

INFLUÊNCIA DOS GROUND CONTROL POINTS (GCPS) NA ACURÁCIA DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS GERADOS POR VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANTS) EM ÁREA DE VARIAÇÃO ALTIMÉTRICA

INFLUENCE OF GROUND CONTROL POINTS (GCPS) ON THE ACCURACY OF CARTOGRAPHIC PRODUCTS GENERATED BY UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAVS) IN AREA WITH ALTIMETRIC VARIATION

INFLUENCIA DE LOS GROUND CONTROL POINTS (GCPS) EN LA PRECISIÓN DE PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS GENERADOS POR VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANTS) EN UNA ZONA DE VARIACIÓN ALTIMÉTRICA

Lucas Krein Rademann

Doutorando em Geografia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), lucasrademann@gmail.com

Marco Antônio Da Rosa Soares

Graduando em Geografia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), ma-arco@hotmail.com

Romário Trentin

Professor titular do Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), romario.trentin@gmail.com

George Gabriel Schnorr

Graduando em Geografia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), giorgeschnorr@gmail.com

RESUMO: O processamento de imagens obtidas por Veículos Aéreos não Tripulados (VANTS), com o avanço na técnica *Structure from Motion – Multi-View Stereo* (SfM-MVS), vem se popularizando nos estudos da área da Geociências, tendo diversas aplicações pelo seu baixo custo, rapidez e praticidade do método. A praticidade faz que usuários menos experientes utilizem o método e, por muitas vezes, a precisão cartográfica é negligenciada. A precisão e acurácia dos modelos obtidos com VANTS têm sido alvos de pesquisas recentes, mas carecendo ainda de estudos aprofundados no mapeamento de áreas escarpadas onde a amplitude altimétrica pode interferir na qualidade do modelo. A presente pesquisa teve por objetivo analisar a variação do erro médio quadrático (RMSE) de acordo com a influência do número de *Ground Control Points* (GCPs) e estimar uma quantidade ideal de pontos de controle que devem ser utilizados para produzir resultados acurados em uma área de extração de basalto a céu aberto em forma de patamares no estado do Rio Grande do Sul com uma variação altimétrica de aproximadamente 50m. Com um número de 10 a 16 GCPs foi observada uma estabilização do erros na área de estudo, mas outros fatores além do número dos GCPs se mostraram importantes na variação do erro, como distribuição dos pontos, iluminação, taxa de sobreposição das imagens e variação da escala devido à altura da foto.

Palavras-chave: Avaliação de precisão; Pontos de controle; RMSE; SfM-CMVS.

ABSTRACT: The processing of images obtained by Unmanned Aerial Vehicle UAVs, with advances in the Structure from Motion – Multi-View Stereo (SfM-MVS) technique, has become popular in studies in the area of Geosciences, having several applications due to its low cost, speed and practicality of the method. Practicality means that less experienced users use the method and, often, cartographic accuracy is left in the background. The precision and accuracy of models obtained with UAVs have been the subject of studies in recent years, but there is still a need for in-depth studies on the mapping steep areas where the elevation range can interfere in the quality of the model. The objective of this research was to analyze the variation in the Root Mean Square Error (RMSE) according to the influence of the number of Ground Control Points (GCPs) and to estimate an ideal number of control points that should be used to produce accurate results in an area of open pit basalt extraction in the form of platforms in the state of Rio Grande do Sul with an elevation variation of approximately 50m. With a number of 10 to 16 GCPs, a stabilization of errors was observed in the study area, but other factors besides the number of GCPs proved to be important in the error variation, such as point distribution, lighting, image overlap rate and variation in scale due to the height of the photo.

Keywords: Accuracy assessment; Control points; RMSE; SfM-MVS.

RESUMEN: El procesamiento de imágenes obtenidas por Vehículos Aéreos no Tripulados (VANTs), con avances en la técnica *Structure from Motion – Multi-View Stereo* SfM-MVS, se ha popularizado en estudios en el área de Geociencias, teniendo diversas aplicaciones por su bajo costo, rapidez y practicidad del método. La practicidad significa que los usuarios menos experimentados utilizan el método y, a menudo, la precisión cartográfica queda en un segundo plano. La precisión y exactitud de los modelos obtenidos con vehículos aéreos no tripulados han sido objeto de estudios en los últimos años, pero todavía es necesario realizar estudios en profundidad sobre el mapeo de áreas escarpadas donde el rango de altitud puede interferir con la calidad del modelo. El objetivo de esta investigación fue analizar la variación del Error Medio Cuadrado (RMSE) según la influencia del número de *Ground Control Points* (GCP) y estimar un número ideal de puntos de control que deberían usarse para producir resultados precisos en un área de extracción de basalto al cielo abierto, en la forma de plataformas en el estado de Rio Grande do Sul, con una variación de elevación de aproximadamente 50 m. Con un número de 10 a 16 GCP, se observó una estabilización de los errores en el área de estudio, pero otros factores además del número de GCP demostraron ser importantes en la variación del error, como la distribución de puntos, la iluminación, la tasa de superposición de imágenes y la variación en escala debido a la altura de la foto.

Palabras clave: Evaluación de precisión; Puntos de control; RMSE; SfM-MVS.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de veículos aéreos não tripulados (VANTs) através da fotogrametria digital e visão computacional nos estudos do campo das Geociências, têm apresentado um crescimento nos últimos anos (GONÇALVES e HENRIQUES, 2015; LIU et al., 2016; RADEMANN, TRENTIN e ROBAINA, 2022). Através destas tecnologias se tornaram mais acessíveis produtos cartográficos de alta resolução espacial, permitindo novas análises na ciência geográfica (GARRET e ANDERSON, 2018). Porém, a precisão e acurácia dos produtos do processamento de imagens aéreas são questões ainda a serem investigadas em trabalhos que requerem uma precisão centimétrica dos dados.

Os VANTs comumente utilizados na obtenção de imagens para fins de mapeamentos possuem receptores *Global Navigation Satellite System* (GNSS) que auxiliam na sua orientação durante a missão de voo e na localização das imagens adquiridas, no entanto estes dados não são suficientemente precisos para validar os produtos gerados a partir das suas imagens (JAMES et

al., 2017). Para contornar este problema é utilizada a correção do modelo através do uso de *Ground Control Points* (GCPs), que são pontos de controle visíveis no modelo gerado e que possuem uma coordenada conhecida com alta precisão (WESTOBY et al., 2012), sendo uma metodologia bastante utilizada em diversos tipos de mapeamentos (CARRERA-HERNÁNDEZ et al., 2016; GONG et al., 2019; TURNER, LUCIEER e WATSON, 2012; UYSAL, TOPRAK e POLAT, 2015).

As ferramentas utilizadas para a obtenção dos GCPs são variadas, como a estação total (STÖCKER, ELTNER e KARRASCH, 2015;), receptor GNSS com *Real Time Kinematic* (RTK) (VERDONK, 2015; LIU et al., 2016; GLENDELL, et al. 2017) e GNSS (TURNER, LUCIEER e WALLACE, 2013). Além delas, outros parâmetros do pré-processamento, como a taxa de sobreposição e ângulo da câmera, são também responsáveis pela qualidade final e precisão do produto fotogramétrico (GONÇALVES et al., 2021).

O processamento de imagens aéreas obtidas por meio de aerolevanteamento com VANT utilizam a ferramenta *Structure-from-Motion* (SfM), algoritmo de fotogrametria digital baseado em computação visual, que extrai informações 3D de uma série de imagens sobrepostas (ELTNER e SOFIA, 2020). Esta ferramenta permitiu que mapeamentos em nível de detalhe pudessem ser executados por um baixo custo e por usuários pouco experientes (HERNÁNDEZ, et al., 2016). Por outro lado, a própria interface amigável proporcionada ao usuário pela junção dos algoritmos SfM e *Multi-View-Stereo* (MVS) pode ser um dos motivos da falta de estudos aprofundados sobre o tema (JAMES et al., 2017).

A avaliação da influência dos GCPs nos produtos cartográficos gerados a partir da ferramenta SfM se torna indispensável pois para uma análise detalhada é necessário um produto acurado. A literatura acerca do estudo da acurácia em função da quantidade e distribuição dos GCPs é recente (JAMES et al., 2017; AGÜERA-VEJA, RAMIREZ e CARRICONDO, 2017). Bolkas (2019) salienta que o aumento da quantidade e a diminuição da distância entre os GCPs resulta em um incremento da redundância na estimativa de orientação das imagens e consequentemente aumenta a sua acurácia, porém nem todos os casos as distâncias entre os GCPs é determinante, como salienta Nota, Nijland e De Haas (2022). Ainda, de acordo com a característica topográfica da área ou presença de construções e vegetação, a necessidade de GCPs podem variar para manter uma boa qualidade do produto cartográfico (BOLKAS, 2019; JAMES et al., 2017; SANZ-ABLANEDO et al., 2018).

Tendo em vista que a característica topográfica do local mapeado pode interferir na qualidade do produto cartográfico, surge a necessidade de avaliar a influência da quantidade e da distribuição dos GCPs em áreas com amplitudes altimétricas. Nesse contexto, o presente trabalho busca avaliar um estudo de caso a partir da análise da qualidade do produto cartográfico gerado a partir de levantamento aéreo utilizando VANT e o fluxo de trabalho SfM-CMVS em função da quantidade e distribuição dos GCPs em uma área de extração de basalto no Rio Grande do Sul, Brasil (Figura 1). Além disso, busca encontrar um valor ótimo de pontos de controle que o modelo deve possuir, apresentando um erro estável com a implantação do mínimo de GCPs possível, uma vez que a sua adição de pontos de controle nem sempre está associada diretamente com uma acurácia melhor (CARRICONDO et al., 2018).

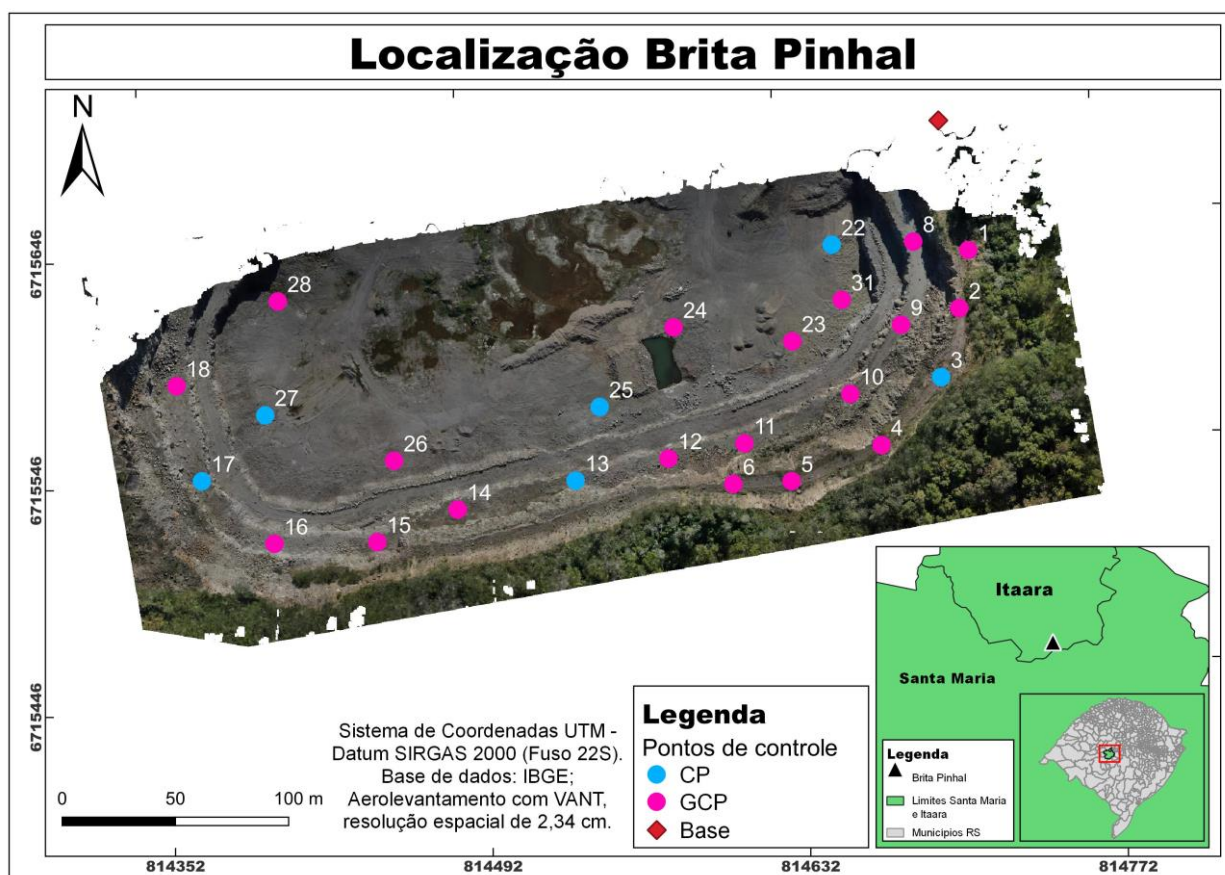


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Autores (2023).

A área de estudo desta pesquisa se localiza nos limites da empresa Brita Pinhal Indústria e Comércio Ltda, no município de Itaara, Rio Grande do Sul. A área em questão se refere a uma pedreira de extração de basalto para construção civil e agricultura, organizada em bancadas. Segundo o CPRM (2008) a fácies Caxias é aflorante no local, sendo caracterizada por derrames em composição intermediária a ácida, com forte disjunção tabular no topo dos derrames e maciço na porção central. A variação altimétrica na área de extração da pedreira é de 43,39m em uma área de aproximadamente 13,4 ha, possuindo escarpas íngremes que podem influenciar na qualidade do mapeamento

2. MATERIAL E MÉTODOS

O voo para a obtenção das imagens de VANT foi realizado de forma automática, onde o plano de voo foi elaborado no aplicativo de celular Dronelink e executado no dia 26 de junho de 2023 com a utilização do VANT Mavic Air 2S, da fabricante DJI. Foram obtidas imagens em nadir (90° graus no ângulo da câmera), com altura de voo de 80 metros e em velocidade de 8 m/s. As sobreposições lateral e frontal utilizadas foram de 75% e 85%, respectivamente, resultando em 222 fotos e 7 minutos de voo.

A coleta dos GCPs foi realizada com o aparelho receptor GNSS com RTK modelo Reach RS2+ da fabricante EMLID. Foi utilizado um marco geodésico estabelecido pelo método de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) como base para o funcionamento do par RTK. Foram obtidos um total de 25 pontos, dos quais 19 foram utilizados como GCPs e 6 como *checkpoints* (CP). Os pontos de controle foram coletados e bem distribuídos espacialmente por toda a área mapeada, e em três diferentes patamares da pedreira (Figura 1).

Para o processamento das imagens obtidas no aerolevanteamento foi utilizado o *software* Agisoft Metashape versão 2.0, com licença do grupo de pesquisa. O fluxo de trabalho utilizado no *software* está ilustrado na Figura 2, baseado na metodologia proposta por Westoby et al. (2012). O alinhamento automático das imagens foi realizado na qualidade *Highest*, essa etapa consiste na delimitação automática de pontos de referência nas fotos e, a partir deles, cria-se uma malha de pontos invariáveis conforme a escala, rotação e iluminação e que podem ser vistos em mais de uma imagem, chamados de *tie points*. (AGISOFT, 2023).

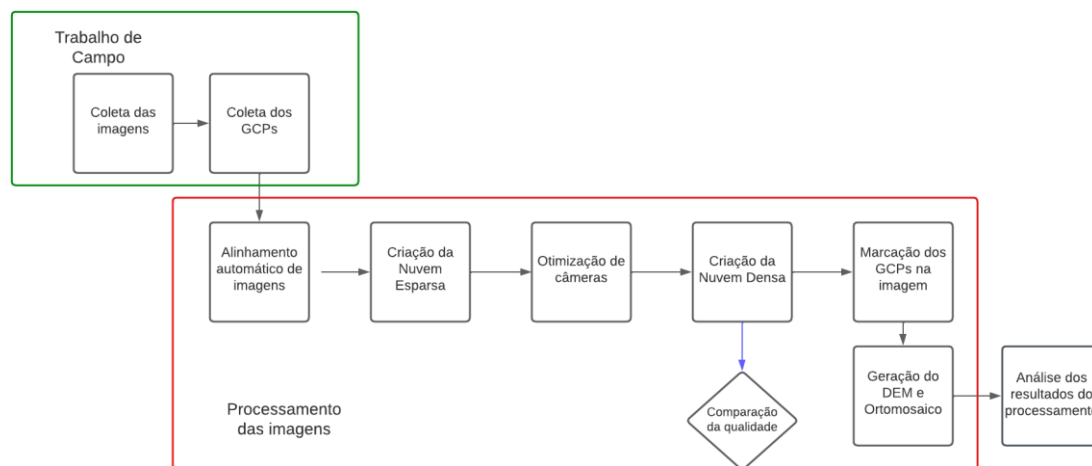


Figura 2 – Fluxograma das etapas de trabalho. Fonte: Autores (2023).

Posteriormente foi realizada a calibração da câmera, que serve para a correção das distorções dos ângulos internos da câmera. Foi efetuada com os parâmetros de distância focal, f , coordenadas de pontos, c_x e c_y , afinidade e não ortogonalidade, b_1 e b_2 , coeficiente de distorção radial, k_1 , k_2 , k_3 , k_4 e coeficiente de distorção tangencial, p_1 e p_2 (Figura 3).

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	2923.91	0.78	1	-0.08	-0.06	0.33	-0.29	-0.23	0.24	-0.22	0.18	-0.02	-0.04
Cx	-17,01	0.26		1	0.02	-0.08	0.04	0.00	-0.02	0.02	-0.02	0.78	0.01
Cy	-10.3988	0.28			1	-0.02	0.01	-0.01	0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.87
B1	-7.10602	0.18				1	-0.08	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.03	-0.02
B2	0.5065	0.15					1	0.00	-0.02	0.02	-0.01	0.02	0.00
K1	-0.0403066	0.001						1	-0.97	0.093	-0.88	0.00	0.01
K2	0.213699	0.0055							1	-0.99	0.96	-0.01	-0.01
K3	-0.267841	0.012								1	-0.99	0.02	0.01
K4	0.0619289	0.0083									1	-0.02	-0.01
P1	-0.000456962	3.1×10^{-5}										1	0.00
P2	0.000293954	3.6×10^{-5}											1

Figura 3 – Valores da calibração da câmera. Fonte: Autores (2023).

Foram criadas nuvens densas em todas as qualidades, com o filtro *Mild* ativado. De acordo com Bolkas, (2019), a qualidade do processamento da *Dense Cloud* é um fator que influencia no erro médio quadrático dos GCPs. No processamento realizado pelos autores não foram encontrados valores distintos no RMSE em diferentes qualidades, diante disso, optou-se por usar a qualidade *Ultra High*.

Nas últimas etapas do processamento foi feita a correção do modelo gerado através da localização dos GCPs nas fotos dentro do *software* Agisoft Metashape. Para tanto, são informadas as coordenadas dos GCPs que são posicionados individualmente em cada imagem em que está presente. Do mesmo modo os *checkpoints* são posicionados nas imagens, para após realizar a comparação das coordenadas reais e coordenadas calculadas destes pontos. Após esta etapa, é realizada a criação do DEM a partir da nuvem densa através da interpolação IDW. Após a sua conclusão, utilizou-se o DEM para produzir o ortomosaico.

Para a análise da acurácia dos GCPs e dos *checkpoints* foram utilizados os erros $RMSE_{xy}$ e $RMSE_z$, que respectivamente correspondem aos erros horizontais e erro do eixo z, através das Equações 1 e 2 (AGÜERA-VEGA, CARVAJAL-RAMÍREZ e CARRICONDO, 2017):

$$RMSE_{xy} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(X_{0i} - X_{GPSi})^2 + (Y_{0i} - Y_{GPSi})^2]}{n}} \quad 1$$

onde:

n: número de *Checkpoints*

X_{0i} , Y_{0i} : coordenadas X e Y medidas no ortomosaico para os checkpoints.

X_{GPSi} , Y_{GPSi} : coordenadas X e Y medidas com o GPS.

$$RMSE_z: \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Z_{0i} - Z_{GPSi})^2}{n}} \quad 2$$

onde:

Z_{0i} : altitude dos checkpoints.

Z_{GPSi} : coordenada Z dos checkpoints medida com o GPS.

A avaliação da acurácia do produto cartográfico gerado se deu através do estabelecimento de 6 *checkpoints*. Estes *checkpoints* são pontos coletados com o GNSS e que não são utilizados para a correção do modelo, sendo comparada a coordenada medida no momento da coleta e a coordenada no modelo. Foram medidos os erros dos modelos gerados partindo do uso de 19 GCPs e diminuindo a quantidade de 1 GCP por processamento, até o número mínimo de 3 GCPs. Para a eliminação dos GCPs do processamento foi observada a distribuição dos mesmos na área de estudo, buscando manter pontos de controle em toda a área mapeada e com distância similar entre os GCPs. Foi utilizada a metodologia reversa, retirando os pontos de controle do modelo e avaliando o erro para diminuir a interferência do operador no erro geral, desta forma uma vez que o GCP foi estabelecido no modelo, ele não é mais alterado, somente removido seguindo a ordem do trabalho.

A qualidade do produto foi estabelecida com base na Resolução ANM N°123, de 1° de dezembro de 2022, a qual:

Estabelece os parâmetros para avaliação e aceitação de produtos decorrentes de aerolevantamento apresentados à Agência Nacional de Mineração (ANM), em especial os obtidos por Aeronave Remotamente Pilotada (RPAs).

Ainda, de acordo com a resolução, os GCPs devem ser avaliados por meio de teste de normalidade Shapiro-Wilk, com 95% de nível de confiança (5% nível de significância) e teste de tendência t-student com 90% de nível de confiança (10% nível de significância). Em adição, os produtos de aerolevantamento precisam atingir a “Classe A” estabelecida no Decreto N° 89.817, de 20 de junho de 1984, os critérios em relação às classes estão dispostos nas Tabela 1. Em vista

disso, utilizou-se o programa GeoPEC para avaliação da acurácia posicional obedecendo o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) de acordo com metodologias utilizadas por ALVES e BAPTISTA (2020) e SANTOS et al. (2016).

Tabela 1 – Valores do PEC e do EP planimétrico.

Classe	PEC	EP
A	0,5mm x escala	0,3mm x escala
B	0,8mm x escala	0,5mm x escala
C	1,0mm x escala	0,6mm x escala
Classe	PEC	EP
A	1/2 equidistância	1/3 equidistância
B	3/5 equidistância	2/5 equidistância
C	3/4 equidistância	1/2 equidistância

Fonte: Organizado pelos autores (2023).

Uma vez obtidos os dados dos erros em XY e Z dos 6 *checkpoints* nos diferentes processamentos, os dados foram tabulados para a análise estatística. Foi utilizado o *software* Origin Pro 2021 para a análise estatística e elaboração dos gráficos presentes no estudo. Posteriormente foi realizada a síntese dos resultados e a sistematização das análises dos erros encontrados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processamento dos dados no *software* Agisoft Metashape resultou em um ortomosaico com resolução espacial de 2,34 cm/pixel cobrindo uma área total de 13,4 ha e uma densidade de pontos da nuvem densa de 0,182 pontos/cm². O processamento ideal, utilizando os 19 GCPs coletados, apresentou um RMS dos GCPs de 1,64 cm, ou seja, o ajuste do modelo entre os pontos de controle coletados foi de 1,64 cm. Já considerando o erro real, levando em consideração o RMS dos *checkpoints*, foi obtido um valor de 3,12cm.

Quando analisado o comportamento do erro nos GCPs e nos *checkpoints* (CP) de acordo com a quantidade de pontos de controle inseridos no processamento é possível verificar um comportamento de aumento do erro dos GCPs na medida que mais são utilizados, tendendo a uma estabilização quando atinge entre 10 e 12 GCPs, conforme é possível observar na Figura 3A. Já o comportamento do erro dos CPs se dá de forma inversa, possuindo um erro maior quando utilizados poucos GCPs e diminuindo na medida que aumentam os pontos de controle, mas também apresentando uma tendência de estabilização a partir de 10 GCPs.

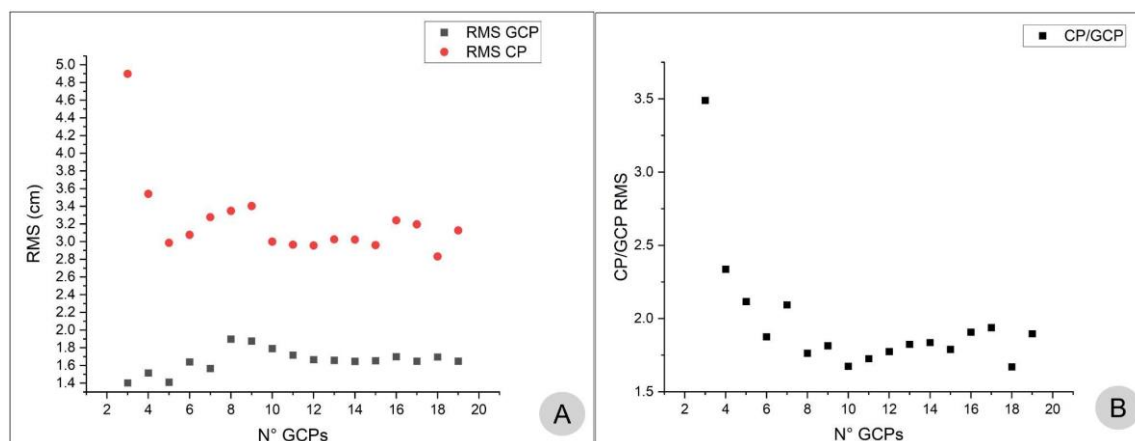


Figura 4 – Representação gráfica do erro médio quadrático nos GCPs e CPs em função do número de GCPs (A) e a relação entre o RMS dos CP e dos GCPs em função do número de pontos de controle (B). Fonte: Autores (2023).

Cabe ressaltar o comportamento inverso do RMS entre os GCPs e CP, tornando evidente que um baixo número de GCPs e com baixo erro não está associado a uma boa acurácia do modelo, demonstrado pelo alto erro nos *checkpoints*. Poucos pontos de controle possuem pequena amostragem para realizar a correção geométrica do modelo, mesmo que apresentem um pequeno erro no ajuste entre si. Quando analisada a relação entre o erro médio quadrático dos CPs e GCPs (Figura 4B) é possível observar que neste voo realizado o erro sempre foi de pelo menos 1,5x maior nos *checkpoints*, atingindo o valor máximo com 2 GCPs (3,48x) e caindo na medida que aumentam os pontos de controle, tendendo a uma estabilização com o valor de 8 GCPs.

Considerando a existência de uma escarpa íngreme com amplitude altimétrica superior a 40 metros na área de estudo, foram analisados os erros no eixo Z em função do número de GCPs (Figura 5). Novamente é observado um erro menor no ajuste dos GCPs porém com uma diminuição do erro até a utilização de 8 GCPs, seguido de um pequeno aumento e se mantendo próximo a 0,75 cm de erro. O comportamento dos erros em Z nos CP foi igual ao RMS, comentado anteriormente, porém o maior erro encontrado foi com 3 GCPs (4,02cm) e o menor foi obtido com a inserção de 18 GCPs, resultando em 1,92 cm.

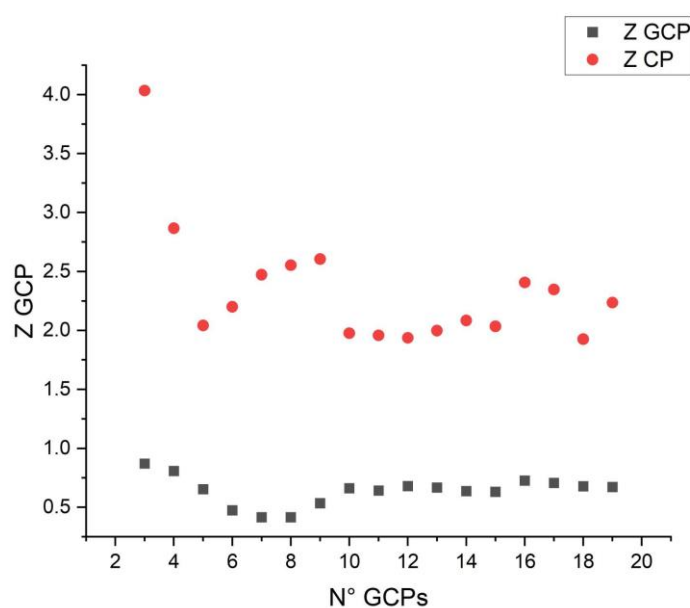


Figura 5 – Relação do erro altimétrico, eixo Z, nos GPCs e CPs em função do número de GCPs utilizados. Fonte: Autores (2023).

A acurácia do modelo se mostrou bastante sensível ao aumento do número dos GCPs, sendo possível observar no erro dos CPs nos eixos XY e Z (Figura 6) de forma que a redundância na estimativa das coordenadas das imagens gere um produto mais acurado, assim como descrito por Bolkas (2019). O eixo Z apresenta maior variação no erro mas há uma estabilização com menos pontos de controle do que o eixo XY. De maneira geral no gráfico da Figura 6 é possível observar uma nuvem de pontos com pequena variação dos erros entre 10 a 16 GCPs sendo um número bom para utilizar no levantamento desta área de estudo. Apesar disso há uma variação do erro do modelo, podendo diminuir a acurácia com mais pontos de controle, devido a diferença de qualidade dos GCPs, algo já observado na literatura por Meinen e Robinson (2020).

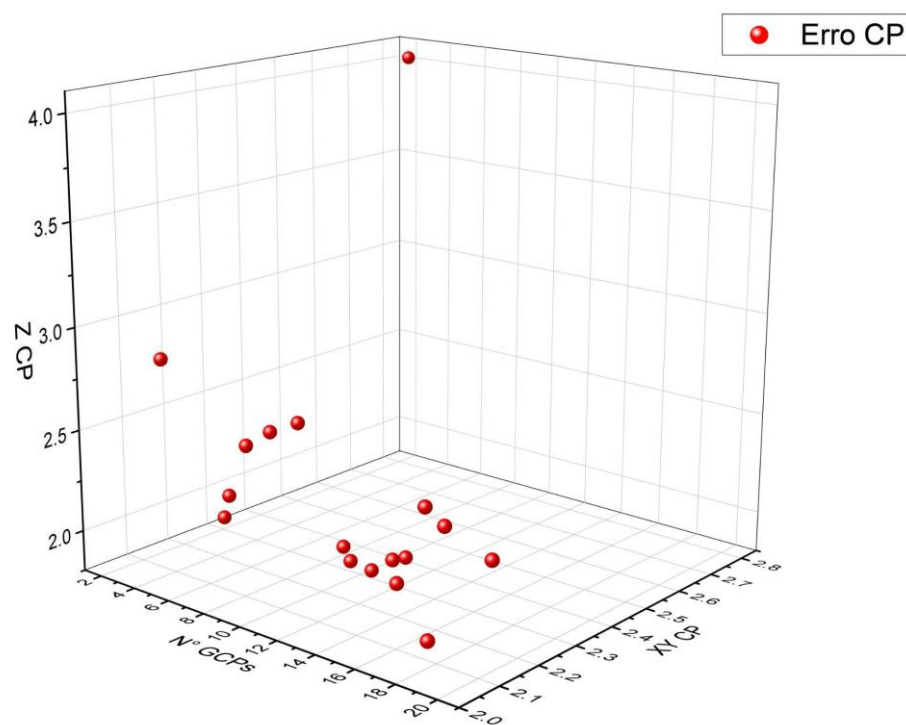


Figura 6 – Erro dos *checkpoints* no eixo Z e XY em função do número de GCPs alocados. Fonte: Autores (2023).

Considerando os erros encontrados no processamento com a utilização de 10 GCPs é possível afirmar que o modelo gerado é um produto cartográfico de classe A de acordo com o PEC brasileiro em uma escala planimétrica máxima de 1:120 e a utilização de equidistância de curvas de nível mínima de 0,2 metros. Desta forma, é possível constatar que, para a área de estudo, a utilização de 10 GCPs resulta em produtos cartográficos de alta acurácia nas escalas acima citadas, nas quais permitem uma análise em nível de detalhe de forma satisfatória.

Quando analisado o erro dos *checkpoints* de forma isolada há um comportamento distintos dos CPs entre si diante do número de pontos de controle utilizados. Os *checkpoints* com o menor erro encontrados em todos os cenários são o 13, 27 e 17, localizados na porção central e oeste da área de estudo, conforme mapa da Figura 7. Assim como descrito por Sanz-Ablanedo et al. (2018), os locais de mais baixa altitude, em modo geral, apresentaram erros maiores, devido ao tamanho do pixel maior nestas áreas causado pela escala da foto original como no caso dos *checkpoints* 22 e 25.

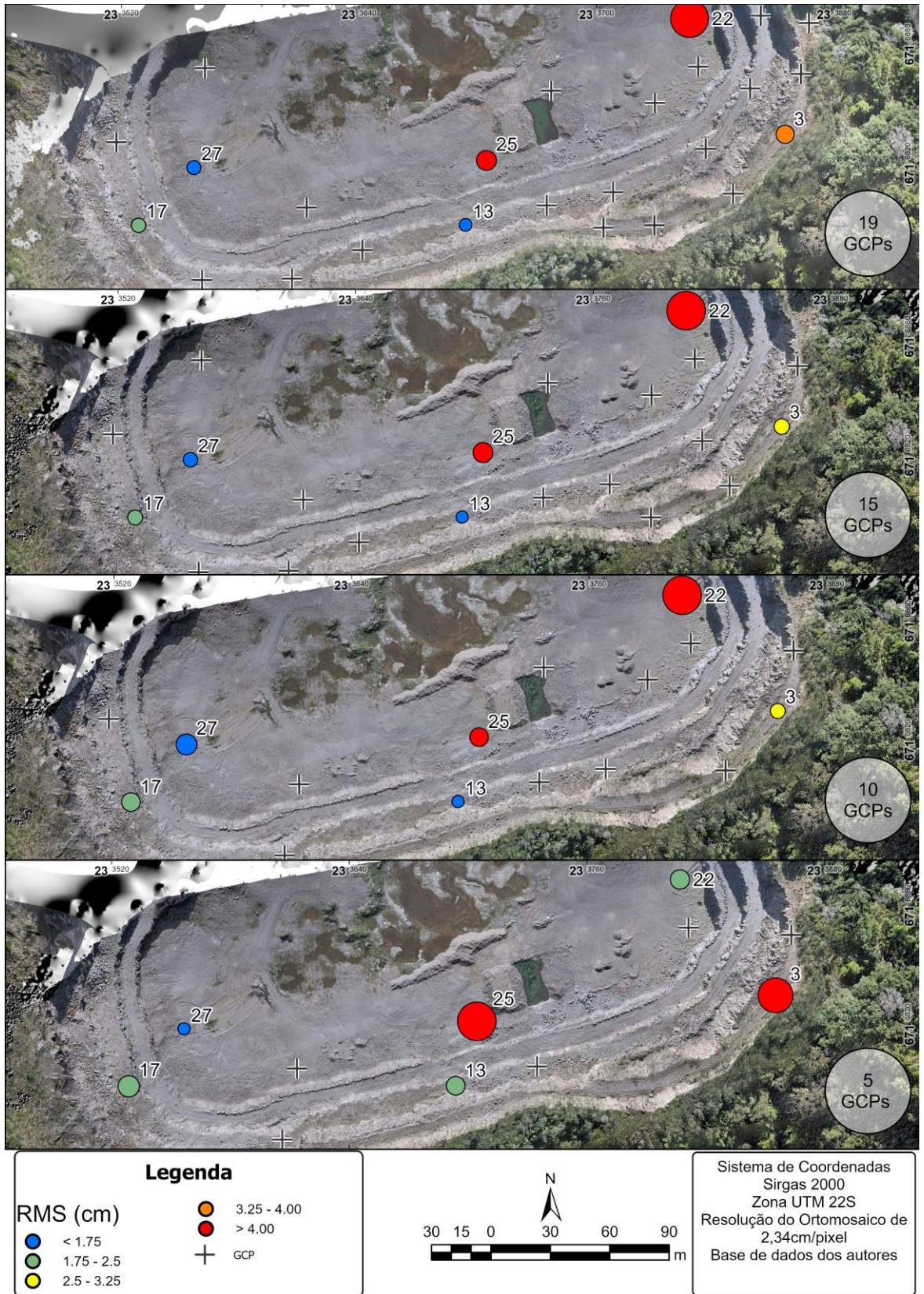


Figura 7 – Variação do Erro Médio Quadrático dos checkpoints analisados de acordo com o número de GCPs utilizados. Fonte: Autores (2023).

A variação da acurácia do modelo em certas áreas, como exposto nos mapas da Figura 5, indicam que parâmetros de voo, distorções da câmera e quantidade de fotos que cobrem os pontos influenciam na qualidade do modelo (ANDERS et al., 2020; GABRLIK et al, 2018; MEINEN e ROBINSON, 2020; TURNER, LUCIEER e WATSON, 2012). Outro fator importante na qualidade do produto gerado é a distribuição dos GCPs (JAMES et al., 2017; SANZ-ABLANEDO et al., 2018), é notória a diminuição do erro dos *checkpoints* 13 e 25 (5 GCPS e 10 GCPS) no centro da área de estudo quando existem pontos de controle em todas as direções, de forma que a área do *checkpoint* esteja cercada de pontos de apoio.

Observa-se um erro constante do *checkpoint* 22, tendo um erro inferior apenas com 5 GCPs onde o valor do erro geral do modelo é insatisfatório. O ponto se localiza à margem da concentração dos GCPs, mesmo que possua um número relativamente alto de pontos de controle próximo a esta área. Desta forma é possível afirmar que mais importante que a quantidade de GCPs é a sua distribuição na área mapeada.

Na Figura 8A é observado um erro maior em todos os *checkpoints* quando utilizados poucos GCPs, mas que gradativamente o erro diminui com a inserção de mais pontos de controle. É notado também que após a estabilização dos erros, os pontos com maior e menor erro se mantêm os mesmos, indicando que há uma diferença de qualidade do modelo em diferentes porções da área de estudo. Na Figura 8B é observado o mesmo comportamento no eixo Z, que após o número de 10 GCPs o erro se mantém estável e as linhas de erro dos pontos apesar de variar, não mudam de posição, no sentido que os *checkpoints* com menor erro permanecem os mesmos.

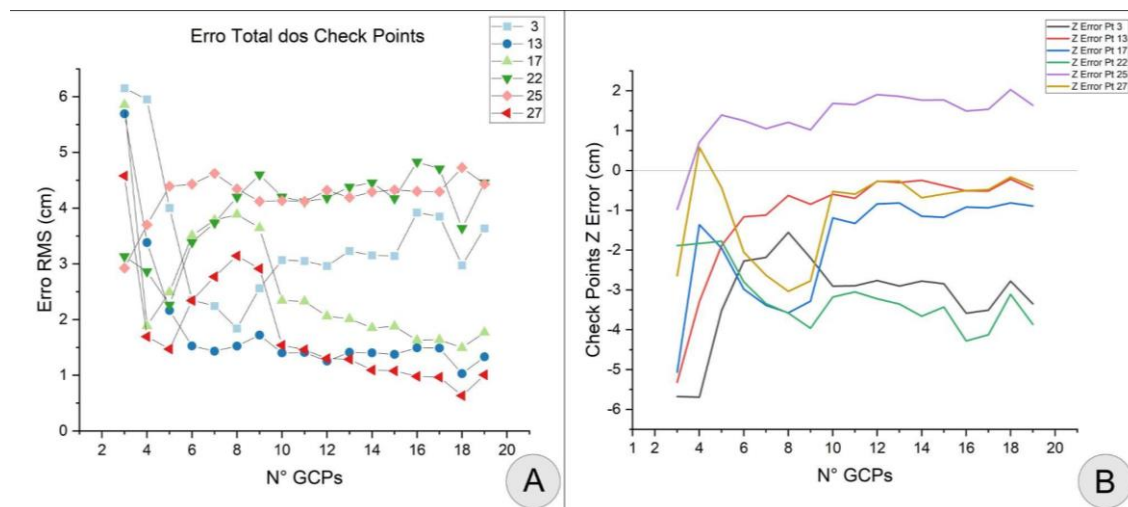


Figura 8 – Representação gráfica do erro médio quadrático em relação ao número de GCPs em todos os *checkpoints* (A) e do erro no eixo Z (B). Fonte: Autores (2023).

De modo geral é possível observar que o uso de equipamentos de alta precisão como o GNSS RTK para a correção geométrica de modelos utilizando o algoritmo SfM-CMVS torna o erro muito baixo, apresentando alta acurácia, com RMS variando entre 2,83 a 4,89cm. No aerolevanteamento realizado o RMS do modelo se manteve estável e aceitável a partir de 10 GCPs, porém como discutido anteriormente, a distribuição dos GCPs se mostrou de grande importância para a acurácia do modelo. Quanto ao erro no eixo Z, na maioria dos *checkpoints* foi observada uma subestimação da altitude (Figura 8B) mas com erros aceitáveis para a escala a ser mapeada, se mantendo inferior a 3cm com 10 GCPs, sendo assim, um produto de alta acurácia mesmo para áreas onde há variação altimétrica significativa.

A influência das características do relevo na acurácia dos modelos obtidos com o algoritmo SfM-CMVS já foi estudada anteriormente, concluindo que quanto maior a variação do relevo, menor é a acurácia (COOK, 2017). Turner, Lucieer e Watson (2012) em seu trabalho

observaram valores maiores de RMS em *checkpoints* localizados no topo e na base da encosta, tendo uma relação do erro com os extremos de altitude. Da mesma forma, Ren et al. (2020) observaram ao mapear uma área de depósito de resíduos de carvão com área de 101 hectares e uma variação altimétrica de aproximadamente 60 metros, que a distribuição dos pontos de controle é de maior importância para a acurácia do que a quantidade dos mesmos, assim como Meinen e Robinson (2020), em seu trabalho. Desta forma os resultados do presente trabalho reforçam a necessidade de atenção à distribuição dos GCPs para aumentar a acurácia de modelos obtidos com a ferramenta SfM-CMVS, sobretudo quando há feições com variação altimétrica que podem comprometer a acurácia.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral o presente trabalho foi efetivo em encontrar uma linha de estabilidade, na qual há variações sutis frente à adição de pontos de controle, e um valor mínimo de GCPs que devem ser utilizados para um produto cartográfico com números admissíveis na precisão e acurácia. A comparação entre as linhas de variação do RMS dos GCPs e CPs comprova que os baixos erros apresentados por *softwares* quando há um pequeno número de pontos de controle não necessariamente significam uma boa acurácia do modelo.

A área de estudo, sendo uma pedreira de lavra a céu aberto organizada em bancadas, possui uma amplitude altimétrica superior a 40m, o que influencia nos erros em Z. Nesse eixo o erro apresenta uma pequena ascensão próxima aos 8 GCPs, em sequência ele diminui e apresenta uma estabilização com a adição de dois pontos de controle. Quando analisados os erros médios dos eixos e a relação entre eles, é recomendado um número mínimo de 10 GCPs, ponto no qual o RMS alcança os valores mínimos para se encaixar na Classe A do PEC brasileiro.

Os gráficos demonstrados ao longo do trabalho, evidenciam uma sensibilidade considerável conforme os GCPs são adicionados ao modelo, o que poderia ter sido atenuado com uma amostra maior, utilizando uma quantidade maior de pontos de controle. Nesse contexto, ainda que aconteça uma variação no RMSE, mais presente no eixo Z, mas também ocorrendo em XY, é possível identificar um intervalo entre 10 a 16 GCPs como um número indicado para levantamentos em áreas similares, com escarpas superando 40 metros de altura em um comprimento de rampa de cerca de 45 metros.

Outros fatores, além da quantidade de GCPs e CPs, também são responsáveis por diminuir ou aumentar o erro médio quadrático do modelo, como taxa de sobreposição, iluminação do local, número de imagens e diferentes escalas de fotos, sendo esse último bastante visível nos *checkpoints* 22 e 25, localizados na base da pedreira. Nesse sentido, os resultados apontaram que um dos fatores mais importantes para um modelo acurado, com escala que permita análises em nível de detalhe e que o erro esteja de acordo com os parâmetros previsto para a classe A do Decreto Nº 89.817, é a distribuição dos pontos de controle, com mais impacto que a própria quantidade do mesmo. A afirmação prévia é confirmada na análise dos erros dos *checkpoints* e a continuidade da posição dos CPs com um número baixo ou alto de GCPs, ou seja, há áreas em que a qualidade dos pontos de controle é menor quando comparadas às outras, tendo em vista a sua eficácia em ajustar o modelo gerado.

REFERÊNCIAS

AGISOFT. **Agisoft Metashape User Manual** - Professional Edition, Version 2.0. 2023.

AGÜERA-VEJA et al. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. **Measurement**, v. 98, p. 221-227, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.002>. Acesso em: 27 nov. 2023.

ALVES, Samir de Souza Oliveira; BAPTISTA, Alessandra Carreiro. Avaliação de Produtos Cartográficos e Extração de Parâmetros Geomorfométricos Obtidos por um VANT. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n. 4, p. 133-143, 2020. Disponível em: http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_133_143. Acesso em: 08 dez. 2023.

ANDERS, Niels. et al.; Impact of flight altitude and cover orientation on Digital Surface Model (DSM) accuracy for flood damage assessment in Murcia (Spain) using a fixed-wing UAV. **Earth Science Informatics**, v. 13, n. 2, p. 391-404, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12145-019-00427-7>. Acesso em: 27 nov. 2023.

BRASIL. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 22 de jun. 1984. Seção 1, p. 8884. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-89817-20-junho-1984-439814-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em: 08 jan. 2023.

BRASIL. Resolução AMN nº 123, de 1 de dezembro de 2022. **Diário Oficial da União**, Ministério de Minas e Energia/Agência Nacional de Mineração, Brasília, DF, 2 de dez. de 2022. Seção 1, p. 199. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-anm-n-123-de-1-de-dezembro-de-2022-447337784>. Acesso em: 08 jan. 2023.

BOLKAS, Dimitrios. Assessment of GCP number and separation distance for small UAS surveys with and without GNSS-PPK positioning. **Journal of Surveying Engineering**, v. 145, n. 3, p. 04019007, 2019. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000283](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000283). Acesso em: 27 nov. 2023.

CARRERA-HERNÁNDEZ, Jaime Jesús et al. A low-cost technique for development of ultra-high-resolution topography: application to a dry maar's bottom. **Revista mexicana de ciencias geológicas**, v. 33, n. 1, p. 122-133, 2016. Disponível em: <http://www.rmccg.unam.mx/index.php/rmccg/article/view/645>. Acesso em: 27 nov. 2023.

CARRICONDO, Patricio Martínez et al. Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, v. 72, p. 1-10, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.015>. Acesso em: 27 nov. 2023.

COOK, Kristen L. An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection. **Geomorphology**, v. 278, p. 195-208, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.009>. Acesso em: 27 nov. 2023.

ELTNER, Anette; SOFIA, Giulia. Structure from motion photogrammetric technique. **Developments in Earth surface processes**. Elsevier, v. 23, p. 1-24, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00001-1>. Acesso em: 27 nov. 2023.

GABRLIK, Petr et al. Calibration and accuracy assessment in a direct georeferencing system for UAS photogrammetry. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 15-16, p. 4931-4959, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1434331>. Acesso em: 27 nov. 2023.

GARRETT, Bradley; ANDERSON, Karen. Drone methodologies: Taking flight in human and physical geography. **Transactions of the Institute of British Geographers**, v. 43, n. 3, p. 341-359, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/tran.12232>. Acesso em: 27 nov. 2023.

GLENDELL, Miriam et al. Testing the utility of structure-from-motion photogrammetry reconstructions using small unmanned aerial vehicles and ground photography to estimate the extent of upland soil erosion. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 42, n. 12, p. 1860-1871, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/esp.4142>. Acesso em: 27 nov. 2023.

GONÇALVES, Gil et al. 3D reconstruction of coastal cliffs from fixed-wing and multi-rotor uas: Impact of

sfm-mvs processing parameters, image redundancy and acquisition geometry. **Remote Sensing**, v. 13, n. 6, p. 1222, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs13061222>. Acesso em: 27 nov. 2023.

GONCALVES, José A.; HENRIQUES, Renato. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. **ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 104, p. 101-111, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsiprs.2015.02.009>. Acesso em: 27 nov. 2023.

GONG, Chuangang et al. Analysis of the Development of an Erosion Gully in an Open-Pit Coal Mine Dump During a Winter Freeze-Thaw Cycle by Using Low-Cost UAVs. **Remote Sensing**, v. 11, n. 11, p. 1356, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs11111356>. Acesso em: 27 nov. 2023.

JAMES, Michael R. et al. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. **Geomorphology**, v. 280, p. 51–66, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.021>. Acesso em: 27 nov. 2023.

LIU, Kai et al. Detection of Catchment-Scale Gully-Affected Areas Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) on the Chinese Loess Plateau. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 5, n. 12, p. 238, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi5120238>. Acesso em: 27 nov. 2023.

MEINEN, Benjamin U.; ROBINSON, Derek T. Mapping erosion and deposition in an agricultural landscape: Optimization of UAV image acquisition schemes for SfM-MVS. **Remote Sensing of Environment**, v. 239, p. 111666, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111666>. Acesso em: 27 nov. 2023.

NOTA, Eise Wiebe et al. Improving UAV-SfM time-series accuracy by co-alignment and contributions of ground control or RTK positioning. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 109, p. 102772, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102772>. Acesso em: 27 nov. 2023.

RADEMANN, Lucas Krein et al. Caracterização e análise de erosão por voçorocamento no sul do Brasil com o auxílio de Veículo Aéreo Não Tripulado. **Mercator (Fortaleza)**, v. 21, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4215/rm2022.e21022>. Acesso em: 27 nov. 2023.

REN, He et al. An Improved Ground Control Point Configuration for Digital Surface Model Construction in a Coal Waste Dump Using an Unmanned Aerial Vehicle System. **Remote Sensing**, v. 12, n. 10, p. 1623, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12101623>. Acesso em: 27 nov. 2023.

SANTOS, Afonso de Paula dos et al. 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**, v. 22, n. 4, p. 630-650, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1982-21702016000400036>. Acesso em: 08 dez. 2023.

SANZ-ABLANEDO, Enoc et al. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. **Remote Sensing**, v. 10, n. 10, p. 1606, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs10101606>. Acesso em: 27 nov. 2023.

STÖCKER, Claudia; ELTNER, Anette; KARRASCH, Pierre. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close-range photogrammetry - A case study from Andalusia, Spain. **Catena**, v. 132, p. 1-11, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.04.004>. Acesso em: 27 nov. 2023.

TURNER, Darren et al. Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 5, p. 2738-2745, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2265295>. Acesso em: 27 nov. 2023.

TURNER, Darren et al. An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds. **Remote Sensing**, v. 4, n. 5, p. 1392-1410, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs4051392>. Acesso em: 27 nov. 2023.

UYSAL, Murat; et al. DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. **Measurement**, v. 73, p. 539-543, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.06.010>. Acesso em: 27 nov. 2023.

VERDONK, Stef. **Gully volume estimates using UAV Photometry**. Dissertação (Mestrado), University of Utrecht,

Utrecht, Países Baixos, p. 80, 2015. Disponível em: <https://studenttheses.uu.nl/handle/20.500.12932/34266>. Acesso em: 27 nov. 2023.

WESTOBY, Matthew J. et al. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300–314, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>. Acesso em: 27 nov. 2023.

WILDNER, Wilson et al. **Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Sul**: escala 1:750.000. Porto Alegre: CPRM, 2008.