submerso não são estatisticamente diferentes em relação aos valores de média e de variância. No entanto, foi constatado que tanto os valores médios quanto as variâncias das amostras são estatisticamente diferentes em relação à altimetria.

O mapa de predição das discrepâncias altimétricas (Figura 5A) evidencia que a parte batimétrica do MDT apresenta discrepâncias altimétricas maiores em até uma ordem de grandeza que a parte de topografia exposta do mesmo. Ainda, percebe-se um aumento das discrepâncias altimétricas à medida em que o reservatório se aprofunda.

Diferentemente, o mapa de predição das discrepâncias planimétricas (Figura 5B) demonstra que as discrepâncias planimétricas se manifestam de maneira similar nas regiões expostas e submersas do MDT na escala do estudo.

Assim como previsto pela Lei de Snell e descrito na literatura (Javernick, Brasington & Caruso 2014, Woodget et al. 2015, Dietrich 2017, Skarlatos & Agrafiotis 2018), os valores de altura aparente do terreno na parte submersa se mostraram maiores que os valores de referência obtidos por receptor GNSS. Ou seja, a porção batimétrica do MDTB é subestimada. Ainda corroborando com os resultados presentes na literatura, as magnitudes das diferenças altimétricas deste trabalho se mostraram maiores conforme o aumento da profundidade da coluna d'água.

Tabela 2 Resultados dos testes de hipótese *t* de Student e *f* que comparam as discrepâncias das amostras coletadas em terreno exposto e submerso quanto à altimetria e planimetria.

Estadística	Valor de T	T crítico (95%)	Valor de F	F crítico (95%)	Conclusão
Planimetria	0,67	2,01	1,22	2,12	Amostras não são estatisticamente diferentes
Altimetria	-9,53	2,02	90,61	1,97	Amostras estatisticamente diferentes

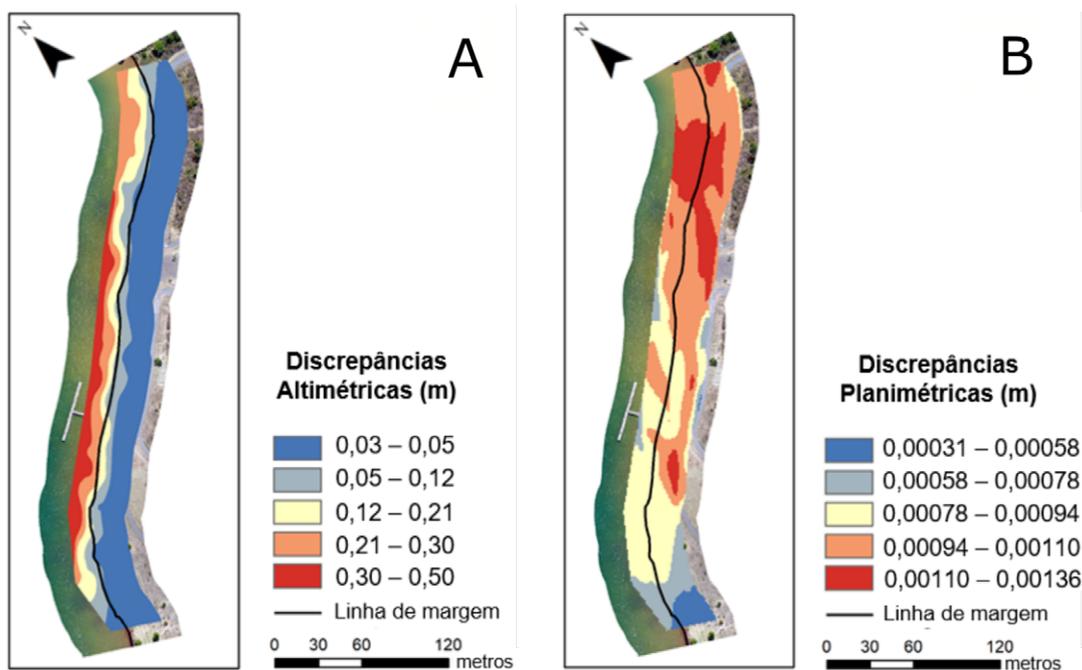


Figura 5 Mapas de predição das discrepâncias altimétricas (A) e planimétricas (B) no MDT fotogramétrico.

A regressão linear que relaciona “Profundidade do corpo hídrico” com “Discrepância Altimétrica” (Figura 6) resultou em uma reta de equação $y = -0,7x + 0,16$ e todas as discrepâncias estão contidas no intervalo de confiança de 95%. Foram encontrados coeficientes de correlação de *Pearson* = 0,87 e de *Spearman* de 0,89.

As distribuições empíricas de $n = 1.000$ dos coeficientes de correlação obtidos por reamostragem *Bootstrap* (Figura 7) mostraram que os valores encontrados nas amostras originais são confiáveis. A distribuição empírica do coeficiente de correlação de *Pearson* apresentou mediana de 0,87 e varia entre os valores 0,7 e 0,95, concentrando-se entre os valores de 0,8 e 0,95. A mesma análise, aplicada ao coeficiente de correlação de *Spearman*, resulta em mediana de 0,88 e dispersão entre os valores 0,7 e 0,95 concentrando-se entre 0,85 e 0,92. Essas análises demonstram a alta dependência da magnitude dos erros altimétricos em relação à profundidade do corpo hídrico, controlada pela Lei de Snell.

4 Conclusões

Os valores de RMSE analisados para os MDT gerados com quatro (4), cinco (5), sete (7), nove (9), onze (11) e quinze (15) pontos do controle sugerem que o mínimo de cinco (5) pontos de controle devem ser utilizados para alcançar a Classe “A” no teste do Padrão de Exatidão Cartográfico brasileiro. De acordo com os resultados obtidos, o uso de mais PCs não implicaria na melhora significativa da qualidade posicional do MDT. A adição de mais PCs por voo implicaria em uma subutilização do recurso tempo, onerando o levantamento de borda de reservatório. Apesar de este não ser o foco do estudo, caso seja necessário a realização de múltiplos voos para recobrimento do reservatório, como é a realidade da maioria dos casos, sugere-se utilizar 5 pontos de controle por sobrevoo.

O MDT fotogramétrico apresentou batimetrias de profundidades de até 0,9 m, adentrando 16 m contados

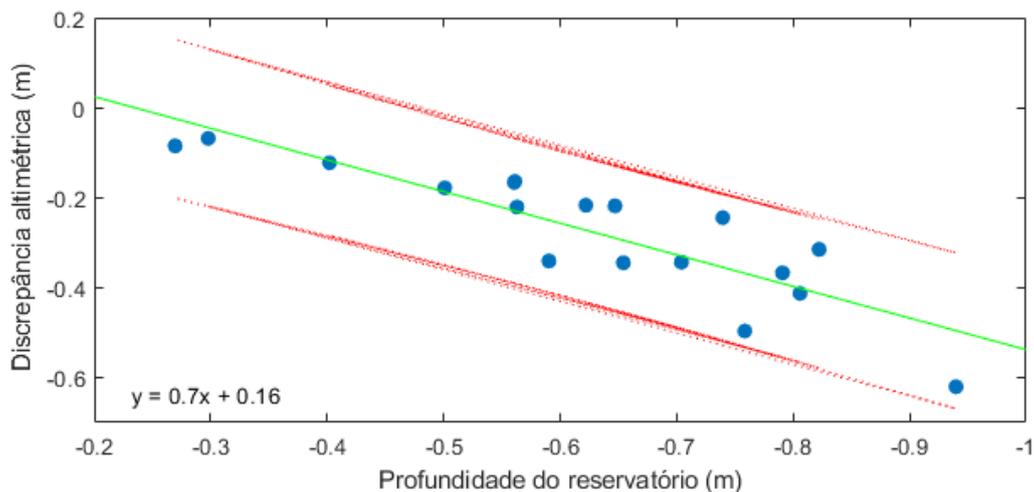


Figura 6 Regressão linear entre as discrepâncias altimétricas observadas nos PV submersos e a profundidade do reservatório, com intervalo de confiança de 95%.

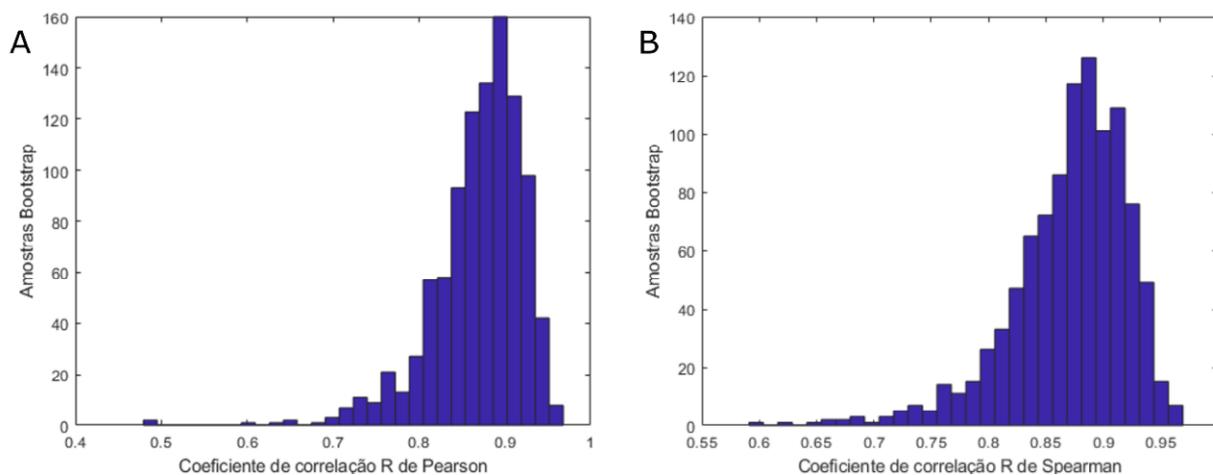


Figura 7 Reamostragem *Bootstrap* dos coeficientes de correlação: A. R de Pearson; B. Spearman.

perpendicularmente à margem em direção ao reservatório. Na porção sul da área de estudo, onde o levantamento ecobatimétrico chegou mais próximo à margem, o MDT recobriu todo o vazio de informação entre os dados de ecobatimetria e LiDAR. Nas áreas de águas mais profundas, o MDT diminuiu significativamente o vazio de dados.

Os valores de DMQ altimétrico e planimétrico das amostras Terreno Exposto e Terreno Submerso, assim como os resultados dos testes de hipótese t de Student e f demonstram que a porção batimétrica do MDT fotogramétrico apresenta discrepâncias altimétricas significativamente maiores que a porção topográfica. Já as discrepâncias planimétricas não aparentam ter

comportamentos distintos entre as duas regiões. Os mapas das discrepâncias posicionais demonstram espacialmente esse comportamento, ressaltando ainda que a magnitude das discrepâncias planimétricas aumenta conforme se aumenta a profundidade da porção submersa imageada.

Fica subentendido que, durante a restituição batimétrica por Fotogrametria Entre Dois Meios, o efeito da refração interfere significativamente na geração de modelos fotogramétricos, resultando em alturas aparentes de terreno (Z_a) maiores do que as alturas reais (Z). A qualidade planimétrica do MDT, entretanto, parece não ser influenciada pela presença de água acima do terreno a ter suas coordenadas 3D restituídas. Isso também corrobora

com o trabalho de Dietrich (2017), onde as profundidades aparentes (Z_a) são restituídas sobre as mesmas coordenadas X e Y verdadeiras.

A utilização do MDT fotogramétrico como forma de substituição ou complemento do MDT adquirido por LiDAR aerotransportado vai depender das condições de cristalinidade das margens do reservatório e exigências de precisão posicional e escala de trabalho desejada, visto que há uma perda de precisão altimétrica considerável na porção submersa do MDTB fotogramétrico.

Como sugestão de estudos seguintes, sugere-se a comparação da interpolação da nuvem de pontos fotogramétrica e a nuvem de pontos ecobatimétrica com a nuvem de pontos LiDAR e nuvem de pontos ecobatimétrica. Ainda, técnicas de correção do efeito de refração da luz para diminuição do erro altimétrico na porção submersa, como as propostas por Dietrich (2017), Skarlatos & Agrafiotis (2018) e Woodget et al. (2015), devem ser testadas em cenários reais de reservatórios, podendo ainda serem acoplados polarizadores em frente a câmera para aquisição das imagens.

5 Agradecimentos

Agradecimento à Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal (ADASA) pela bolsa de pesquisa necessária para a viabilização do projeto, referente ao convênio ADASA – Universidade de Brasília de número 01/2017, processo 197.001.077/2016.

6 Referências

- Bailily J.S., Le Coarer, Y., Languille, P., Stigermark, C.J. & Allouis, T. 2010, 'Geostatistical estimations of bathymetric LiDAR errors on rivers', *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 35, pp. 1199–210. <https://doi.org/10.1002/esp.1991>
- Carvalho, J.A.B. & Silva, D.C. 2018, 'Métodos para avaliação da acurácia posicional altimétrica no Brasil', *Revista Brasileira de Cartografia*, vol. 70, no 2, pp. 725-44. <https://doi.org/10.14393/rbcv70n2-45404>
- Danielson, J.J., Poppenga, S.K., Brock, J.C., Evans, G.A., Tyler, D.J., Gesch, D.B., Thatcher, C.A. & Barras, J.A. 2016, 'Topobathymetric Elevation Model Development using a New Methodology: Coastal National Elevation Database', *Journal of Coastal Research*, Special Issue, no. 76, pp. 75–89. <https://doi.org/10.2112/SI76-008>
- Dietrich, J.T. 2017, 'Bathymetric Structure-from-Motion: extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry', *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 42, pp. 355–64. <https://doi.org/10.1002/esp.4060>
- Erena, M., Atenza, F.J., García-Galiano, S., Dominguez, J.A. & Bernabé, J.M. 2019, 'Use of Drones for the Topo-Bathymetric Monitoring of the Reservoirs of the Segura River Basin', *Water*, vol. 11, no. 445. <https://doi.org/10.3390/w11030445>
- Hogrefe, K.R., Wright, D.J., & Hochberg, E.J. 2008, 'Derivation and integration of shallow-water bathymetry: Implications for coastal terrain modeling and subsequent analyses', *Marine Geodesy*, vol. 31, pp. 299–17. <https://doi.org/10.1080/01490410802466710>
- Javernick, L., Brasington, J. & Caruso, B. 2014, 'Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry', *Geomorphology* vol. 213, pp. 166–82. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.006>
- Lane, S.N., Widdison, P.E., Thomas, R.E., Ashworth P.J., Best, J.L., Lunt, I.A., Smith, G.H. & Simpson, C.J. 2010, 'Quantification of braided river channel change using archival digital image analysis', *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 35, pp. 971–85. <https://doi.org/10.1002/esp.2015>
- Li, J. & Heap, D. 2014, 'Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review', *Environmental Modelling & Software*, vol. 53, pp. 173-89. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>
- Marotta, G.S., Cicerelli R.E., Ferreira, A.M.R., Roig, H.L. & Abreu, M.A. 2015, 'Avaliação posicional de Modelo Digital de Superfície derivado de câmara de pequeno formato', *Revista Brasileira de Cartografia*, vol. 67, pp. 1467-77.
- Murase, T., Tanaka, M., Tani, T., Miyashita, Y., Ohkawa, N., Ishiguro, S., Suzuki, Y., Kayanne, H. & Yamano, H. 2008, 'A photogrammetric correction procedure for light refraction effects at a two-medium boundary', *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 74, pp. 1129–36. <https://doi.org/10.14358/PERS.74.9.1129>
- National Oceanic and Atmospheric Administration 2007, *Topographic and Bathymetric Data Considerations: Datums, Datum Conversion Techniques, and Data Integration*, <https://coast.noaa.gov/data/digitalcoast/pdf/topo-bathy-data-considerations.pdf>.
- Santos, A.P., Rodrigues, D.D., Santos, N.T. & Junior, J.G. 2016, 'Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais utilizando técnicas de estatística espacial: proposta de método e exemplo utilizando a norma brasileira', *Boletim de Ciências Geodésicas*, vol. 22, no. 4. <https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/49633>
- Skarlatos, D. & Agrafiotis, P. 2018, 'A Novel Iterative Water Refraction Correction Algorithm for Use in Structure from Motion Photogrammetric Pipeline', *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 6, no. 3, p. 77. <https://doi.org/10.3390/jmse6030077>
- Tewinkel G. C. 1963. 'Water depths from aerial photographs'. *Photogrammetric Engineering*, vol. 29, no. 6, pp. 1037–42.
- Tonina, D., McKean, J., Benjakar, R.M., Wright, C.W., Goode, J.R., Chen, Q., Reeder, W.J., Carmichael, R.A. & Edmondson, M.R. 2018, 'Mapping river bathymetries: Evaluating topobathymetric LiDAR survey: River bathymetry revealed', *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 44, pp. 507–20. <https://doi.org/10.1002/esp.4513>

- Tonina, D., McKean, J.A., Benjankar, R.M., Yager, E., Carmichael, R.A., Chen, Q. & Edmondson, M.R. 2020, 'Evaluating the performance of topobathymetric LiDAR to support multi-dimensional flow modelling in a gravel-bed mountain stream' *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 45, no. 12, pp. 2850-68. <https://doi.org/10.1002/esp.4934>
- Trauth, M.H., Gebbers, R., Marwan, N. & Sillmann, E. 2007, *MATLAB recipes for earth sciences*, Springer, Berlin, Germany. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12762-5>
- Woodget, A.S., Carbonneau, P.E., Visser, F. & Maddock, I.P. 2015, 'Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry', *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 40, pp. 47–64. <https://doi.org/10.1002/esp.3613>.
- Westaway, R.M., Lane, S.N. & Hicks, D.M. 2000, 'The development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow, gravel-bed rivers', *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 25, pp. 209–26. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(200002\)25:2<209::AID-ESP84>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(200002)25:2<209::AID-ESP84>3.0.CO;2-Z).

Recebido em: 27/11/2020

Aprovado em: 29/06/2021

Como citar:

Fleury, F.B.C., Roig, H.L., Marotta, G.S., Ciccerelli, R.E. & Ianniruberto, M. 2021, 'Aerofotogrametria Digital como Ferramenta Integrativa para Geração de Modelos Digitais Topobatimétricos de Reservatórios D'água', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 44: 39716. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_39716