Avaliação da precisão da técnica Structure from Motion aplicada ao Mapeamento Fotogramétrico de Corredores

https://doi.org/10.56238/levv15n39-036

Natalia Carvalho de Amorim
Mestre em Ciências Geodésicas
Universidade Federal do Paraná

Edson Aparecido Mitishita
Doutor em Ciências Geodésicas
Universidade Federal do Paraná

RESUMO

As vantagens oferecidas pela utilização da tecnologia RPA aliadas aos algoritmos implementados pela técnica SfM e suas variantes fizeram da Fotogrametria apoiada por RPA e SfM uma solução econômica, rápida e amplamente utilizada em diversos ramos da Engenharia. Apesar de muitos estudos sobre a precisão alcançada em produtos cartográficos digitais gerados através destas tecnologias, pouco se discute sobre o caso dos corredores. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é investigar a precisão posicional alcançada no mapeamento de um corredor de 1,3 km de extensão através da adoção de diferentes quantidades de pontos de controle e diferentes quantidades de faixas. A avaliação da precisão foi realizada com base nos valores de Erro Quadrático Médio (EQM) dos pontos de verificação e análise de tendência. Os experimentos mostraram que a adoção de pontos de controle posicionados a cada cinco e dez bases fotogramétricas pode atingir precisão entre 2-2,6 GSD e eliminar tendências estatísticas planimétricas e altimétricas nos valores de RMSE dos pontos de verificação que adotam duas ou três faixas. Além disso, os experimentos realizados mostraram que o aumento do número de faixas não implica necessariamente uma diminuição nos valores de EQM das discrepâncias dos pontos de verificação.

Palavras-chave: Fotogrametria, Corredor, Ajustamento, SfM.

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico experimentado nos últimos anos trouxe novas abordagens e mudanças de paradigma às Ciências Geodésicas. Tecnologias como os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) e os algoritmos de detecção e descrição de pontos notáveis em imagens digitais têm demonstrado alto impacto no contexto da análise e extração de informações geoespaciais através de métodos autônomos.

Os modelos de VANT encontrados no mercado são os mais diversos, e projetados para atender às diferentes demandas existentes, e, por esse motivo, é difícil atribuir um conceito único a este equipamento (Hardin, Jensen, 2011). No Brasil, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), que regulamenta o uso de VANTs por civis, estabeleceu duas classes para conceituar esses equipamentos: O modelo Aero, que são todos os tipos de VANTs utilizados para fins recreativos; e as Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs), que compreendem os VANTs pilotados por meio de uma estação de controle remoto e utilizados para atividades não recreativas. Neste trabalho, utiliza-se o termo RPA para referir-se a estes equipamentos, popularmente conhecidos como drones.

Os modelos RPA comumente utilizados para aplicações fotogramétricas são: RPA-SPS (Standard Positioning Service), que fornece a solução de posicionamento baseada nos sinais abertos do Sistema GNSS; RPA-RTK (Real-Time Kinematic), que são modelos que possuem Sistema RTK e permitem a correção de erros sistemáticos de posicionamento em tempo real (Sopchaki et al, 2018) e RPA-PPK (Post-Processing Kinematic), modelos que contam com um sistema que permite o pós-processamento das posições RPA no momento da obtenção das imagens. Este equipamento rapidamente se popularizou no meio profissional e científico por oferecer vantagens como o baixo investimento necessário para sua aquisição e operação, principalmente no caso dos modelos SPS, a agilidade na aquisição de imagens aéreas digitais e a alta precisão e exatidão alcançadas com a utilização de sistemas RTK e PPK.

Por outro lado, o crescente avanço alcançado nas áreas da Visão Computacional, Processamento Digital de Imagens e Hardware contribuiu fortemente para a adoção de novas abordagens pela Fotogrametria convencional, sendo a principal delas a técnica Structure from Motion, atualmente disponível em diversos softwares especializados (Javernick , Brasington e Caruso, 2014).

Structure from Motion (SfM) refere-se ao problema da determinação da posição tridimensional de um conjunto de pontos observados em um conjunto de imagens quando existe apenas um esparso conjunto de correspondências entre esses pontos nas imagens obtidas por um sensor em movimento (Szeliski , 2010, pág. 345). Pode-se estabelecer um paralelo entre Visão Computacional e Fotogrametria uma vez que estas ciências têm um mesmo objetivo em comum: Recuperar a geometria tridimensional de uma superfície através de um conjunto de imagens obtidas de diferentes pontos de vista (sensor em movimento). Assim, pode-se dizer que a técnica SfM funciona baseada nos princípios da estereoscopia fotogramétrica (Westoby et al, 2012).

A crescente demanda por automação de processos fez com que a Fotogrametria apoiada por RPA e SfM fosse rapidamente adotada pelas comunidades profissionais e científicas, utilizando essas tecnologias para a geração de produtos cartográficos digitais de forma automatizada, tornando o processo de planejamento e tomada de decisão menos custoso e mais ágil.

Desta forma, diversos estudos sobre a qualidade posicional alcançada pelo uso da Fotogrametria apoiada por RPA e SfM foram realizados nos últimos cinco anos: Rehak e Skaloud (2015) apresentaram um estudo que verificou a qualidade posicional alcançada no mapeamento de um corredor e um bloco de imagens e concluiu que para atingir uma precisão entre 3 cm e 5 cm, a posição e a atitude da câmera no momento da tomada devem ser conhecidas com alta precisão; James et al (2017) realizaram um estudo sobre a precisão alcançada na geração de modelos digitais de elevação, testando diferentes configurações de pontos de controle no solo e a utilização de diferentes parâmetros disponíveis no software especializado utilizado no estudo; Meinen e Robinson (2020) apresentam um estudo comparativo entre a Fotogrametria Digital apoiada em VANT e a Fotogrametria Tradicional na aplicação de mapeamento de encostas de rios. O estudo revelou que, no cenário analisado, a Fotogrametria apoiada em RPA e SfM apresentou menores valores de erro quadrático médio nos pontos de verificação; Elkhrachy (2021) experimentou quatro distribuições diferentes de pontos de controle terrestre e dois softwares fotogramétricos diferentes com o objetivo de produzir informações geoespaciais 3D precisas. O modelo obtido no estudo apresentado por Elkhrachy alcançou valores de RMSE na faixa de 4-6 cm e 5-6 cm, para coordenadas horizontais e verticais dos pontos de verificação, respectivamente.

Apesar da diversidade de estudos realizados para verificar a precisão alcançada em levantamentos fotogramétricos utilizando RPA e SfM, poucos estudos analisaram o caso específico do mapeamento de corredores. Casos como mapeamento de linhas de transmissão, ferrovias e rios são alguns exemplos de aplicações fotogramétricas que configuram a geometria de um corredor. Vale ressaltar que, devido à sua configuração geométrica, os corredores tendem a apresentar deficiências analíticas que podem ocasionar uma diminuição na precisão alcançada neste tipo de mapeamento.

Neste contexto, este estudo tem como objetivo investigar a precisão alcançada no mapeamento de um corredor utilizando um RPA para aquisição de imagens e o software Metashape, que implementa uma variante da técnica Structure from Motion. A avaliação é realizada através da utilzação de pontos de verificação posicionados ao longo do bloco fotogramétrico, desta forma, este trabalho avalia a qualidade do ajustamento dos parâmetros através da raiz do erro quadrático médio estimado para as coordenadas dos pontos de verificação e como a disposição destes pontos influência nesta qualidade.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO E LEVANTAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO

A área de estudo está localizada dentro do Campus Politécnico da Universidade Federal do Paraná, no Estado do Paraná, Brasil. A Figura 1 mostra o corredor que se estende por aproximadamente 1,3 km dentro da área do campus.

O processo de aquisição de imagens foi realizado utilizando o RPA Phantom 4 Pro, equipamento que possui câmera com sensor CMOS de 1 polegada, gerando imagens de 4864 x 3648 pixels, o que resulta em uma resolução geométrica de pixels de aproximadamente 2,61 micrometros. O equipamento conta ainda com sensor GNSS que registra observações da posição do centro de perspectiva com precisão planimétrica de 1,5 m e precisão altimétrica de 0,5 m, conforme especificações técnicas fornecidas pelo fabricante. O voo foi realizado a uma altura de aproximadamente 100 m e as taxas de sobreposição lateral e longitudinal foram de 60% e 80%, respectivamente. Valores elevados de sobreposição entre faixas foram adotados para aumentar a redundância de observações de pontos de ligação entre imagens e entre faixas.

Figura 1 – Plano de Voo

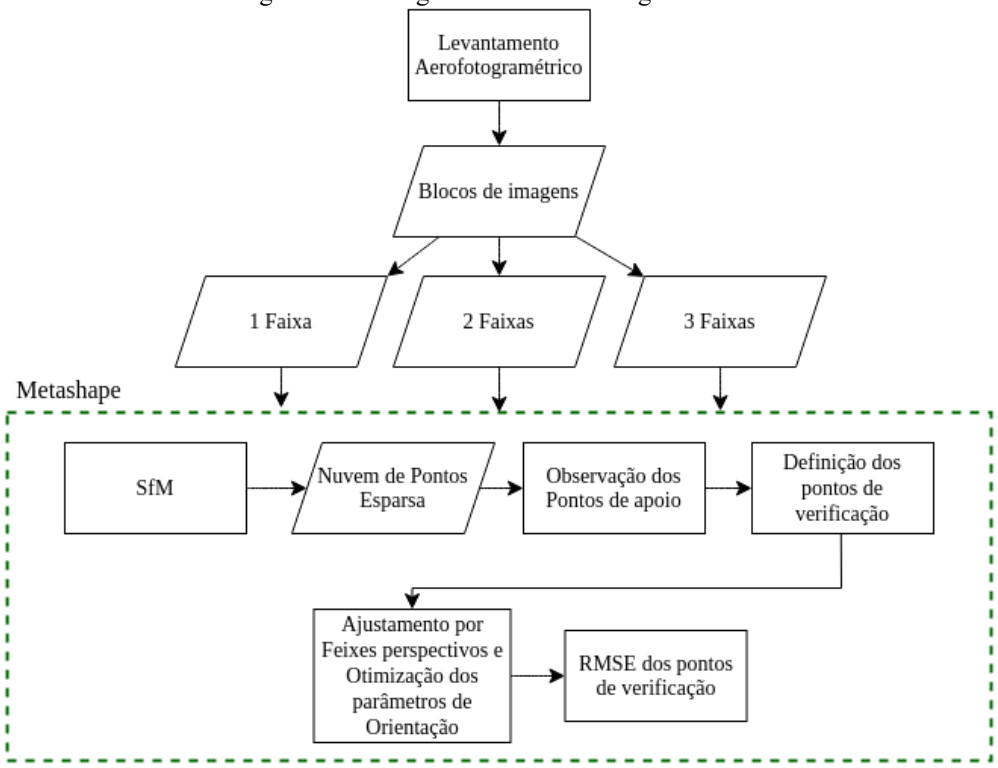


Através da configuração de voo adotada, foi obtido um GSD de aproximadamente 3,0 cm, que permite a observação de feições fotoidentificáveis, como quinas de faixa de pedestres, faixas de sinalização de trânsito, tampas de bueiros, entre outros.

2.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS

O processamento dos dados foi realizado testando diferentes distribuições espaciais de pontos de controle e diferentes recobrimentos aerofotogramétricos. Os experimentos foram realizados utilizando uma, duas e três faixas. Para cada número de faixas, foram testadas as configurações de pontos de controle de quinze, dez e cinco bases fotogramétricas. Para todos os testes, os parâmetros de orientação interior da câmera foram estimados através de autocalibração durante o ajustamento do corredor fotogramétrico, adotando o modelo Conrady-Brown, portanto, nestes experimentos, distância focal (f), coordenadas do ponto principal (cx, cy), os coeficientes de distorção radial simétrica (K1, K2, K3) e os coeficientes de distorção descentrada (P1, P2, P3) são considerados para ajuste do corredor. As imagens foram processadas utilizando o software Metashape. A Figura 2 apresenta esquematicamente a metodologia empregada para o processamento das imagens. Cada etapa será descrita em detalhes nas subseções seguintes.

Figura 2 – Fluxograma da Meotodologia adotada



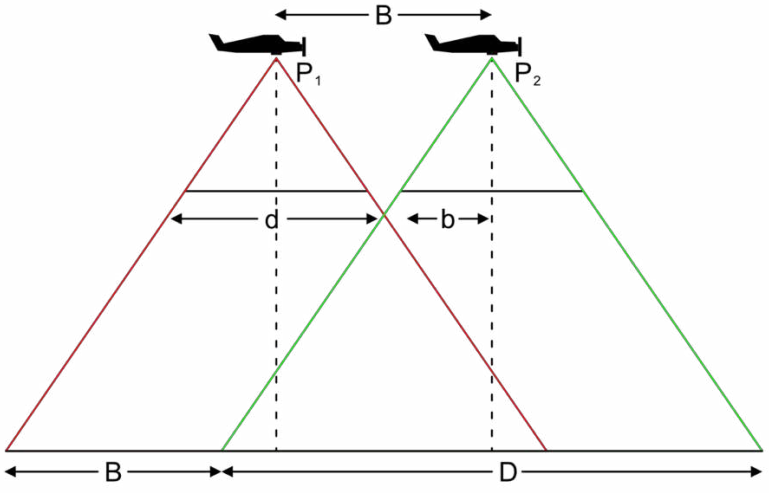
2.3 DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROL

Para melhorar a exatidão alcançada no ajustamento do bloco fotogramétrico, emprega-se o uso de pontos de controle. As coordenadas planialtimétricas dos pontos de controle e verificação foram extraídas do ortomosaico disponibilizado na base de dados cartográficos mantida pelo projeto UFPR Campus Map. O ortomosaico possui resolução espacial de 5 cm, apresentando valores de erro planimétrico total de 6 cm e o MDE apresentando erro altimétrico total de 4 cm \cite{delazari2019ufpr}. Desta forma, para cada número de faixas, foram testadas três configurações de pontos de controle:

- Um par de pontos de controle é inserido a cada quinze bases aerofotogramétricas;
- Um par de pontos de controle é inserido a cada dez bases aerofotogramétricas;
- Um par de pontos de controle é inserido a cada cinco bases aerofotogramétricas.

Para maior esclarecimento sobre a distribuição de pontos de controle utilizada, apresentam-se na Figura 3 a definição geométrica de base aerofotogramétrica, representada pela letra B, a fotobase (b), a largura da fotografia no espaço objeto (D), bem como a largura da fotografia no espaço imagem (d). A Base Aerofotogramétrica, também conhecida como Base Aérea, é a distância entre duas posições do centro perspectivo da câmera no momento da tomada da fotografia e desempenha um importante papel no mapeamento fotogramétrico. Por este motivo, adota-se o número de bases aerofotogramétricas como padrão para descrever a distrbuição dos pontos de controle.

Figura 3 – Base Aerofotogramétrica



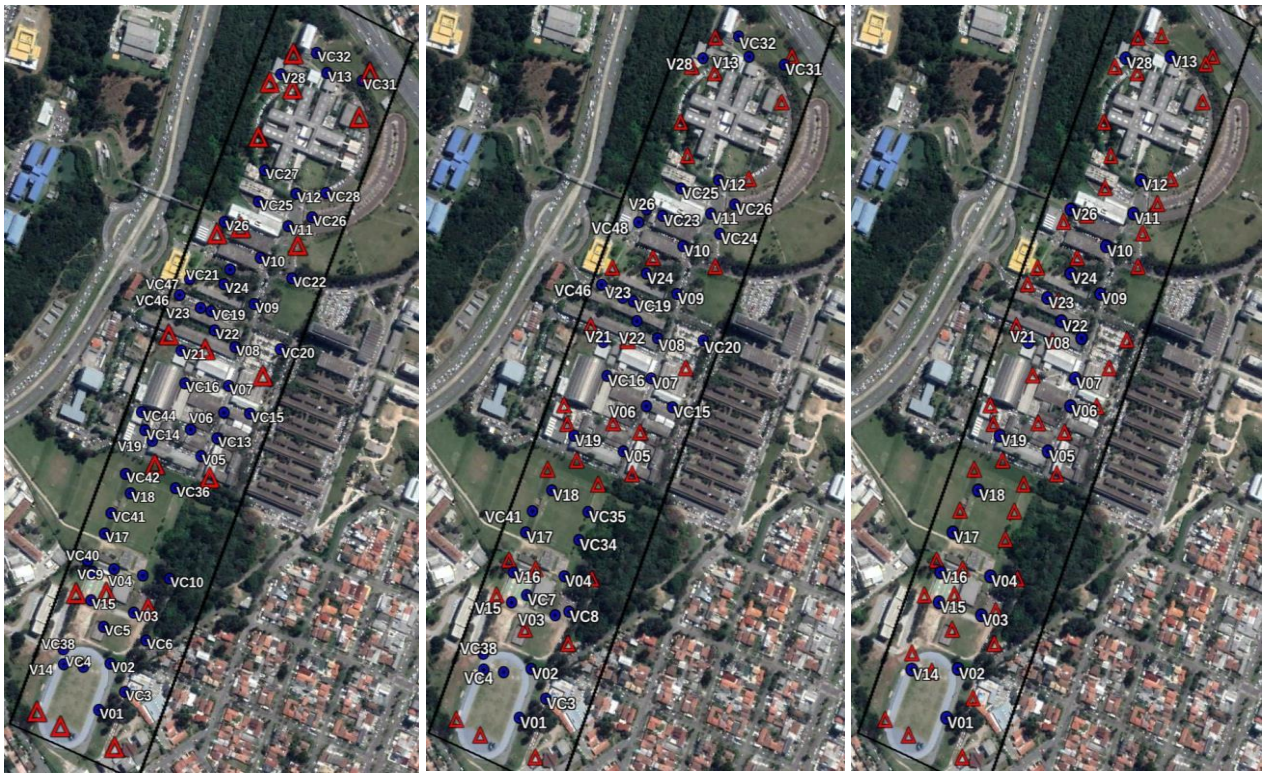
As Figuras 4 e 5 mostram a distribuição dos pontos de controle e de verificação adotados em cada um dos experimentos realizados. Os pontos de controle e verificação são apresentados nas cores vermelha e azul, respectivamente.

Figura 4 – Distribuição dos Pontos de Controle e Verificação para experimentos de uma faixa



A Figura 4 mostra a distribuição espacial dos pontos de controle e verificação empregados na realização dos experimentos utilizando uma única faixa fotogramétrica. Na Figura 3 (a) os pontos de controle são colocados a cada quinze bases fotogramétricas, resultando na utilização de quinze pontos de controle; Posteriormente, os pontos de controle são colocados a cada dez bases fotogramétricas, conforme mostrado na Figura 3 (b), resultando na utilização de vinte e um pontos de controle e, por fim, a quantidade de pontos de controle é novamente incrementada, e os pontos de controle são colocados a cada cinco bases fotogramétricas, resultando no número máximo de pontos de controle utilizados neste conjunto de experimentos, isto é, trinta e quatro pontos de controle.

Figura 5 – Distribuição dos Pontos de Controle e Verificação para experimentos de duas faixas



A Figura 5 mostra a distribuição espacial dos pontos de controle e verificação utilizados para realização dos experimentos utilizando blocos de imagens com duas e três faixas. Na Figura 4 (a), 4(b) e 4(c), os pontos de controle são colocados a cada quinze, dez e cinco bases fotogramétricas, respectivamente. A mesma distribuição de pontos de controle é utilizada nos casos de duas e três faixas devido ao caráter restritivo da área de estudo que impossibilitou a observação de novos pontos de controle devido a obstruções.

Os três diferentes recobrimentos de imagens foram experimentados para verificar se a adição de faixas pode flexibilizar o número de pontos de controle utilizados, mantendo a mesma precisão alcançada no experimento utilizando cinco bases fotogramétricas.

2.4 ANÁLISE DA ACURÁCIA POSICIONAL

A avaliação da acurácia foi realizada adotando-se os valores de Erro Quadrático Médio (EQM) das discrepâncias dos pontos de verificação como métrica. As precisões esperadas foram definidas conforme estabelecido por Kraus (2011), no Caso Normal da Fotogrametria. Para esta condição, as precisões (planimétricas e altimétricas) do ajustamento do bloco fotogramétrico podem ser estimadas em função da escala das fotografias e da proporção entre a base aérea e a altura de voo. Assim, espera-se que o EQM das discrepâncias planimétricas dos pontos de controle apresente um valor máximo de 8,6 cm e 15 cm para o EQM das discrepâncias altimétricas dos pontos de controle.

Adicionalmente, foi realizada uma análise de tendência para verificar a presença de erros sistemáticos nas coordenadas planialtimétricas dos pontos de verificação. Esta análise foi feita através do teste de hipótese estatística onde as hipóteses testadas foram:

$$H_0: \mu = 0$$
$$H_1: \mu \neq 0$$

O teste de hipótese foi conduzido conforme sugerido por Galo e Camargo (1994), onde M é a média populacional, H_0 e H_1 são as hipóteses nula e alternativa, respectivamente. Para validar uma das hipóteses, o teste t de Student foi realizado.

Se a média das discrepâncias dos pontos de verificação for estatisticamente igual a zero, não há tendência nestas discrepâncias. Através de uma comparação entre um valor calculado de t e seu valor tabelado, a hipótese nula pode ou não ser descartada. Assim, o valor calculado é obtido a partir da Equação 2.

$$t_{calc} = \frac{\Delta}{S^2}\sqrt{n}$$

Onde:

- Δ é o valor médio amostral das discrepâncias de uma coordenada dos pontos de verificação;
- S^2 é a variância amostral das discrepâncias de uma coordenada dos pontos de verificação;
- *n é o tamanho da amostra.*

O valor calculado de t é comparado ao valor tabelado com nível de significância de 90% e a hipótese alternativa é descartada caso a condição demonstrada na Equação 4 seja verdadeira.

$$|t_{calc}| < t_{n-1,\alpha/2}$$

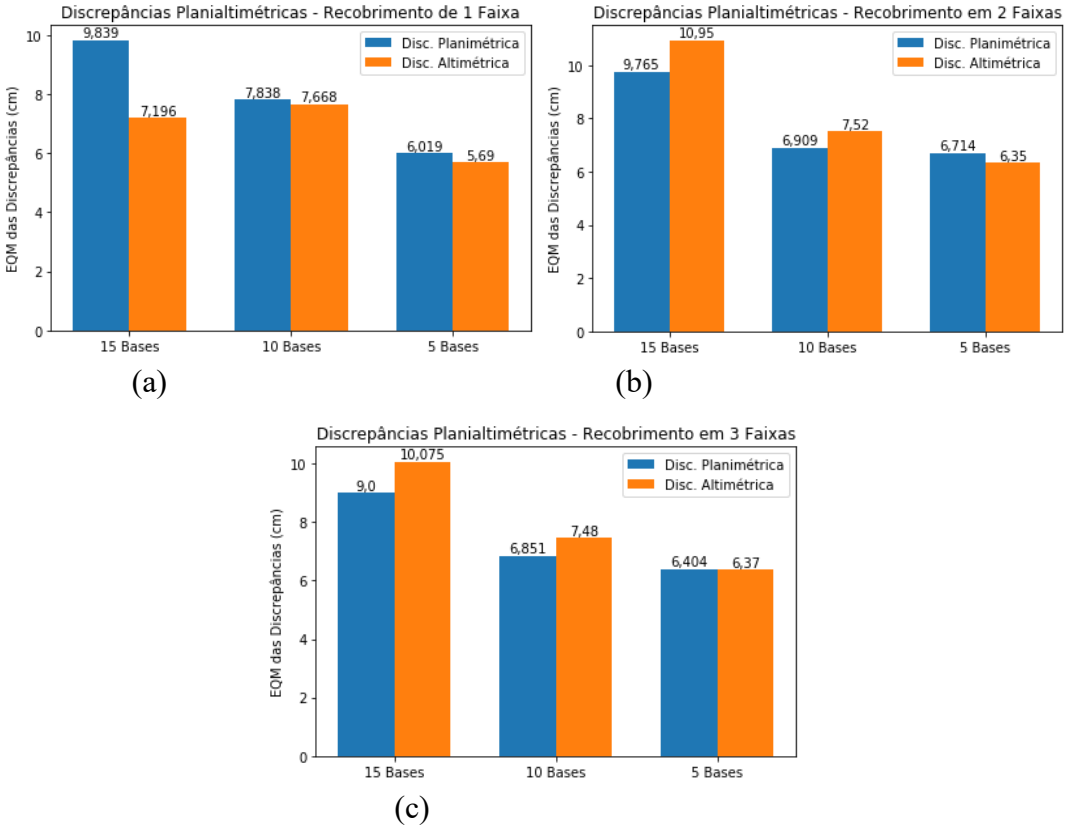
Caso a condição da Equação 3 não seja satisfeita, a hipótese nula é descartada, podendo-se assumir existência de tendência nas discrepâncias dos pontos de verificação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6 apresenta os valores de erro quadrático médio (EQM) calculados para as discrepâncias planimétricas e altimétricas dos pontos de verificação nos experimentos de recobrimento fotogramétrico com uma (Fig. 5 a), duas (Fig. 5 b) e três faixas (Fig. 5 c). Cada figura mostra o erro médio quadrático planimétrico e altimétrico para as três diferentes distribuições de pontos de controle (quinze, dez e cinco bases fotogramétricas).

Observa-se na Figura 6 (a) que, quando incrementa-se o número de pontos de controle, os valores de EQM sofrem decremento. Os menores valores de EQM são observados no caso de pontos de controle colocados a cada cinco bases fotogramétricas, que apresentaram valores de 6,019 cm para discrepâncias planimétricas e 5,69 cm para discrepâncias altimétricas, esses valores satisfazem a tolerância estabelecida para este experimento. A precisão altimétrica esperada (15 cm) foi alcançada em todas as três distribuições experimentadas no caso do mapeamento do corredor com uma única faixa, mas os menores valores de EQM foram alcançados no caso de pontos de controle inseridos a cada cinco bases aéreas.

Figura 6 – EQM das discrepâncias dos pontos de verificação



Observando agora a Figura 6 b, nota-se que o erro quadrático médio planimétrico obtido no experimento utilizando pontos de controle a cada quinze bases não satisfaz a precisão esperada estabelecida neste trabalho (8,6 cm), sendo 3,754 cm maior do que o EQM apresentado na Figura 6 a

(15 bases). Este incremento acontece porque o aumento do número de fotografias quando há uma distribuição deficitária de pontos de controle cria áreas fragilizadas e erros sistemáticos são propagados para as coordenadas dos pontos de controle localizados nessas regiões. Desta forma, tem-se uma evidência de que a adição de faixas não necessariamente permite a flexibilização da quantidade de pontos de controle adotados, mas requer um replanejamento destes. Quando o número de pontos de controle utilizados aumenta, isto é, adotando a distribuição de dez e cinco bases, pode-se observar que o EQM as discrepâncias planimétricas e altimétricas têm seus valores reduzidos.

Ainda observando os valores de EQM apresentados na Figura 5 b e comparando-os com os valores apresentados na Fig. 6 a, percebe-se que a adição da segunda faixa não causou redução significativa nos valores de EQM planimétrico e altimétrico no caso de pontos de controle distribuídos em cada cinco bases aéreas (menos de 1 cm), contudo pode-se observar uma redução significativa do EQM das discrepâncias planimétricas no caso dos experimentos com pontos de controle posicionados a cada dez bases, que no caso do recobrimento com uma faixa apresentam valores de 7,838 cm (Fig. 5 a) e 6,909 cm (Fig 5b), representando quase 1 cm de decremento com a adição da segunda faixa e uma distribuição de pontos de controle intensificada.

Os valores de EQM das discrepâncias dos pontos de verificação apresentados na Figura 5c, obtidos no experimento de recobrimento com três faixas, são semelhantes aos apresentados no caso de duas faixas (Fig. 5b). Para todas as distribuições de pontos de controle testadas com duas e três faixas, a diferença entre os valores planimétricos e altimétricos de EQM é menor que 0,5 cm. Assim, podemos concluir que a adição da terceira faixa não causou redução significativa do erro médio quadrático planimétrico ou altimétrico. Nas diferentes distribuições de pontos de controle e quantidades de faixas testadas, apenas a distribuição das quinze bases fotogramétricas não satisfez a tolerância estabelecida neste trabalho.

Para maior esclarecimento dos valores apresentados na Figura 5, realizou-se também uma análise de tendências estatísticas nos experimentos realizados. A Tabela 1 sumariza esta análise categorizando os resultados em quatro tipos distintos: 1) Não Tendencioso significa que os três componentes de coordenadas (X, Y e Z) estão livres de tendência; 2) Tendência Planimétrica significa que pelo menos uma ou ambas as coordenadas planimétricas (X, Y) são tendenciosas e 3) Tendência Altimétrica significa que apenas a coordenada Z é tendenciosa, e 4) Tendência significa que todos os componentes das coordenadas (X, Y, e Z) são tendenciosos.

Tabela 1 - Análise de Tendências

	5 Bases	10 Bases	15 Bases
Uma faixa	Não tendencioso	Tendencia Planimétrica	Tendencia Altimétrica
Duas Faixas	Tendência Planimétrica	Não Tendencioso	Tendencioso
Três Faixas	Tendência Planimétrica	Não tendencioso	Tendencioso

Nas Tabelas 2 a 4 são apresentadas as métricas estatísticas obtidas na análise de tendências, bem como a classificação detalhada para cada eixo.

Tabela 2 - Tendências das discrepâncias dos pontos de verificação - Recobrimento fotogramétrico com uma faixa

Quinze Bases			
	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
Média	0,209	2,03	3,868
t calc.	0,1969	1,5643	3,6628
$t_{(33,\ 10/2)}$	1,6924		
Tendencioso	Não	Não	Sim
Dez Bases			
	X	Y	Z
Média	2,099	1,672	1,572
t calc.	1,9508	1,7377	1,0681
$t_{(26,\ 10/2)}$	1,7056		
Tendencioso	Sim	Sim	Não
Cinco Bases			
	X	Y	Z
Média	-0,483	0,035	2,428
t calc.	-0,5817	0,0234	1,6361
$t_{(12,\ 10/2)}$	1,7823		
Tendencioso	Não	Não	Não

Tabela 3 - Tendências das discrepâncias dos pontos de verificação - Recobrimento fotogramétrico com duas faixas

Quinze Bases			
	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
Média	1,647	1,716	4,022
t calc.	1,7515	1,9883	2,9283
$t_{(55,\ 10/2)}$	1,637		
Tendencioso	Sim	Sim	Sim
Dez Bases			
	X	Y	Z
Média	-0,898	0,5727	-0,463
t calc.	-1,25	0,77	-0,4095
$t_{(44,\ 10/2)}$	1,6794		
Tendencioso	Não	Não	Não
Cinco Bases			
	X	Y	Z
Média	1,7654	0,4168	-0,7061
t calc	1,8826	0,4492	-0,5481
$t_{(24,\ 10/2)}$	1,7109		
Tendencioso	Sim	Não	Não

Observando a Tabela 2 percebe-se que, quando o recobrimento aéreo de uma única faixa é adotado, apenas a distribuição de pontos de controle a cada cinco bases é suficiente para eliminar completamente as tendências nas discrepâncias dos pontos de verificação. Nota-se também que quando se adota a distribuição de dez bases, tendências planimétricas surgem nas discrepâncias dos pontos de verificação. Isto pode ocorrer devido a dificuldade de quebrar as correlações existentes entre os parâmetros envolvidos no ajustamento do corredor fotogramétrico utilizando apenas uma faixa.

Na Tabela 3 observa-se os resultados da análise estatística de tendências para os experimentos de recobrimento fotogramétrico do corredor com duas faixas. Neste caso, a distribuição de pontos de apoio inseridos a cada dez bases foi suficiente para eliminar as tendências planimétricas e altimétricas, enquanto no caso de quinze bases, todas as componentes se mostraram tendenciosas. O experimento de inserção de pontos de controle a cada cinco bases mostrou tendência planimétrica na componente X, indicando que a diminuição dos graus de liberdade, causada pela adoção de muitos pontos de controle, não foi a melhor alternativa para a redução de erros sistemáticos presentes no ajustamento.

A Tabela 4 apresenta as métricas estatísticas para análise de tendências referente aos experimentos de recobrimento fotogramétrico do corredor com três faixas. Observa-se um comportamento similar ao experimento anterior (Tabela 3) quando se comparam os experimentos de pontos de controle inseridos a cada dez e cinco bases, uma vez que a média das discrepâncias dos pontos de verificação apresenta diferença milimétrica entre estes dois casos. Esta análise mostra que a adição de uma faixa, sem que haja modificalção da distribuição de pontos de controle, não implica em eliminação de tendências planialtimétricas, sendo a distribuição de pontos de controle adotada mais crítica para a distribuição dos erros sistemáticos envolvidos.

Tabela 4 - Tendências das discrepâncias dos pontos de verificação - Recobrimento fotogramétrico com três faixas

Quinze Bases			
	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
Média	1,314	1,727	4,015
t calc.	1,5403	2,1252	3,2231
$t_{(55,\ 10/2)}$	1,673		
Tendencioso	Não	Sim	Sim
Dez Bases			
	X	Y	Z
Média	-0,866	0,593	-0,373
t calc.	-1,1974	0,8152	-0,3326
$t_{(44,\ 10/2)}$	1,6794		
Tendencioso	Não	Não	Não
Cinco Bases			
	X	Y	Z
Média	1,665	0,052	-0,771

t calc.	1,9174	0,5775	0,598
$t_{(24,\ 10/2)}$	1,7109		
Tendencioso	Sim	Não	Não

Os resultados obtidos nos experimentos realizados, em termos de EQM planimétrico e altimétrico, estão de acordo com os apresentados por Ferrer-González et al (2020), que mostraram em seu trabalho que aumentar o número de pontos de controle melhora a precisão alcançada no ajustamento do corredor fotogramétrico. Os autores também mostraram que os valores de EQM vertical são superiores aos valores de EQM planimétrico, porém, esta pesquisa também realizou uma análise da influência do número de faixas no mapeamento do corredor, observando que o número de pontos de controle empregados no ajuste é mais crítico para reduzir os valores EQM verticais e horizontais do que a adição de faixas.

Em termos de GSD, este trabalho alcançou precisões planimétricas e altimétricas entre 2 GSD e 2,6 GSD através da distribuição de pontos de controle de cinco e dez bases fotogramétricas. Comparando a precisão alcançada neste estudo com a precisão alcançada no trabalho apresentado por Skarlatos et al (2013), pode-se notar que os experimentos aqui apresentados alcançaram uma melhor precisão, uma vez que as precisões verticais e horizontais apresentadas em seu estudo foram mais de três vezes o valor do GSD. Comparando a precisão alcançada, ainda em termos de GSD, com a precisão alcançada apresentada por Elkhrachy (2021), duas e três vezes GSD para precisão horizontal e vertical, respectivamente, podemos observar que a estudo apresentado alcançou precisão semelhante uma vez que apresentou RMSE de 2-2,6 vezes GSD usando distribuição de pontos de controle de cinco e dez bases fotogramétricas.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo avaliar a precisão alcançada pelo ajustamento realizado através Técnica Structure from Motion aplicada à geometria de um corredor, analisando como o número de pontos de controle e o número de faixas fotogramétricas influenciam os valores de EQM dos pontos de verificação. Foi realizada também uma análise de tendência das discrepâncias dos pontos de verificação.

Os experimentos realizados mostraram que o número e distribuição dos pontos de controle adotados exercem maior influência nos valores de EQM, enquanto o número de faixas pode contribuir na eliminação de tendências nas discrepâncias planimétricas e altimétricas. Assim, ao trabalhar com levantamento de corredores através do SfM BBA, recomenda-se adotar pelo menos duas faixas, colocando um conjunto de pontos de controle no máximo a cada dez bases terrestres para diminuir o valor do EQM dos pontos de verificação, bem como evitar tendências planimétricas e altimétricas.

Neste estudo, os valores esperados para EQM dos pontos de verificação foram de 8,6 cm e 15 cm para componentes planimétricos e altimétricos, respectivamente e vale ressaltar que os valores altimétricos de EQM observados em todos os experimentos concordaram com os valores esperados definidos neste trabalho. Como é uma tarefa difícil obter valores altimétricos de EQM inferiores aos planimétricos, podemos novamente atestar a vantagem da utilização da distribuição de pontos de controle a cada dez bases terrestres, uma vez que os valores de EQM planimétrico e altimétrico foram semelhantes, livres de tendências e alcançaram precisão de 2 a 2,6 GSD.

Em relação ao número de faixas utilizadas nos experimentos, não foi observada diferença significativa entre os valores de EQM considerando as mesmas distribuições de pontos de controle e variando o número de faixas utilizadas no mapeamento do corredor. Assim, pode-se concluir que a distribuição de pontos de controle adotada é mais crucial do que o número de faixas para reduzir os valores de EQM dos pontos de verificação, porém, o uso de mais faixas pode eliminar completamente as tendências nas discrepâncias dos pontos de verificação.

Através dos experimentos realizados e dos resultados apresentados, podemos perceber as vantagens da utilização de técnicas de UAV e Fotogrametria Digital como Bundle Block Adjustment apoiada pela técnica SfM. Além de proporcionar redução de custos e tempo no levantamento fotogramétrico, essas abordagens modernas permitem atingir valores de alta precisão dependendo das especificações e estratégias do projeto.

Sugere-se para trabalhos futuros a realização de experimentos aplicando SfM BBA em corredores, estudando a influência da adição de fotografias oblíquas, a influência da pré-calibração e a precisão alcançada através da técnica de Orientação com Sensor Integrado (Integrated Sensor Orientation).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo, e à Universidade Federal do Paraná (UFPR) por fornecer a infraestrutura necessária à condução da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANAC, 2017. REGULAMENTO BRASILEIRO DA AVIAÇÃO CIVIL ESPECIAL. Url: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94/@@display-file/arquivo_norma/RBACE94EMD00.pdf

Ferrer-González, E., Aguera-Vega, F., Carvajal-Ramirez, F. and Martínez-Carricondo, P. (2020) UAV Photogrammetry Accuracy Assessment for Corridor Mapping Based on the Number and Distribution of Ground Control Points. Remote Sensing, v. 12, n. 15, p. 2447. Available at: https://www.mdpi.com/2072-4292/12/15/2447.

Elkhrachy, I. (2021) Accuracy assessment of low-cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry. Alexandria Engineering Journal, *60*(6), pp.5579-5590.
Galo, M., Camargo, P. de O. (1994) Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. p. 41-8.

Hardin, P. J. and Jensen, R. R. (2011) Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: Challenges and opportunities. GIScience & Remote Sensing, Taylor & Francis, v. 48, n. 1, p. 99–111.

Kraus, K. (2011) Photogrammetry: Geometry from images and laser scans (2nd ed.). Berlin, Germany: de Gruyter.

JAMES, M. R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns S. and Niethammer, U. (2017) Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. Geomorphology, Elsevier, v. 280, p. 51–66.

Javernick, L., Brasington, J. and Caruso, B. (2014) Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. Geomorphology, Elsevier, v. 213, p. 166–182.

Meinen, B. U. and Robinson, D. T. (2020) Streambank topography: an accuracy assessment of UAV-based and traditional 3D reconstructions. International Journal of Remote Sensing, v. 41, n. 1, p. 1-18.

Rehak, M. and Skaloud, J. (2015) FIXED-WING MICRO AERIAL VEHICLE FOR ACCURATE CORRIDOR MAPPING. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, v. 2.

Sopchaki, C. H., da Paz, O. L. de S., Graça, N. L. S. de S. and Sampaio, T. V. M. (2018) Verificação Da Qualidade De Ortomosaicos Produzidos a partir de Imagens Obtidas com Aeronave Remotamente Pilotada sem o uso de Pontos de Apoio. Raega-O Espaço Geográfico em Análise, v. 43, p. 200–214.

Delazari, L. S., Filho, L. E. and Skroch A. L. S. D. (2019) UFPR CampusMap: a laboratory for a Smart City developments. AbICA, v. 1, p. 57.
Szeliski, R. (2010) Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer Science & Business Media.

WESTOBY, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J. and Reynolds, J. M. (2012) 'Structure-from-Motion'photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology, Elsevier, v. 179, p. 300–314.