



# Caminhamento Fotogramétrico com Arranjo Triangular de Câmeras em Trajetórias Reta e Curva

Photogrametric Bridging using a Triangular Camera Arrangement in Straight and Curved Trajectories

*Tobias Rehder da Cunha Patuci*<sup>1</sup>

*Victor Blasechi*<sup>2</sup>

*Maurício Correia Lemes Neto*<sup>3</sup>

*Francisco Assis da Silva*<sup>4</sup>

*João Fernando Custódio da Silva*<sup>5</sup>

Recebido em janeiro de 2018.  
Aprovado em setembro de 2018.

## RESUMO

Um sistema de mapeamento móvel (SMM) permite obter informações geográficas das vias e de seu entorno, a partir de um conjunto de sensores instalados sobre uma plataforma. Estes sensores têm função de imageamento e orientação. O processo de fototriangulação é utilizado para a determinação das coordenadas de pontos no espaço objeto e para a orientação do SMM. No mapeamento móvel terrestre, o caminhamento fotogramétrico (CF) é um modo de levantamento que utiliza múltiplas imagens para determinar as suas orientações e coordenadas tridimensionais de pontos do terreno. No CF, um mesmo ponto pode ser observado por um par ou trio de imagens, ou por quantas forem possíveis. A introdução de uma terceira câmara que não forme uma geometria colinear (sobre o plano epipolar) permite uma melhoria na qualidade da determinação da rede fotogramétrica, formada pelos pontos do espaço objeto e as estações de exposição. O principal objetivo deste trabalho é mostrar a análise da terceira câmara para a fototriangulação e integração das imagens com dados do sensor de posicionamento em um sistema de baixo custo. Para a realização do levantamento, o sistema foi calibrado no campo de calibração da FCT/Unesp. O trajeto percorrido foi no entorno de uma quadra urbana, de modo a percorrer trechos retos e curvos. Como

---

<sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), Universidade Estadual Paulista (Unesp), Brasil. E-mail: tobiasrehder@gmail.com

<sup>2</sup>Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), Universidade Estadual Paulista (Unesp), Brasil. E-mail: v.blasechi@gmail.com

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil. E-mail: macolene@gmail.com

<sup>4</sup>Faculdade de Informática de Presidente Prudente (FIPP), Universidade do Oeste Paulista (Unoeste), Brasil. E-mail: chico@unoeste.br

<sup>5</sup>Departamento de Cartografia, Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), Universidade Estadual Paulista (Unesp), Brasil. E-mail: joao.fernando@unesp.br

parte do processo de automatização do sistema, foram utilizados os algoritmos SIFT e RANSAC para fazer a identificação de pontos homólogos nos trios de imagens e nas imagens subsequentes. Os parâmetros de orientação exterior (POE) das câmeras foram obtidos pelo processo de fototriangulação, o ajustamento foi pelo MMQ, modelo paramétrico. Os dados foram processados variando-se a quantidade de câmeras, duas ou três, para analisar a contribuição da terceira câmera. O experimento foi realizado variando-se o tamanho do bloco processado e o avanço de base, além do processamento sequencial e em lote. O controle de qualidade foi realizado pela análise da REMQ, comparando-se as coordenadas obtidas na fototriangulação com as coordenadas medidas em campo em um levantamento topográfico. Os experimentos mostraram que com a adição da terceira câmera foram obtidos melhores resultados, principalmente para a trajetória curva.

**PALAVRAS-CHAVE:** Mapeamento Móvel. Integração de Sensores. Caminhamento Fotogramétrico. Fototriangulação

#### **ABSTRACT**

A mobile mapping system (MMS) provides geographical information of the roads and their surroundings from a group of sensors installed on a platform. Those sensors are to acquire images and to orient them. The phototriangulation process is used both to calculate point coordinates in the mapping system and to orient the parameters of the MMS. In terrestrial mobile mapping systems, the photogrammetric bridging (PB) is a surveying mode that uses multiple images to estimate the system orientation and the three-dimensional point coordinates so that a single object point can be observed by a pair, a triplet or as many images as possible. By introducing a non-coplanar third camera to the imaging system enables a better estimation for this particular bundle block adjustment. The main objective of this work is to present the third camera analyses to the phototriangulation process. Low cost cameras and positioning systems were used to support the image acquisition. The imaging system was calibrated using the FCT/Unesp calibration field. The experimental surveying was realized in the vicinity of an urban block along of straight and curved sections. The SIFT and RANSAC algorithms were used to identify the matching points in the image triplets in sequences, as part of the automation process. The phototriangulation process, i.e., PB in particular, uses the LSM linearized model to estimate the exterior orientation parameters of the cameras. The data were worked by varying the number of cameras, two or three, to analyse the contribution of the third camera, based on varying the processed block sizes and the base advances. Moreover, it was also analysed the difference between sequential and full block calculation. Quality control was held by RMSE analysis by comparing object coordinates obtained by phototriangulation with the coordinates obtained by topographic survey. The experiments with the added third camera presented better results mainly in the curved sections.

**KEYWORDS:** Mobile Mapping. Sensor Integration. Photogrammetric Bridging. Phototriangulation

\* \* \*

## Introdução

Um sistema de mapeamento móvel (SMM) permite a aquisição de informações geográficas das vias e de seu entorno com rapidez. Sensores de posicionamento, de navegação e de imageamento são dispostos conjuntamente em um veículo automotor (BOSSLER et al., 1991). Os dados coletados por esse sistema são processados e geram imagens georreferenciadas dos locais, passando a integrar os sistemas de informação geográfica (TAO e LI, 2007).

As imagens de uma sequência de pares ou trios obtidas ao longo da trajetória do SMM podem ser diretamente ou indiretamente georreferenciadas. O georreferenciamento direto é dado pela integração dos sensores de posicionamento (GNSS – *Global Navigation Satellite System*) e inercial (IMU – *Inertial Measurement Unit*), que propiciam a estimativa direta dos parâmetros de orientação exterior (POE) da plataforma. Os dados inerciais e as imagens são considerados internos ao SMM, já os dados GNSS são externos. Os sensores de navegação geram sinais que são processados e interpretados como posições, relativos ao centro da antena; o sensor inercial fornece os ângulos de orientação dos eixos coordenados do sistema.

Os parâmetros de orientação exterior (POE), que são as coordenadas tridimensionais do centro perspectivo da câmera ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) no espaço objeto e os ângulos de orientação da câmera ( $\omega, \varphi, \kappa$ ), também chamado de “atitude” da câmera, podem ser estimados indiretamente por métodos fotogramétricos como a fototriangulação. Neste trabalho, a determinação dos POE foi realizada no decorrer do caminhamento fotogramétrico, o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados (MMQ), modelo paramétrico (SILVA e OLIVEIRA, 1998; SILVA et al., 2000).

Como parte do processo de automatização do sistema, é necessário fazer a identificação de pontos homólogos nas imagens obtidas de forma automática. Para esta finalidade, existem diversos algoritmos disponíveis. Neste trabalho, foram utilizados os algoritmos SIFT (*Scale-Invariant*

*Feature Transform*) (LOWE, 2004) e RANSAC (*RANdom SAmple Consensus*) (FISCHLER e BOLLES, 1981). O algoritmo SIFT extraiu as fotocoordenadas a partir dos pontos chave distribuídos pelas imagens; com o uso do RANSAC foram determinados os pontos homólogos. As fotocoordenadas dos pontos homólogos foram utilizadas como dados de entrada para o processo automático de auto-orientação das imagens por fototriangulação, ou caminhamento fotogramétrico.

Lemes Neto (2014) realizou experimento semelhante utilizando somente imagens de duas câmeras em um percurso de trajetória retilínea, concluindo que após certa quantidade de pares de imagens, a estimativa dos POE's das câmeras começava a divergir de forma significativa, comprometendo as estimativas dos pontos relacionados às imagens seguintes do levantamento.

Blasechi (2016) realizou um experimento com dados simulados e inseriu uma terceira câmera ao sistema, formando um arranjo triangular, a fim de aumentar a qualidade da estimativa dos POE por meio da redundância de observações. De fato, a terceira câmera ajudou a controlar melhor a divergência na estimativa dos parâmetros, embora ainda tivesse dificuldades para se determinar a profundidade de um ponto presente nas imagens. Neste trabalho, foi aplicado o arranjo triangular de câmeras em uma situação prática de campo.

A obtenção de pontos de apoio para mapeamento terrestre é uma etapa que requer a revisita da área mapeada pelo SMM. Dessa forma, essa etapa torna-se indesejável para mapeamento de áreas extensas, uma vez que o custo do projeto e o tempo necessário para a coleta dos dados aumenta consideravelmente. Portanto, a solução estudada partiu da premissa de não haver levantamento de pontos de apoio na área de estudo.

O objetivo primeiro deste trabalho foi testar a hipótese de reduzir a propagação de erros na determinação dos parâmetros de orientação exterior das câmeras no decorrer do caminhamento fotogramétrico, consequência da geometria das câmeras, quando usadas apenas duas, e da falta de pontos de

apoio distribuídos pelo terreno. O arranjo formado por um par de câmeras possui uma deficiência em sua geometria, pois há somente dois raios homólogos por ponto. Assim, a determinação da posição tridimensional do ponto fica sujeita a erros inerentes à tomada das imagens, sendo que com apenas duas câmeras não é possível detectar esses erros. A principal contribuição deste trabalho é a adição de uma terceira câmera ao sistema, disposta em um arranjo não-colinear, a fim de aumentar a quantidade de observações e melhorar a determinação dos POE e coordenadas no espaço objeto. A nova câmera possibilita gerar redundâncias nas observações dos pontos, de modo que cada ponto possua três raios homólogos, permitindo um ajuste no processo de interseção, do ponto de vista geométrico. Com a maior redundância das observações, a determinação da posição tridimensional do ponto ganha em precisão.

A precisão na determinação dos POE das câmeras no caminhamento fotogramétrico realizado apenas com imagens passa a ser ineficaz após certa quantidade de imagens processadas (LEMES NETO, 2014), os erros presentes nas primeiras determinações são propagados às demais estimativas, de modo que, em certo ponto, a precisão fica muito aquém do esperado. Na tentativa de solucionar tal problema, foram introduzidas injunções de posição, obtidas por sensor GNSS, no processo de fototriangulação.

Embora seja de conhecimento que sensores de maior custo proporcionam melhor precisão dos dados, optou-se em não montar um projeto muito dispendioso com a compra de equipamentos de alta precisão e de altos custos. Em Silva et al. (2001) já se tinha conseguido uma precisão com erros na casa de 1 m, porém, com pouca ou nenhuma automatização no processo. O que se deseja mostrar com este trabalho é que o método desenvolvido funciona adequadamente, e possibilita maior automação do processo.

O processamento dos dados foi realizado de vários modos distintos, primeiramente, foram comparados os resultados obtidos nos caminhamentos

com duas e três câmeras em ambas as trajetórias, reta e curva. Em seguida, foi estudado o processamento sequencial e em lote. Por fim, foram analisadas as variações do tamanho do bloco processado e do avanço de base. O propósito de se realizar estes modos de processamento foi analisar a precisão posicional dos pontos de verificação obtida para cada situação.

Devido à grande quantidade de dados coletados durante o levantamento e a inviabilidade de um operador realizar a identificação de pontos homólogos nas imagens e a preparação dos dados para o processo de fototriangulação, foi realizada a automatização dos processos de correspondência e identificação de pontos, bem como a fototriangulação.

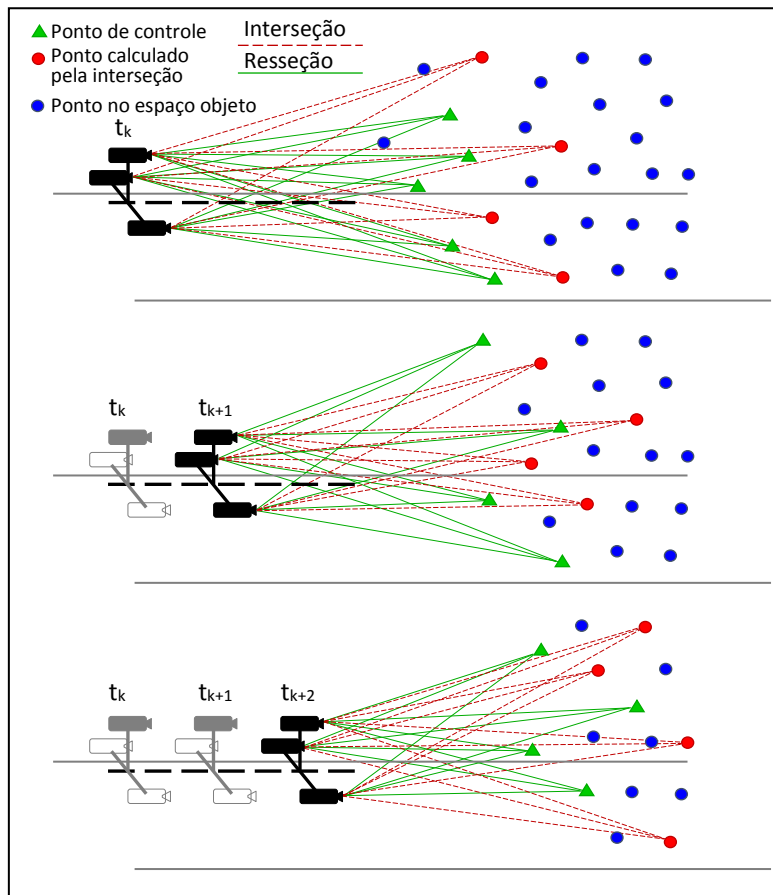
O restante do artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta alguns conceitos fundamentais para facilitar o entendimento do trabalho. Todos os passos da metodologia são descritos na Seção 3. A Seção 4 apresenta os experimentos e análises dos resultados. Por fim, as conclusões são discutidas na Seção 5.

## **1 Conceitos Fundamentais**

### **1.1 Caminhamento Fotogramétrico**

O caminhamento fotogramétrico (CF) pode ser entendido como um modo especial de levantamento fotogramétrico, baseado em sucessivos pares, ou trios, de imagens terrestres que formem modelos estereoscópicos, obtidas de tal modo que a base estereoscópica seja aproximadamente perpendicular ao eixo do levantamento ou, em outras palavras, que os eixos ópticos sejam aproximadamente paralelos ao referido eixo do levantamento (BARBOSA, 2006; SILVA e OLIVEIRA, 1998). A Figura 1 apresenta o conceito de caminhamento fotogramétrico.

Figura 1 – Conceito de caminhamento fotogramétrico



Fonte: Elaborada pelos autores.

Como visto na Figura 1, o caminhamento fotogramétrico é realizado a partir do primeiro trio de imagens, deste, calcula-se as coordenadas-objeto de pelo menos quatro pontos (momento  $t_k$ ). Seguindo, os pontos calculados por interseção do trio de imagens de  $t_k$  se tornam pontos conhecidos, usados então como controle para a resseção espacial de cada imagem do trio seguinte  $t_{k+1}$ . Com as imagens de  $t_{k+1}$  orientadas, calculam-se novamente as coordenadas-objeto de novos pontos, que por sua vez, apoiarão a resseção espacial de cada imagem do trio  $t_{k+2}$ , e assim sucessivamente.

Além da sucessão de resseções-interseções, é possível realizar o caminhamento fotogramétrico por meio de fototriangulações por feixes de raios sucessivas em pequenos blocos de imagens (2, 3 ou mais bases), dessa forma, os POE e as coordenadas-objeto são calculadas simultaneamente

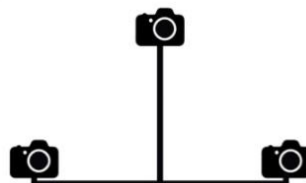
para cada bloco de imagens, reduzindo a propagação de erros de um par de imagem para outro. Este foi o método utilizado no decorrer do trabalho.

## 1.2 Arranjo triangular de câmeras

Silva (1997) apresentou um modelo de sistema de mapeamento móvel utilizando um par estereoscópico de câmeras. Lemes Neto (2014) propôs uma metodologia para posicionar e orientar, de forma semiautomática, pares de imagens obtidas por um SMM. O posicionamento e a orientação foi realizada utilizando-se fotocoordenadas obtidas nas imagens, extraídos pela técnica de visão computacional SIFT, e a fototriangulação. Neste método não foram utilizados sensores do tipo GNSS e/ou inercial, no entanto, foi feita uma simulação de um odômetro digital para fornecer a distância entre as tomadas dos pares de imagens.

Blasechi (2016) observa que na utilização de um par de câmeras há uma deficiência com relação à redundância de observações no alinhamento perpendicular à linha de base, e sugere a introdução de uma terceira câmera ao conjunto, de tal modo que crie uma geometria não-colinear entre as câmeras (Figura 2). Utilizando-se de experimentos com dados simulados e uma trajetória reta, o autor concluiu que a introdução da terceira câmera permite um melhor controle sobre as observações, de modo a obter coordenadas tridimensionais dos pontos de enlace com maior acurácia.

Figura 2 – Arranjo triangular de câmeras



Fonte: Elaborada pelos autores.



Devido ao espaço limitado sobre o automóvel para a disposição dos sensores de imageamento e ao fato do levantamento ser realizado ao longo de uma via, em sentido transversal à base, a relação base-distância é desfavorável (base pequena, distância grande).

Dessa forma, pequenas variações na orientação dos sensores resultam em grandes variações nas coordenadas-objeto. Ao se utilizar um arranjo formado por duas câmeras, erros inerentes à tomada das imagens são diretamente refletidos ao ponto no espaço objeto. Por haver somente dois raios homólogos por ponto, não é possível detectar erros de orientação das câmeras. Sendo assim, o arranjo com duas câmeras acaba não sendo muito adequado para um SMM.

Algumas possíveis soluções ao problema podem ser destacadas: a utilização de três câmeras em um arranjo colinear, embora aumente a redundância de observações, a determinação da profundidade do ponto continua sendo deficiente. O arranjo triangular de três câmeras solucionaria o problema da colinearidade, pois um terceiro raio homólogo não coplanar aos demais seria obtido para cada ponto, permitindo a detecção de erros de orientação em um dos sensores e conseqüentemente, melhorando a estimativa da profundidade do ponto.

Portanto, para este trabalho foi escolhido utilizar a introdução da terceira câmera no SMM, disposta em um arranjo triangular como sugerido por Blasechi (2016), esta geometria possibilita gerar redundâncias nas observações dos pontos, de modo que para cada ponto existem três raios homólogos, permitindo um ajuste, do ponto de vista geométrico, no processo de interseção dos raios.

## 2 Metodologia

### 2.1 Montagem do sistema de mapeamento

A montagem do sistema de mapeamento móvel de baixo custo contou com as câmeras (Canon EOS Rebel T3i) fixadas em uma estrutura de alumínio, com uma base de 82,9 centímetros entre as câmeras laterais e 50 centímetros de altura para a câmera central superior. Foi utilizada uma placa de prototipagem eletrônica Arduino (PCA) para integrar os diferentes sensores utilizados, no caso, câmeras digitais e o receptor GNSS. Para realizar o sincronismo dos disparos das câmeras, a PCA foi conectada a um relé eletromecânico. O sensor de posição também foi conectado à PCA, de forma que ao enviar o sinal para as câmeras dispararem, eram coletadas as informações de posição do sistema para aquele instante e armazenados em um cartão de memória.

A PCA foi colocada no interior de um invólucro plástico, por motivo de proteção. O sensor GNSS foi colocado na parte superior do equipamento, para que não sofresse interferência na captação de sinal. Outro fator levado em consideração foi a vibração sofrida pela câmera superior, para isso, foi reforçado o suporte de alumínio. As imagens obtidas pela câmera superior não apresentaram um arrasto significativo e, portanto, foram utilizadas normalmente. Por fim, a estrutura foi fixada na parte superior do veículo. A Figura 3 apresenta o sistema montado ainda no laboratório e o sistema montado no veículo.

Figura 3 – Sistema de mapeamento móvel



Fonte: Elaborada pelos autores.

## 2.2 Calibração das câmeras

A calibração das câmeras do SMM foi realizada no campo de calibração 3D instalado pelo grupo de pesquisa em Fotogrametria da FCT-UNESP, em 2013, no terraço do prédio da central de laboratórios do Departamento de Cartografia (SILVA, TOMMASELLI e ARTERO, 2014). Este campo é formado por 139 alvos (quadrados) com dimensões de 35 x 35 cm, codificados internamente no padrão ArUco. A localização e identificação dos alvos é realizada automaticamente pelo programa desenvolvido também pelo grupo de pesquisa e fornece coordenadas no espaço imagem com precisão subpixel.

Para se realizar o processo de calibração e a estimativa dos parâmetros de orientação interior foram tomadas 12 imagens para cada câmera. Essas 12 imagens foram tomadas de 3 estações distintas, separadas entre si por 3 m ao longo do eixo  $x$ , sendo que em cada estação as câmeras foram rotacionadas em relação ao eixo  $y$  em  $-45^\circ$ ,  $0^\circ$  e  $45^\circ$ . Além disso, para cada estação foram tomadas 4 imagens, sendo elas rotacionadas  $0^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $90^\circ$ , em torno do eixo  $z$  (sentido anti-horário) como mostra a Figura 4. Este procedimento é adotado no intuito de minimizar a dependência linear entre alguns parâmetros de OI e OE, além de garantir uma melhor geometria para o bloco.

Figura 4 – Rotação das imagens em torno do eixo  $z$



Fonte: Elaborada pelos autores.

O processo de calibração foi realizado utilizando o software CMC (Calibração com Múltiplas Câmaras), desenvolvido pelo grupo de Pesquisa em Fotogrametria/Unesp, em linguagem C/C++ e possui modelos de calibração para câmaras perspectivas convencionais e câmeras com lentes “olho de peixe”, com estimação pelo Método dos Mínimos Quadrados, modelo combinado. Além disso, permite a calibração com injunções de estabilidade da orientação relativa (RUY et al., 2007).

Como modelo para a correção das distorções radial simétrica e descentrada foi utilizado o modelo de Conrady-Brown (BROWN, 1971; FRYER, 1996; WOLF e DEWITT, 2000). Pelo fato dos parâmetros de afinidade exercerem pouca influência na correção das coordenadas fotogramétricas, isto é, variação de baixa magnitude, estes parâmetros foram desconsiderados neste trabalho.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de orientação interior obtidos para cada uma das câmeras.

Tabela 1 – POI das câmeras obtidos na calibração

|                                    | Câmera Esquerda                 | Câmera Direita                  | Câmera Centro                    |
|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| f (mm)                             | 34.483 ± 0.006                  | 34.792 ± 0.006                  | 34.285 ± 0.008                   |
| x <sub>0</sub> (mm)                | 0.461 ± 0.007                   | 0.135 ± 0.006                   | 0.242 ± 0.008                    |
| y <sub>0</sub> (mm)                | -0.233 ± 0.005                  | -0.197 ± 0.004                  | -0.483 ± 0.005                   |
| k <sub>1</sub> (mm <sup>-2</sup> ) | -3.396x10 <sup>-5</sup> ± 0.215 | -3.270x10 <sup>-5</sup> ± 0.196 | -3.297x10 <sup>-5</sup> ± 0.247  |
| k <sub>2</sub> (mm <sup>-4</sup> ) | 1.308x10 <sup>-7</sup> ± 0.325  | 1.591x10 <sup>-7</sup> ± 0.272  | 1.063x10 <sup>-7</sup> ± 0.356   |
| k <sub>3</sub> (mm <sup>-6</sup> ) | 0.053x10 <sup>-9</sup> ± 0.149  | -0.133x10 <sup>-9</sup> ± 0.116 | 0.215x10 <sup>-9</sup> ± 0.156   |
| p <sub>1</sub> (mm <sup>-1</sup> ) | 7.601x10 <sup>-5</sup> ± 0.219  | 5.532x10 <sup>-5</sup> ± 0.205  | 4.026x10 <sup>-5</sup> ± 0.237   |
| p <sub>2</sub> (mm <sup>-1</sup> ) | -6.196x10 <sup>-5</sup> ± 0.160 | -0.006x10 <sup>-5</sup> ± 0.149 | -15.587x10 <sup>-5</sup> ± 0.173 |

Fonte: Elaborada pelos autores.

### 2.3 Levantamento de campo

Blasechi (2016) e Lemes Neto (2014) realizaram experimentos em trajetória reta a fim de se ter um ambiente de estudo com maior controlabilidade, e conseqüentemente, melhor entendimento sobre os resultados obtidos. O desafio neste trabalho foi aplicar o método de

caminhamento fotogramétrico não apenas na trajetória reta, mas também em curva e analisar o seu comportamento, bem como analisar a influência da terceira câmera.

Foi realizado um levantamento no entorno de uma quadra, na cidade de Presidente Prudente. O veículo se deslocou a uma velocidade média de 5 m/s (18 km/h) e a tomada das imagens ocorreu a cada 1s. Nos trechos em curva, a velocidade do veículo foi reduzida, obtendo um espaçamento menor entre as imagens. Ao todo foram tomadas 114 imagens por câmera, totalizando 342 imagens. A Figura 5 mostra a quadra levantada com os trechos selecionados (amarelos) para os experimentos.

Figura 5 – Trechos, reto e curvo, selecionados



Fonte: Elaborada pelos autores.

As câmeras utilizadas possuem sensor CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) de 22.3x14.9 mm. Foi escolhida a resolução das imagens de 3456x2403 pixels (8 megapixels). Para a obtenção da posição do SMM foi utilizado o receptor GNSS Ublox NEO-M8N, com precisão posicional nominal de 2 m.

## 2.4 Levantamento de campo

O primeiro passo foi a identificação de pontos homólogos entre as imagens. O algoritmo SIFT (LOWE, 2004), foi utilizado neste trabalho para detectar pontos chave candidatos ao processo de correspondência entre as imagens. Foi realizada a correspondências entre a imagem da câmera da esquerda com a imagem da direita, em seguida, a correspondência de cada uma delas com a imagem do centro (correspondência lateral). A Figura 6 mostra um exemplo de correspondência lateral.

Figura 6 – Exemplo de correspondência lateral



Fonte: Elaborada pelos autores.

No entanto, parte das correspondências encontradas são as chamadas falsas correspondências (*outliers*). Como forma de eliminar as falsas correspondências grosseiras, foi implementado um controle levando-se em consideração a inclinação da reta formada pela ligação dos pontos homólogos, quando colocadas as imagens lado a lado. Este controle foi realizado estipulando-se um limiar angular com relação à média das inclinações de todas as retas de um par de imagens, de forma que as retas que possuíam inclinação fora do intervalo definido pelo limiar foram classificadas como falsas correspondências grosseiras. As equações que descrevem o controle realizado são:



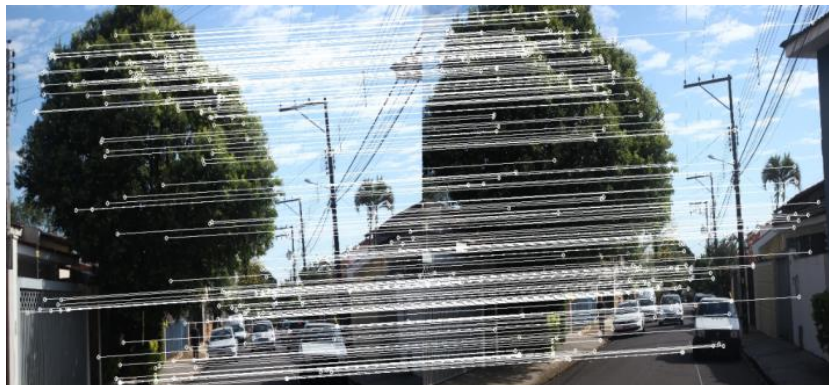
$$I = \arctg \left( \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (1)$$

$$m_I - L \leq I_{\text{aceitável}} \leq m_I + L \quad (2)$$

sendo  $I$  a inclinação da reta,  $m_I$  a média das inclinações,  $L$  o limiar de aceitação e  $(x_1, y_1, x_2, y_2)$  as coordenadas dos pontos nas imagens.

O limiar escolhido foi de  $0,5^\circ$  para correspondência Esquerda x Direita e  $1,7^\circ$  para correspondência Esquerda/Direita x Centro. Estes valores foram escolhidos de forma empírica após análise da variação máxima da inclinação de um grupo de retas formadas por pontos correspondentes julgados como correspondência verdadeira (*inliers*) pelo observador. Vale ressaltar que este valor pode variar dependendo da disposição dos sensores no SMM. Após a inserção do controle de retas, obteve-se o resultado apresentado na Figura 7. Pela imagem é possível perceber que as falsas correspondências grosseiras foram eliminadas.

Figura 7 – Correspondências após a aplicação do controle por retas



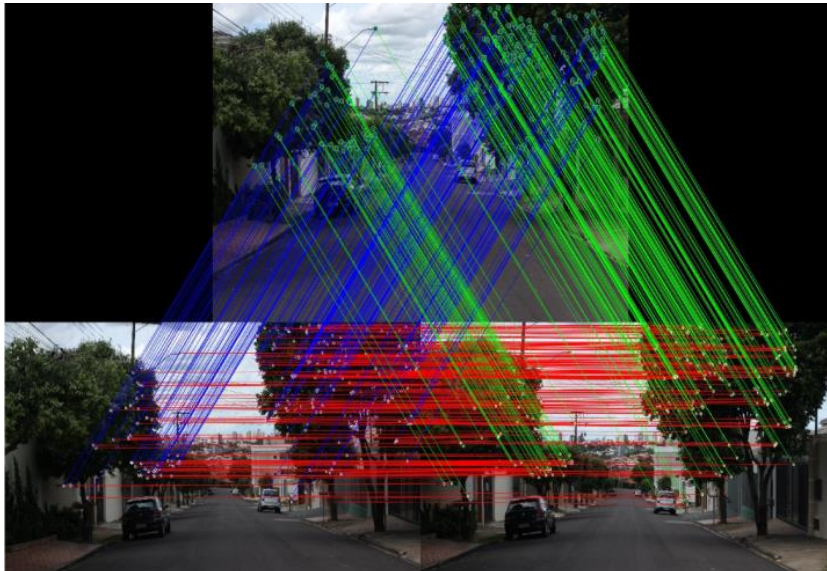
Fonte: Elaborada pelos autores.

Eliminadas as correspondências grosseiras, fez-se necessário o uso do algoritmo RANSAC (FISCHLER e BOLLES, 1981) para separar as correspondências verdadeiras das falsas correspondências restantes. Após a aplicação do RANSAC, foram descartados também os demais pontos que pertencessem à apenas um par de imagens, sendo assim, ao final desta etapa restaram apenas as correspondências verdadeiras pertencentes às

três imagens. Este processo foi repetido para as 114 bases do levantamento. A Figura 8 apresenta um exemplo de correspondência entre pontos em 3 imagens de uma mesma base.

Pelo fato desta etapa visar detectar pontos de enlace para o processo de fototriangulação, era necessário que os pontos encontrados pertencessem a mais de uma base, ou seja, a dois trios de imagens, pelo menos, preferencialmente consecutivos (para que haja o caminhamento fotogramétrico). Portanto, foi feita a correspondência entre imagens de uma mesma câmera em instantes diferentes, isto é, foi comparada a imagem da câmera da esquerda na primeira exposição com a imagem da câmera da esquerda na segunda exposição, repetiu-se analogamente para a câmera da direita e central (processo chamado de correspondência avante). A correspondência avante foi realizada entre imagens tomadas nos instantes  $t_n$ ,  $t_{n+1}$  e  $t_{n+2}$ . A correspondência avante limitou-se a apenas três instantes consecutivos devido à significativa variação da cena imageada.

Figura 8 – Correspondências em um trio de imagens



Fonte: Elaborada pelos autores.



Ao final desta etapa restaram apenas pontos que fossem homólogos em, pelo menos, 6 imagens, sendo que em alguns casos ocorreu de os pontos estarem presentes em 9 imagens. No total, foram extraídos 5773 pontos e geradas 40567 observações. Os algoritmos para todas as etapas descritas na metodologia foram programados na linguagem C++. O algoritmo SIFT foi executado na GPU do computador, de modo a otimizar o tempo de processamento, tendo em vista a grande quantidade de imagens processadas.

#### 2.4.1 Geração dos POE das câmeras

Durante o levantamento de campo realizado, foram coletados os parâmetros de orientação exterior do sistema. O sensor GNSS realizou a coleta das coordenadas geodésicas do SMM para cada tomada de foto. Os parâmetros de atitude ( $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ) foram estimados (eixo  $x$  apontando para a lateral direita do SMM e o eixo  $y$  apontando para cima). Devido às vias do trajeto levantado não serem inclinadas no sentido transversal ao sentido de caminamento, o valor do parâmetro  $\varphi$  foi aproximado para 0 (zero). Os parâmetros  $\kappa$  e  $\omega$  puderam ser aproximados com base nas sucessivas posições do SMM, de acordo com as seguintes equações:

$$\omega_i = -90^\circ - \arctg\left(\frac{z_{i+1}-z_i}{\sqrt{(\Delta x_{i+1,i}^2 + \Delta y_{i+1,i}^2)}}\right) \quad (3)$$

$$\varphi_i = 0 \quad (4)$$

$$\kappa_i = 90^\circ - \arctg\left(\frac{y_{i+1}-y_i}{x_{i+1}-x_i}\right) \quad (5)$$

Para os trechos em curva, foi calculada a diferença entre o  $\kappa$  do início da curva e o  $\kappa$  do final da curva, e foi distribuída igualmente para as exposições tomadas durante o processo de guinada.

Além dos parâmetros de atitude do sistema, para se realizar a fototriangulação é preciso também as coordenadas dos CPs. No entanto, as

coordenadas dos centros perspectivos (CP) das câmeras devem estar relacionadas à um sistema 3D cartesiano. Dessa forma, as coordenadas geodésicas do SMM necessitaram ser transformadas para um sistema 3D local.

A conversão entre o sistema geodésico  $(\varphi, \lambda, h)$  e um sistema local  $(X_l, Y_l, Z_l)$  não pode ser realizada diretamente, para isso é preciso utilizar o sistema intermediário cartesiano geocêntrico ECEF.

A transformação do sistema geodésico para o sistema ECEF foi feita segundo o modelo de Helmert (1880):

$$X_{ECEF} = (N + h). \cos\varphi. \cos\lambda \quad (6)$$

$$Y_{ECEF} = (N + h). \cos\varphi. \sen\lambda \quad (7)$$

$$Z_{ECEF} = (N(1 - e^2) + h). \sen\varphi \quad (8)$$

sendo:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sen^2\varphi}}$$

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$$

em que  $a$  e  $b$  são os semi-eixo maior e semi-eixo menor do elipsóide de referência, respectivamente.

Uma vez transformadas em coordenadas ECEF, foi possível então, fazer a transformação para o sistema 3D local. Para a origem do sistema local foi escolhido um ponto a sudoeste e perto da área de levantamento, de coordenadas geodésicas. A Tabela 2 apresenta as coordenadas geodésicas da origem do sistema local.

Tabela 2 – Coordenadas geodésicas da origem do sistema local

|             |                      |
|-------------|----------------------|
| $\varphi_0$ | $-22.13222222^\circ$ |
| $\lambda_0$ | $-51.43^\circ$       |
| $h_0$       | 400 m                |

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os eixos foram definidos seguindo o modelo ENU (*East-North-Up*):

- Eixo *X*: aponta para Leste;
- Eixo *Y*: aponta para o Norte;
- Eixo *Z*: aponta para o zênite.

A conversão do sistema ECEF para o sistema local foi então realizada com base na seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{GNSS}^{local} = \begin{pmatrix} -\text{sen}\lambda_0 & \text{cos}\lambda_0 & 0 \\ -\text{sen}\varphi_0 * \text{cos}\lambda_0 & -\text{sen}\varphi_0 * \text{sin}\lambda_0 & \text{cos}\varphi_0 \\ \text{cos}\varphi_0 * \text{cos}\lambda_0 & \text{cos}\varphi_0 * \text{sen}\lambda_0 & \text{sen}\varphi_0 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_P^{ECEF} & -X_0^{ECEF} \\ Y_P^{ECEF} & -Y_0^{ECEF} \\ Z_P^{ECEF} & -Z_0^{ECEF} \end{bmatrix} \quad (9)$$

sendo:

- $(X, Y, Z)_{GNSS}^{local}$ : coordenadas de cada posição do sensor GNSS no referencial local;
- $(\varphi_0, \lambda_0)$ : coordenadas da origem do sistema local no referencial geodésico;
- $(X, Y, Z)_P^{ECEF}$ : coordenadas de cada posição do sensor GNSS no referencial ECEF;
- $(X, Y, Z)_0^{ECEF}$ : coordenadas da origem do sistema local no referencial ECEF.

Seguindo, foi necessário converter as coordenadas do sensor para cada câmera, para isso foi medido o *lever arm* ( $a$ ) de cada um dos sensores, sendo a origem do sistema sensor situada na junção do eixo vertical com o eixo horizontal do suporte. Sendo assim, o *lever arm*, em metros, para cada um dos sensores ficou definido como:

$$a_{GNSS}^s = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.640 \\ 0 \end{bmatrix} \quad a_{ce}^s = \begin{bmatrix} -0.42 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad a_{cd}^s = \begin{bmatrix} 0.41 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad a_{cc}^s = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.535 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

As coordenadas (*X*, *Y*, *Z*) para cada câmera foram calculadas pela Equação 11 (WOLF e DEWITT, 2000).

$$\begin{bmatrix} X_{c_i} \\ Y_{c_i} \\ Z_{c_i} \end{bmatrix}_{local} = \begin{bmatrix} X_{GNSS} \\ Y_{GNSS} \\ Z_{GNSS} \end{bmatrix}_{local} + R_s^{local} \cdot (a_{GNSS}^s - a_{c_i}^s) \quad (11)$$

sendo:

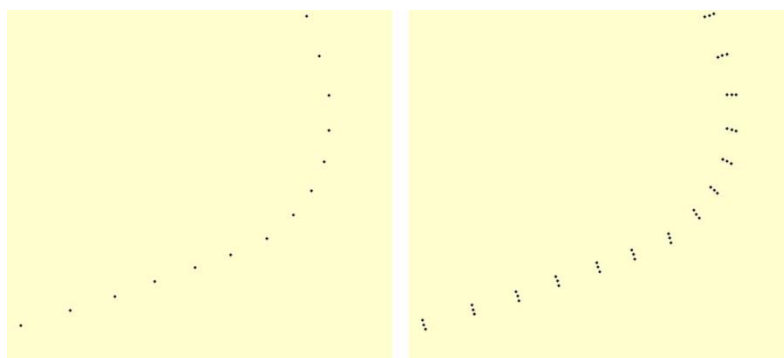
$$R_s^{local} = \begin{pmatrix} \cos\varphi \cdot \cos\kappa & \cos\omega \cdot \text{sen}\kappa + \text{sen}\omega \cdot \text{sen}\varphi \cdot \cos\kappa & \text{sen}\omega \cdot \text{sen}\kappa - \cos\omega \cdot \text{sen}\varphi \cdot \cos\kappa \\ -\cos\varphi \cdot \text{sen}\kappa & \cos\omega \cdot \cos\kappa - \text{sen}\omega \cdot \text{sen}\varphi \cdot \text{sen}\kappa & \text{sen}\omega \cdot \cos\kappa + \cos\omega \cdot \text{sen}\varphi \cdot \text{sen}\kappa \\ \sin\varphi & -\text{sen}\omega \cdot \cos\varphi & \cos\omega \cdot \cos\varphi \end{pmatrix}$$

em que:

- $(X_{c_i}, Y_{c_i}, Z_{c_i})_{local}$ : coordenadas da câmera no referencial local;
- $(X_{GNSS}, Y_{GNSS}, Z_{GNSS})_{local}$ : coordenadas do receptor GNSS no referencial local;
- $R_s^{local}$ : matriz de transformação do sistema sensor para o sistema local;
- $i$ : indicador da câmera calculada.

Finalmente, foram obtidas as coordenadas dos CP's das câmeras no referencial local, estas coordenadas servem como valores aproximados para o processo de fototriangulação. A Figura 9 apresenta um trecho do levantamento, em (a) as posições dos sensores coletadas em campo e em (b) as posições das câmeras calculadas.

Figura 9 – Geração dos POE



(a) Posições dos sensores GNSS      (b) Posições das câmeras

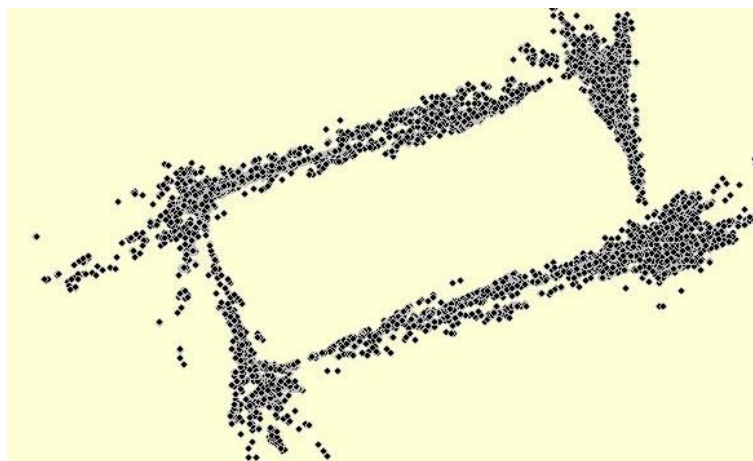
Fonte: Elaborada pelos autores.

#### 2.4.2 Geração das coordenadas-objeto e filtragem dos dados

Como última etapa de preparação dos dados para o processo de fototriangulação, é necessária a geração das coordenadas dos pontos de enlace referenciadas ao espaço objeto local. O processo de interseção fotogramétrica foi realizado partindo-se das equações de colinearidade. No entanto, este método requer uma aproximação inicial para os parâmetros. Neste trabalho, foi utilizado o método de interseção fotogramétrica por agrupamento de parâmetros (OLIVEIRA, 2003). Após determinar as coordenadas-objeto aproximadas dos pontos de enlace, foi realizado um refinamento destas coordenadas de forma iterativa até que a correção das coordenadas fosse de magnitude desprezível, e então, estes valores refinados foram utilizados no processo de fototriangulação.

O processo completo de interseção fotogramétrica, amplamente difundido na comunidade fotogramétrica, pode ser consultado em Wolf e Dewitt (2000), Ghosh (2005). A Figura 10 apresenta os pontos de enlace calculados no processo de interseção fotogramétrica.

Figura 10 – Pontos de enlace calculados por interseção fotogramétrica



Fonte: Elaborada pelos autores.

Foi realizada uma filtragem, seguindo alguns critérios, dos pontos de enlace, de forma a reduzir a quantidade de pontos por foto e ao mesmo tempo, homogeneizar a distribuição dos pontos, em termos de quantidade por foto. Primeiramente, foram determinados dois limiares, um de distância mínima entre câmera-ponto e um de distância máxima. Dessa forma, apenas pontos que se situassem no intervalo entre os limiares eram considerados aptos a serem utilizados. Os valores escolhidos foram de 4,0 m para distância mínima e 40,0 m para distância máxima. O valor de distância mínima foi definido de modo a evitar que pontos sobre objetos desfocados fossem escolhidos. O valor de distância máxima foi adotado para evitar pontos muito distantes, uma vez que quanto maior a distância câmera-ponto, mais afetadas serão as coordenadas-objeto do ponto devido às imprecisões nas coordenadas imagem e à relação base-altura, no caso deste trabalho, base/distância.

Após a filtragem por distâncias, foi realizada a filtragem por quantidade de pontos por foto. Para isso foi escolhido um valor máximo de 15 pontos possíveis por foto. No entanto, para garantir uma geometria equilibrada para a determinação da orientação da imagem no processo de fototriangulação, é preciso que os pontos de enlace se situem nas extremidades das imagens, ou seja, pontos situados próximos ao centro da imagem resultam em uma determinação menos acurada da orientação da imagem. Sendo assim, as imagens foram divididas em nove quadrantes (Figura 11), e para cada quadrante foi atribuído um peso diferente.

Figura 11 – Divisão dos quadrantes de uma imagem

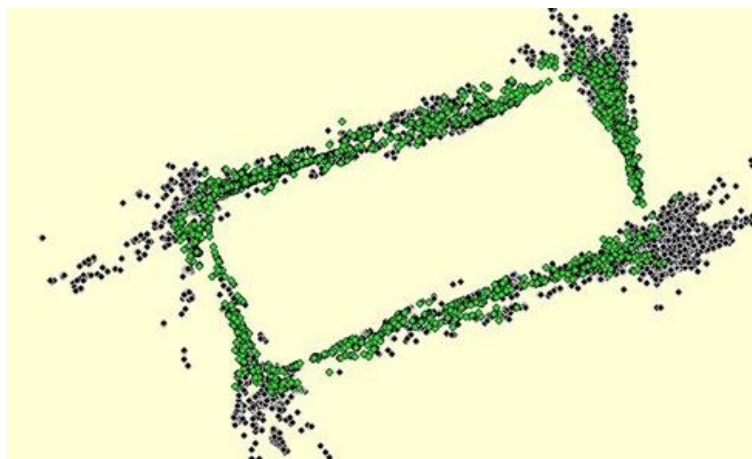


Fonte: Elaborada pelos autores.

Para os quadrantes 1-3-7-9 (cantos) foram atribuídos peso 3, para os quadrantes 2-4-6-8 (laterais) foram atribuídos peso 2, e para o quadrante 5 (central) foi atribuído peso 1. Os pontos para cada imagem foram escolhidos levando em consideração o peso de seu quadrante e uma proporção pré-estabelecida de 50,0% dos pontos para os cantos, 40,0% para os laterais e 10,0% para o quadrante central.

Portanto, dado um número máximo de pontos por foto, foi escolhido 1 ponto por quadrante do canto (para os quadrantes que haviam pontos). Em seguida foi escolhido o ponto mais distantes, dentro do mesmo quadrante, do ponto já escolhido, esse processo foi repetido para todos os quadrantes dos cantos até atingir o limite percentual do número máximo de pontos por foto ou esgotarem os pontos nestes quadrantes. Na sequência, foi repetido o mesmo procedimento para os quadrantes laterais e central. Por fim, os pontos que foram identificados em 9 imagens diferentes, foram inseridos no grupo de pontos, independentemente do seu respectivo quadrante. A Figura 12 destaca os pontos escolhidos no processo de filtragem.

Figura 12 – Pontos de enlace filtrados (em verde), e demais pontos gerados pelos algoritmos de extração (em preto)



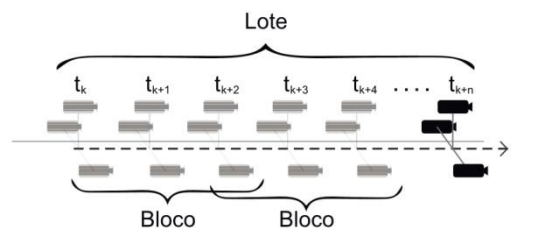
Fonte: Elaborada pelos autores.

### 2.4.3 Fototriangulação

O processamento dos dados foi realizado tendo em vista analisar a influência da adição da terceira câmera no sistema de mapeamento móvel e analisar o caminhamento fotogramétrico em um trecho reto e um trecho curvo.

Foi também estudado o processamento sequencial e em lote. No processamento em lote, foram considerados todos os parâmetros e imagens de forma simultânea (tamanho do bloco = 10). No processamento sequencial, o levantamento foi segmentado em pequenos blocos de imagens subsequentes, onde cada bloco foi triangulado isoladamente. É chamado de “bloco” o conjunto de imagens tomadas por sucessivas exposições  $t_k$ , sendo o bloco definido por uma quantidade fixa de imagens menor que o total de imagens. A Figura 13 ilustra o conceito de bloco e lote.

Figura 13 – Conceito de bloco e lote

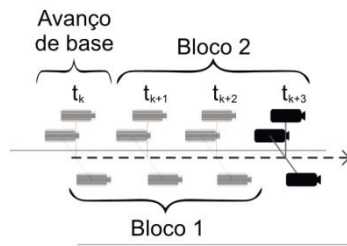


Fonte: Elaborada pelos autores.

O “avanço de base” é a quantidade de exposições  $t_k$  adiante introduzida na formação de um novo bloco. Por exemplo, considerando um bloco com três exposições (nove imagens), após a fototriangulação deste bloco, é descartada a primeira exposição (três imagens) e criar um novo bloco com as duas exposições não descartadas e o acréscimo de uma nova exposição, tendo um bloco de três exposições novamente. Neste caso, o avanço de base é 1. A Figura 14 ilustra o conceito de avanço de base.



Figura 14 – Conceito de avanço de base



Fonte: Elaborada pelos autores.

Os experimentos foram realizados a partir de um único levantamento variando-se no processamento a quantidade de câmeras (duas ou três), o trecho percorrido (reta ou curva) e o tipo de processamento, em lote ou sequencial.

Na montagem da matriz dos pesos ( $P$ ), a ponderação dos parâmetros foi realizada de três formas diferentes. Primeiramente, assumiu-se que os POI foram invariantes durante o levantamento de campo devido ao trecho de levantamento ser curto e as câmeras utilizadas, apesar de não-métricas, serem de alta qualidade e terem sido calibradas rigorosamente. Sendo assim, os POI das câmeras, obtidos no processo de calibração, foram injuncionados absolutamente. Aliado a isto, pelo fato da calibração ser um processo robusto e retornar valores com boa precisão, a injunção absoluta dos POI evita que esses parâmetros absorvam erros provenientes dos demais parâmetros no ajustamento.

Os parâmetros posicionais das câmeras foram injuncionados relativamente, levando em consideração a precisão do sensor GNSS utilizado. De forma análoga, os pesos dos parâmetros de atitude das câmeras também foram determinados em função das variâncias estipuladas pelo usuário. Ambos os pesos dos parâmetros foram calculados segundo a Equação 12:

$$P_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2} \quad (12)$$

em que:

- $P_i$ : peso de um parâmetro (i);
- $\sigma_0^2$ : variância a priori;

- $\sigma_i^2$ : variância do parâmetro.

### 3 Experimento e Análise dos Resultados

Os experimentos realizados permitiram analisar a influência da terceira câmera no caminhamento fotogramétrico, estudar seu comportamento em trechos retos e curvos, comparar o processamento sequencial e em lote, e por fim, analisar variações do tamanho do bloco e avanço de base. Portanto, os experimentos foram divididos de forma a analisar cada quesito separadamente. A Tabela 3 apresenta um resumo das combinações de experimentos realizados, variando-se o avanço de base, o tamanho do bloco e a análise sequencial x bloco.

Tabela 3 – Resumo dos experimentos realizados

| Reta              |                   | Curva             |                   |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 2 câmeras         | 3 câmeras         | 2 câmeras         | 3 câmeras         |
| Sequencial x Lote | Sequencial x Lote | Sequencial x Lote | Sequencial x Lote |
| Tamanho do bloco  | Tamanho do bloco  | Tamanho do bloco  | Tamanho do bloco  |
| Avanço de base    | Avanço de base    | Avanço de base    | Avanço de base    |

Fonte: Elaborada pelos autores.

De forma geral, para todos os processamentos, alguns parâmetros se mantiveram constantes.

- Injunção de base:
  - 0,829 m entre as câmeras Esquerda x Direita;
  - 0,649 m entre as câmeras Esquerda x Centro;
  - 0,649 m entre as câmeras Direita x Centro;
  - Desvios-padrão das injunções de base: 0,01 m;
- Tamanho do pixel: 0,0064 mm;
- Critério de convergência: 0,001 m;
- Iterações máximas: 50;
- Variância a priori: 1;

- Desvio-padrão das fotocoordenadas: 0,0064 mm (1 pixel);
- Desvio-padrão das injunções posicionais dos CPs da primeira base: 0,5 m;
- Desvio-padrão das injunções posicionais dos CPs das demais bases: 2 m;
- Desvio-padrão das injunções de atitude dos CPs da primeira base: 1 grau;
- Desvio-padrão das injunções de atitude dos CPs das demais bases: 5 graus.

### 3.1 Trajetória Reta

Neste experimento foram processadas 10 bases consecutivas iniciais do levantamento tomadas em uma trajetória reta. Como forma de controle para a estimativa das coordenadas dos pontos no espaço objeto, foram utilizados 8 pontos de verificação coletados em campo. A Tabela 4 apresenta as coordenadas-objeto dos pontos de verificação no sistema local.

Tabela 4 – Coordenadas dos pontos de verificação na trajetória reta

| Ponto | Levantamento Topográfico |         |        |
|-------|--------------------------|---------|--------|
|       | X (m)                    | Y (m)   | Z (m)  |
| V1    | 187,288                  | 83,697  | 40,073 |
| V2    | 188,847                  | 84,204  | 40,137 |
| V3    | 207,822                  | 89,166  | 40,275 |
| V4    | 178,400                  | 95,473  | 40,337 |
| V5    | 173,225                  | 93,731  | 40,602 |
| V6    | 199,857                  | 102,379 | 39,415 |
| V7    | 208,848                  | 105,588 | 38,806 |
| V8    | 191,471                  | 85,099  | 39,652 |

Fonte: Elaborada pelos autores.

Com as coordenadas obtidas no levantamento de campo e as calculadas no processamento, foram calculadas as REMQ (Raiz do Erro Médio Quadrático) para cada coordenada, bem como a média das resultantes das coordenadas. Na Tabela 5 tem-se o cálculo do erro para cada uma das

coordenadas obtidas por um processamento com duas câmeras, sequencial, e com tamanho do bloco  $TB = 3$  e avanço de base  $AB = 1$ , e na Tabela 6 as respectivas REMQ.

Tabela 5 – Erro obtido para cada coordenada com processamento sequencial na trajetória reta (2 câmeras)

| Ponto | Calculada 2C - 3/1 |         |        | Erro (calculado - real) |        |        |        |
|-------|--------------------|---------|--------|-------------------------|--------|--------|--------|
|       | X (m)              | Y (m)   | Z (m)  | EX (m)                  | EY (m) | EZ (m) | ER (m) |
| V1    | 180,133            | 81,427  | 38,925 | -7,155                  | -2,270 | -1,148 | 7,594  |
| V2    | 180,985            | 81,805  | 39,099 | -7,862                  | -2,399 | -1,038 | 8,285  |
| V3    | 198,606            | 86,119  | 39,748 | -9,216                  | -3,047 | -0,527 | 9,721  |
| V4    | 172,244            | 93,695  | 39,073 | -6,156                  | -1,778 | -1,264 | 6,531  |
| V5    | 167,565            | 92,287  | 39,261 | -5,660                  | -1,444 | -1,341 | 5,993  |
| V6    | 192,032            | 99,039  | 38,754 | -7,825                  | -3,340 | -0,661 | 8,534  |
| V7    | 200,132            | 101,626 | 38,426 | -8,716                  | -3,962 | -0,380 | 9,581  |
| V8    | 183,561            | 82,606  | 38,701 | -7,910                  | -2,493 | -0,951 | 8,348  |

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 6 – REMQ das coordenadas com processamento sequencial na trajetória reta (2 câmeras)

| REMQ  |       |       |        |
|-------|-------|-------|--------|
| X (m) | Y (m) | Z (m) | R (m)  |
| 7,646 | 2,704 | 0,972 | 8,1678 |

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os resultados obtidos por um processamento com três câmeras, sequencial, e com tamanho do bloco  $TB = 3$  e avanço de base  $AB = 1$  estão dispostos na Tabela 7 e suas respectivas REMQ na Tabela 8.

Tabela 7 – Erro obtido para cada coordenada com processamento sequencial na trajetória reta (3 câmeras)

| Ponto | Calculada 3C - 3/1 |         |        | Erro (calculado - real) |        |        |        |
|-------|--------------------|---------|--------|-------------------------|--------|--------|--------|
|       | X (m)              | Y (m)   | Z (m)  | EX (m)                  | EY (m) | EZ (m) | ER (m) |
| V1    | 181,038            | 81,478  | 39,448 | -6,250                  | -2,219 | -0,625 | 6,661  |
| V2    | 181,720            | 81,863  | 39,561 | -7,127                  | -2,341 | -0,576 | 7,524  |
| V3    | 198,432            | 86,139  | 40,610 | -9,390                  | -3,027 | 0,335  | 9,872  |
| V4    | 171,699            | 93,331  | 39,501 | -6,701                  | -2,142 | -0,836 | 7,084  |
| V5    | 167,422            | 92,214  | 39,654 | -5,803                  | -1,517 | -0,948 | 6,073  |
| V6    | 191,319            | 98,695  | 39,542 | -8,538                  | -3,684 | 0,127  | 9,300  |
| V7    | 199,772            | 101,494 | 39,402 | -9,076                  | -4,094 | 0,596  | 9,974  |
| V8    | 184,276            | 82,682  | 39,214 | -7,195                  | -2,417 | -0,438 | 7,603  |

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 8 – REMQ das coordenadas com processamento sequencial na trajetória reta (3 câmeras)

| REMQ  |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|
| X (m) | Y (m) | Z (m) | R (m) |
| 7,613 | 2,798 | 0,612 | 8,134 |

Fonte: Elaborada pelos autores.

De modo a facilitar a análise de cada processamento, serão apresentadas a seguir apenas as respectivas REMQ obtidas para cada coordenada.

### 3.1.1 Análise: 2 x 3 câmeras

Para realizar a comparação do caminhamento fotogramétrico com duas e três câmeras, foram realizadas fototriangulações com diversas configurações de tamanho do bloco e avanço de base. Os resultados obtidos para cada processamento usando apenas duas câmeras são apresentados na Tabela 9 e os resultados dos processamentos com três câmeras na Tabela 10.

A partir dos resultados presentes nas Tabelas 9 e 10, é possível perceber que em alguns casos os resultados foram melhores utilizando três câmeras, enquanto que em outros casos, utilizando duas câmeras. O arranjo de câmeras com melhor resultado para cada experimento é mostrado na Tabela 11.

Tabela 9 – Resultados para os processamentos sequencial e em lote com 2 câmeras (trajetória reta)

| CAM | TB | AB | SP | REMQ (m) |       |       |       |
|-----|----|----|----|----------|-------|-------|-------|
|     |    |    |    | X        | Y     | Z     | R     |
| 2   | 2  | 1  | 9  | 7,553    | 2,719 | 0,970 | 7,926 |
| 2   | 3  | 1  | 8  | 7,646    | 2,704 | 0,972 | 8,073 |
| 2   | 4  | 1  | 7  | 6,935    | 2,420 | 0,983 | 7,387 |
| 2   | 5  | 1  | 6  | 5,618    | 2,117 | 1,006 | 5,998 |
| 2   | 6  | 1  | 5  | 5,518    | 2,125 | 1,007 | 5,916 |
| 2   | 7  | 1  | 4  | 5,862    | 2,186 | 0,988 | 6,294 |
| 2   | 8  | 1  | 3  | 5,764    | 2,096 | 0,989 | 6,173 |
| 2   | 9  | 1  | 2  | 5,658    | 2,061 | 1,006 | 6,067 |
| 2   | 10 | 0  | 1  | 5,213    | 2,052 | 1,057 | 5,675 |

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base, SP: seqüências processadas.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 10 – Resultados para os processamentos sequencial e em lote com 3 câmeras (trajetória reta)

| CAM | TB | AB | SP | REMQ (m) |       |       |       |
|-----|----|----|----|----------|-------|-------|-------|
|     |    |    |    | X        | Y     | Z     | R     |
| 3   | 2  | 1  | 9  | 7,725    | 2,926 | 0,559 | 8,011 |
| 3   | 3  | 1  | 8  | 7,613    | 2,798 | 0,612 | 8,011 |
| 3   | 4  | 1  | 7  | 6,802    | 2,480 | 0,650 | 7,258 |
| 3   | 5  | 1  | 6  | 5,296    | 2,041 | 0,660 | 5,550 |
| 3   | 6  | 1  | 5  | 5,320    | 2,064 | 0,634 | 5,613 |
| 3   | 7  | 1  | 4  | 5,917    | 2,195 | 0,608 | 6,300 |
| 3   | 8  | 1  | 3  | 5,813    | 2,105 | 0,589 | 6,169 |
| 3   | 9  | 1  | 2  | 5,706    | 2,069 | 0,572 | 6,056 |
| 3   | 10 | 0  | 1  | 5,324    | 2,069 | 0,492 | 5,709 |

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base, SP: sequências processadas.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 11 – Arranjo com melhor resultado para cada processamento (trajetória reta)

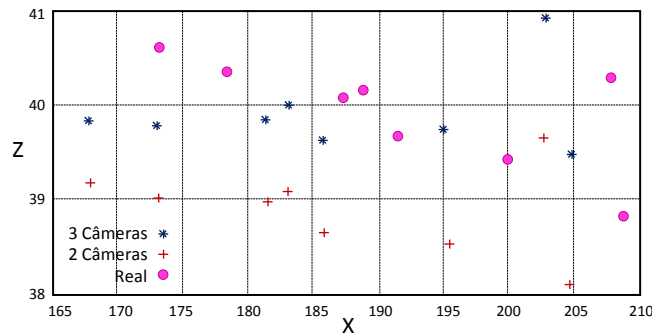
| TB | AB | Arranjo  |          |          |          |
|----|----|----------|----------|----------|----------|
|    |    | X        | Y        | Z        | R        |
| 2  | 1  | 2        | 2        | <u>3</u> | 2        |
| 3  | 1  | <u>3</u> | 2        | <u>3</u> | 3        |
| 4  | 1  | <u>3</u> | 2        | <u>3</u> | 3        |
| 5  | 1  | <u>3</u> | <u>3</u> | <u>3</u> | 3        |
| 6  | 1  | <u>3</u> | <u>3</u> | <u>3</u> | 3        |
| 7  | 1  | 2        | <u>2</u> | <u>3</u> | <u>2</u> |
| 8  | 1  | 2        | <u>2</u> | <u>3</u> | 3        |
| 9  | 1  | 2        | <u>2</u> | <u>3</u> | 3        |
| 10 | 0  | 2        | 2        | <u>3</u> | 2        |

TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base.  
Nas células sublinhadas a diferença de resultado foi menor que 1 cm.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

Analisando a Tabela 11 é possível notar que na maioria dos casos, o arranjo formado com três câmeras gerou resultados melhores que o arranjo com duas apenas. Analisando cada coordenada isoladamente, o arranjo de duas câmeras é o que apresenta melhor resultado com relação às coordenadas X (eixo paralelo ao do levantamento) e as coordenadas Y (eixo transversal ao do levantamento), na maioria dos processamentos. Para a coordenada Z (altura), o arranjo com três câmeras obteve resultados melhores em todos os casos.

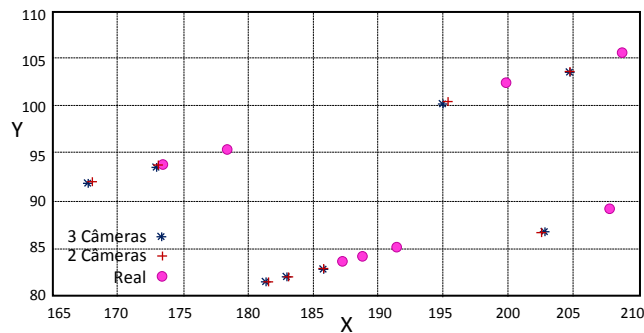
As Figuras 15 e 16 apresentam os pontos de verificação calculados no processamento em lote para ambos os arranjos de câmera.

Figura 15 – Pontos de verificação calculados no processamento em lote – Visto de perfil (trajetória reta)



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 16 – Pontos de verificação calculados no processamento em lote – Visto de cima (trajetória reta)



Fonte: Elaborada pelos autores.

De forma geral, apesar do arranjo de duas câmeras obter menores erros em X e Y, e maiores em Z, o arranjo de três câmeras obteve resultados melhores em relação à resultante das coordenadas, na maioria dos casos. No total, das 36 REMQs calculadas, o arranjo triangular obteve melhores resultados em 58,3% dos casos e o arranjo de duas câmeras em 41,7% dos casos. Se for analisada a resultante, o arranjo triangular obteve melhores resultados em 66,7% dos casos e o arranjo de duas câmeras em 33,3% dos casos. Sendo assim, é possível dizer que a adição de uma terceira câmera, não colinear, ao arranjo contribui para a estimativa das coordenadas-objeto dos pontos.

Em relação aos parâmetros de atitude dos CPs das câmeras, não foi possível realizar um controle da sua estimativa, uma vez que não foram medidos seus POE com alto grau de confiabilidade. Portanto, como análise da sua estimativa foram utilizados os desvios-padrão calculados a partir da matriz de variância-covariância dos parâmetros. No entanto, este não é o melhor método de análise, uma vez que a matriz de variância-covariância é calculada com base na variância a posteriori do processo de ajustamento, sendo que essa variância é dependente da qualidade do ajustamento, o que não necessariamente representa a verdade de campo. Os desvios-padrão obtidos para cada parâmetro nos processamento com duas câmeras são apresentados na Tabela 12 e para três câmeras na Tabela 13.

Tabela 12 – Desvios-padrão dos POE – 2 câmeras (trajetória reta)

| TB | AB | $\omega$   | $\varphi$  | $\kappa$   | X <sub>CP</sub> | Y <sub>CP</sub> | Z <sub>CP</sub> |
|----|----|------------|------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2  | 1  | 1° 25' 30" | 1° 25' 54" | 1° 25' 30" | 0,575           | 0,576           | 0,575           |
| 3  | 1  | 1° 03' 31" | 1° 04' 16" | 1° 03' 31" | 0,430           | 0,436           | 0,436           |
| 4  | 1  | 0° 51' 37" | 0° 52' 49" | 0° 51' 37" | 0,355           | 0,366           | 0,366           |
| 5  | 1  | 0° 43' 22" | 0° 44' 55" | 0° 43' 22" | 0,304           | 0,318           | 0,319           |
| 6  | 1  | 0° 37' 34" | 0° 39' 35" | 0° 37' 34" | 0,271           | 0,289           | 0,289           |
| 7  | 1  | 0° 32' 38" | 0° 34' 54" | 0° 32' 38" | 0,239           | 0,261           | 0,263           |
| 8  | 1  | 0° 29' 45" | 0° 32' 26" | 0° 29' 45" | 0,225           | 0,250           | 0,252           |
| 9  | 1  | 0° 26' 54" | 0° 29' 51" | 0° 26' 54" | 0,208           | 0,235           | 0,237           |
| 10 | 0  | 0° 14' 04" | 0° 15' 30" | 0° 14' 05" | 0,129           | 0,135           | 0,135           |

TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 13 – Desvios-padrão dos POE – 3 câmeras (trajetória reta)

| TB | AB | $\omega$   | $\varphi$  | $\kappa$   | X <sub>CP</sub> | Y <sub>CP</sub> | Z <sub>CP</sub> |
|----|----|------------|------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2  | 1  | 1° 46' 56" | 1° 47' 24" | 1° 46' 56" | 0,717           | 0,720           | 0,720           |
| 3  | 1  | 1° 21' 44" | 1° 22' 43" | 1° 21' 44" | 0,553           | 0,561           | 0,561           |
| 4  | 1  | 1° 06' 28" | 1° 07' 55" | 1° 06' 28" | 0,456           | 0,469           | 0,470           |
| 5  | 1  | 0° 56' 50" | 0° 59' 04" | 0° 56' 50" | 0,402           | 0,420           | 0,420           |
| 6  | 1  | 0° 49' 42" | 0° 52' 24" | 0° 49' 43" | 0,358           | 0,382           | 0,383           |
| 7  | 1  | 0° 43' 08" | 0° 46' 08" | 0° 43' 09" | 0,315           | 0,345           | 0,347           |
| 8  | 1  | 0° 38' 57" | 0° 42' 27" | 0° 38' 57" | 0,294           | 0,327           | 0,329           |
| 9  | 1  | 0° 34' 54" | 0° 38' 43" | 0° 34' 54" | 0,270           | 0,305           | 0,307           |
| 10 | 0  | 0° 18' 02" | 0° 19' 46" | 0° 18' 02" | 0,165           | 0,172           | 0,173           |

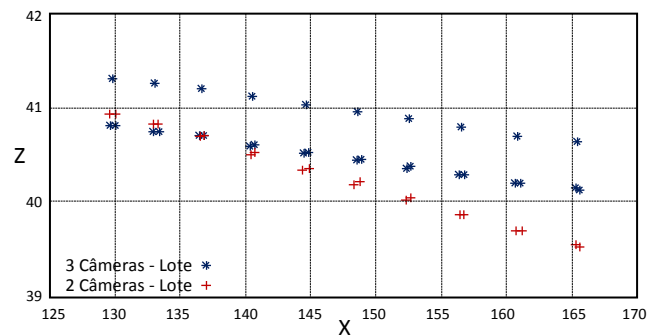
TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base.

Fonte: Elaborada pelos autores.



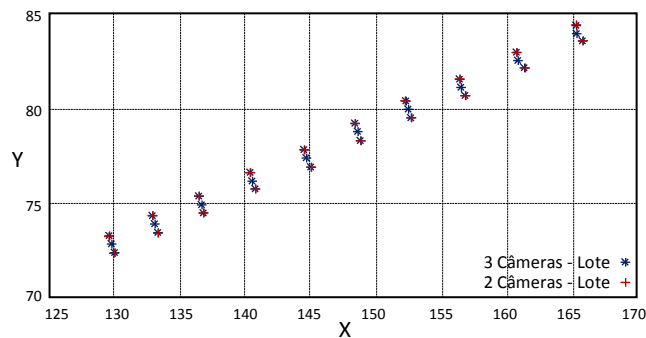
De acordo com a Tabelas 12 e 13, os POE referentes ao arranjo com duas câmeras tiveram maior precisão que os estimados com o arranjo de três câmeras, para todos os processamentos. No entanto, isto não implica que os valores obtidos para os POE sejam mais acurados. Como mostrado na Tabela 11, na maioria dos casos obteve-se melhores estimativas para as coordenadas dos pontos com o arranjo triangular, mesmo que este tivesse menor precisão na determinação dos respectivos POE. Uma explicação para os desvios-padrão serem maiores para os POE do arranjo triangular é a dificuldade de se ajustar geometricamente o bloco de imagens, uma vez que foram utilizadas mais imagens no processo. As Figuras 17 e 18 apresentam as posições dos POE calculados no processamento em lote, para ambos os arranjos de câmeras.

Figura 17 – POE calculados no processamento em lote com vista de perfil (trajetória reta)



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 18 – POE calculados no processamento em lote com vista ortogonal (trajetória reta)



Fonte: Elaborada pelos autores.

### 3.1.2 Análise: Sequencial x Lote e variações do tamanho do bloco e avanço de base

Para realizar a análise do processamento sequencial e do processamento em lote, podem ser utilizados os dados apresentados na Tabela 14, onde estão dispostos os resultados obtidos para ambos os processamentos, e para cada arranjo de câmera.

Tabela 14 – Sequencial x Lote (trajetória reta)

| CAM | TB | AB | SP | REM <sub>Q</sub> (m) |       |       |       |
|-----|----|----|----|----------------------|-------|-------|-------|
|     |    |    |    | X                    | Y     | Z     | R     |
| 2   | 2  | 1  | 9  | 7,553                | 2,719 | 0,970 | 7,926 |
|     | 10 | 0  | 1  | 5,213                | 2,052 | 1,057 | 5,675 |
| 3   | 2  | 1  | 9  | 7,725                | 2,926 | 0,559 | 8,011 |
|     | 10 | 0  | 1  | 5,324                | 2,069 | 0,492 | 5,709 |

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base, SP: seqüências processadas.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Como mostrado na Tabela 14, a triangulação em lote teve melhores resultados quando comparada com a triangulação sequencial para ambos os arranjos de câmeras. Na sequencial os erros de um bloco são propagados para os blocos seguintes, dessa forma, os últimos blocos processados possuem um elevado acúmulo de erro proveniente dos processamentos anteriores. Já na triangulação em lote, os erros são distribuídos de forma mais uniforme para todos os pontos. De forma análoga, o mesmo aconteceu para os resultados dos POE. A Tabela 15 apresenta os desvios-padrão para cada parâmetro de orientação exterior, obtidos a partir da matriz variância-covariância gerada no ajustamento.

Tabela 15 – Desvios-padrão obtidos nos processamentos sequencial e em lote (trajetória reta)

| CAM | TB | AB | $\omega$   | $\varphi$  | $\kappa$   | X <sub>CP</sub> | Y <sub>CP</sub> | Z <sub>CP</sub> |
|-----|----|----|------------|------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2   | 2  | 1  | 1° 25' 30" | 1° 25' 54" | 1° 25' 30" | 0,575           | 0,576           | 0,575           |
|     | 10 | 0  | 0° 14' 04" | 0° 15' 30" | 0° 14' 05" | 0,129           | 0,135           | 0,135           |
| 3   | 2  | 1  | 1° 46' 56" | 1° 47' 24" | 1° 46' 56" | 0,717           | 0,720           | 0,720           |
|     | 10 | 0  | 0° 18' 02" | 0° 19' 46" | 0° 18' 02" | 0,165           | 0,172           | 0,173           |

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os valores dos POE estimados no processamento em lote tiveram desvios-padrão significativamente menores que os estimados no processamento sequencial. Para os desvios-padrão angulares, os valores obtidos no processamento sequencial chegaram a até seis vezes o valor obtido no processamento em lote. Enquanto que para os parâmetros posicionais, essa diferença chegou a aproximadamente quatro vezes o valor do processamento em lote.

Para a análise da influência do tamanho do bloco, podem ser utilizados os dados já apresentados na Tabela 10 (apresentada anteriormente). Conforme aumentou-se o tamanho do bloco de imagens na triangulação, o erro médio obtido para cada coordenada diminuiu. As coordenadas X e Y são as mais afetadas pela variação do tamanho do bloco, sendo que REMQ destas podem reduzir a aproximadamente metade se for comparada a triangulação sequencial de blocos com 2 bases com a triangulação em lote (10 bases).

Em valores absolutos, a coordenada X é a que possui a maior REMQ. Sendo o eixo X o mais próximo do sentido de caminhamento do levantamento, o valor elevado para esta coordenada é mais um indicativo da deficiência na determinação de coordenadas ao longo do eixo perpendicular à base em um caminhamento fotogramétrico. Já o REMQ da coordenada Z é menos sensível à variação do tamanho do bloco e varia muito pouco de caso pra caso. De forma análoga, a média das resultantes das coordenadas também diminuiu com o aumento do bloco, podendo na triangulação em lote chegar a aproximadamente 70,0% do valor obtido na triangulação sequencial com blocos de 2 bases.

Blocos maiores de imagens permitem a distribuição dos erros de maneira mais uniforme e diminuem a propagação de erros de uma base para a outra. Além do tamanho do bloco, a quantidade de blocos processados também contribui para uma melhora do resultado. Os resultados dos processamentos realizados variando o avanço de base são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados obtidos para diferentes avanços de base (trajetória reta)

| CAM | TB | AB | SP | REMQ (m) |       |       |       |
|-----|----|----|----|----------|-------|-------|-------|
|     |    |    |    | X        | Y     | Z     | R     |
| 3   | 4  | 1  | 7  | 6,802    | 2,480 | 0,650 | 7,258 |
| 3   | 4  | 2  | 4  | 6,750    | 2,470 | 0,623 | 7,193 |
| 3   | 4  | 3  | 3  | 6,765    | 2,484 | 0,596 | 7,213 |

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base, SP: sequências processadas.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Ao manter o tamanho do bloco e aumentar o avanço de base, a quantidade de blocos necessários para cobrir toda a área levantada diminuiu. Essa diminuição é positiva, pois reduz a propagação de erro de uma sequência de blocos para a outra. Apesar de contribuir, a variação do avanço de base não é tão significativa quanto a variação do tamanho do bloco para a melhora do resultado final.

### 3.2 Trajetória Curva

Neste experimento foram processadas 10 bases consecutivas tomadas em uma trajetória curva. Como forma de controle para a estimativa das coordenadas dos pontos no espaço objeto, foram utilizados 7 pontos de verificação coletados em campo. A Tabela 17 apresenta as coordenadas-objeto dos pontos de verificação no sistema local.

Tabela 17 – Coordenadas dos pontos de verificação na trajetória curva

| Ponto | X (m)   | Y (m)   | Z (m)  |
|-------|---------|---------|--------|
| V1    | 78,421  | 123,881 | 45,260 |
| V2    | 84,532  | 127,001 | 45,109 |
| V3    | 92,373  | 111,896 | 45,134 |
| V4    | 95,290  | 110,028 | 43,618 |
| V5    | 97,284  | 107,607 | 43,629 |
| V6    | 100,371 | 98,862  | 44,982 |
| V7    | 98,933  | 102,991 | 45,273 |

Fonte: Elaborada pelos autores.

A partir das coordenadas obtidas no levantamento de campo e as calculadas no processamento, foram calculadas as REMQ para cada

coordenada e as médias das resultantes. Os resultados do processamento em lote para o arranjo de duas câmeras estão dispostos na Tabela 18 e suas respectivas REMQ na Tabela 19.

Tabela 18 – Erro obtido para cada coordenada com processamento em lote na trajetória curva (2 câmeras)

| Ponto | Calculada 2C - Lote |         |        | Erro (calculado - real) |        |        |        |
|-------|---------------------|---------|--------|-------------------------|--------|--------|--------|
|       | X (m)               | Y (m)   | Z (m)  | EX (m)                  | EY (m) | EZ (m) | ER (m) |
| V1    | 82,301              | 128,104 | 42,754 | 3,880                   | 4,223  | -2,506 | 6,259  |
| V2    | 88,553              | 130,833 | 42,794 | 4,021                   | 3,832  | -2,315 | 6,018  |
| V3    | 94,959              | 115,263 | 42,423 | 2,586                   | 3,367  | -2,711 | 5,037  |
| V4    | 97,646              | 113,246 | 40,908 | 2,356                   | 3,218  | -2,710 | 4,821  |
| V5    | 99,485              | 111,126 | 40,881 | 2,201                   | 3,519  | -2,748 | 4,978  |
| V6    | 101,808             | 103,156 | 41,922 | 1,437                   | 4,294  | -3,060 | 5,465  |
| V7    | 100,736             | 106,831 | 42,306 | 1,803                   | 3,840  | -2,967 | 5,177  |

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 19 – REMQ das coordenadas com processamento em lote na trajetória curva (2 câmeras)

| REMQ  |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|
| X (m) | Y (m) | Z (m) | R (m) |
| 2,768 | 3,775 | 2,727 | 5,418 |

Fonte: Elaborada pelos autores.

Na Tabela 20 estão as coordenadas calculadas para o processamento em lote com o arranjo triangular e seus respectivos erros (E). As REMQ calculadas para esse processamento estão dispostas na Tabela 21.

Tabela 20 – Erro obtido para cada coordenada com processamento em lote na trajetória curva (3 câmeras)

| Ponto | Calculada 3C - Lote |         |        | Erro (calculado - real) |        |        |        |
|-------|---------------------|---------|--------|-------------------------|--------|--------|--------|
|       | X (m)               | Y (m)   | Z (m)  | EX (m)                  | EY (m) | EZ (m) | ER (m) |
| V1    | 81,722              | 127,921 | 43,495 | 3,301                   | 4,040  | -1,765 | 5,507  |
| V2    | 88,216              | 130,731 | 43,394 | 3,684                   | 3,730  | -1,715 | 5,516  |
| V3    | 94,800              | 115,071 | 42,985 | 2,427                   | 3,175  | -2,149 | 4,538  |
| V4    | 97,547              | 113,122 | 41,426 | 2,257                   | 3,094  | -2,192 | 4,413  |
| V5    | 99,382              | 110,892 | 41,378 | 2,098                   | 3,285  | -2,251 | 4,501  |
| V6    | 101,743             | 102,602 | 42,443 | 1,372                   | 3,740  | -2,539 | 4,724  |
| V7    | 100,660             | 106,441 | 42,830 | 1,727                   | 3,450  | -2,443 | 4,566  |

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 21 – REMQ das coordenadas com processamento em lote na trajetória curva (3 câmeras)

| REMQ  |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|
| X (m) | Y (m) | Z (m) | R (m) |
| 2,527 | 3,517 | 2,170 | 4,844 |

Fonte: Elaborada pelos autores.

### 3.2.1 Análise: 2 x 3 câmeras

A comparação do caminhamento fotogramétrico com duas e três câmeras foi realizada a partir dos resultados obtidos para os processamentos sequencial e em lote para cada arranjo de câmeras. Os resultados obtidos para o processamento do caminhamento fotogramétrico com o arranjo de duas câmeras estão dispostos na Tabela 22, e os resultados do arranjo triangular estão na Tabela 23.

Tabela 22 – Resultados para os processamentos sequencial e em lote com 2 câmeras (trajetória curva)

| CAM | TB | AB | SP | REMQ (m) |       |       |       |
|-----|----|----|----|----------|-------|-------|-------|
|     |    |    |    | X        | Y     | Z     | R     |
| 2   | 2  | 1  | 9  | 5,686    | 7,146 | 2,284 | 9,413 |
| 2   | 3  | 1  | 8  | 5,383    | 7,307 | 2,335 | 9,372 |
| 2   | 4  | 1  | 7  | 5,063    | 7,437 | 2,354 | 9,300 |
| 2   | 10 | 0  | 1  | 2,768    | 3,775 | 2,727 | 5,418 |

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base, SP: seqüências processadas.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 23 – Resultados para os processamentos sequencial e em lote com 3 câmeras (trajetória curva)

| CAM | TB | AB | SP | REMQ (m) |       |       |       |
|-----|----|----|----|----------|-------|-------|-------|
|     |    |    |    | X        | Y     | Z     | R     |
| 3   | 2  | 1  | 9  | 5,747    | 6,832 | 1,821 | 9,112 |
| 3   | 3  | 1  | 8  | 5,649    | 6,730 | 1,895 | 8,989 |
| 3   | 4  | 1  | 7  | 4,989    | 7,216 | 1,933 | 8,983 |
| 3   | 10 | 0  | 1  | 2,527    | 3,517 | 2,170 | 4,844 |

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base, SP: seqüências processadas.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Como é possível verificar nas Tabelas 22 e 23, diferentemente do ocorrido na trajetória reta, alguns processamentos sequenciais perderam convergência nos blocos intermediários da curva. Após uma conferência cuidadosa dos dados a procura de erros grosseiros ou algum ponto fora dos padrões, optou-se por desconsiderar estes dados da análise, uma vez que foi obtido sucesso nos processamentos sequenciais com blocos menores de imagens e no processamento em lote, sendo estes suficientes para avaliar os quesitos propostos. Portanto, a partir dos dados apresentados nas Tabelas 22 e 23, foi possível gerar a Tabela 24, a qual apresenta o arranjo de câmeras com melhor resultado para cada experimento realizado na trajetória curva.

Tabela 24 – Arranjo com o melhor resultado para cada processamento (trajetória curva)

| TB | AB | Arranjo |   |   |   |
|----|----|---------|---|---|---|
|    |    | X       | Y | Z | R |
| 2  | 1  | 2       | 3 | 3 | 3 |
| 3  | 1  | 2       | 3 | 3 | 3 |
| 4  | 1  | 3       | 3 | 3 | 3 |
| 10 | 0  | 3       | 3 | 3 | 3 |

TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base.

Fonte: Elaborada pelos autores.

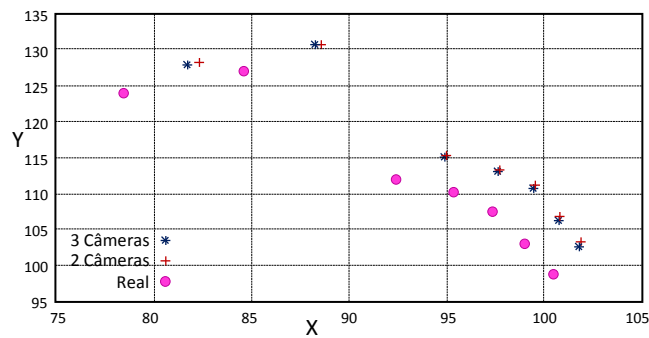
Analisando a Tabela 24, é possível concluir que o arranjo triangular obteve melhores resultados que o arranjo de duas câmeras na trajetória curva, na maioria dos casos. Com relação à coordenada X, o arranjo de duas câmeras obteve resultados melhores nos processamentos sequenciais com tamanho de bloco igual a 2 e 3, enquanto que o arranjo de três câmeras foi melhor nos demais casos. Já nas coordenadas Y e Z, o arranjo triangular gerou resultados melhores para todos os casos, e que conseqüentemente, obteve resultantes menores para cada ponto.

Ao todo, dos 16 valores comparados, o arranjo triangular obteve resultados melhores em 87,5% dos casos, enquanto que o arranjo de duas câmeras em apenas 12,5% dos casos. Analisando somente as resultantes obtidas, o arranjo triangular se provou melhor em 100,0% dos casos. Esta

melhora pode ser atribuída ao fato do aumento de observações para cada ponto, causada pela adição da terceira câmera, de forma que uma maior quantidade de observações permite restringir a variação posicional do ponto no espaço objeto. Sendo o trecho curvo mais propenso a ter variações significativas nos POE, uma maior redundância nas observações é um fator positivo na determinação dos pontos e da OE.

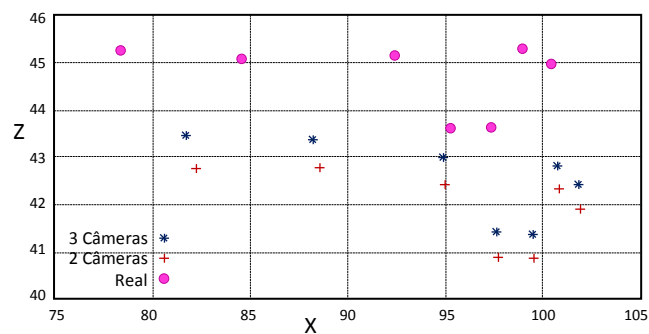
As Figuras 19 e 20 apresentam os POE calculados no processamento em lote, para ambos os arranjos de câmera.

Figura 19 – Pontos de verificação calculados no processamento em lote – Visto de cima (trajetória curva)



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 20 – Pontos de verificação calculados no processamento em lote – Visto de Perfil (trajetória curva)



Fonte: Elaborada pelos autores.



Os desvios-padrão obtidos para cada POE nos processamentos com o arranjo de duas câmeras são apresentados na Tabela 25, e os valores para os processamentos com três câmeras são apresentados na Tabela 26.

Tabela 25 – Desvios-padrão dos POE – 2 câmeras (trajetória curva)

| TB | AB | $\omega$   | $\varphi$  | $\kappa$   | X <sub>CP</sub> | Y <sub>CP</sub> | Z <sub>CP</sub> |
|----|----|------------|------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2  | 1  | 1° 57' 10" | 1° 57' 17" | 1° 57' 09" | 0,782           | 0,783           | 0,783           |
| 3  | 1  | 1° 30' 13" | 1° 30' 30" | 1° 30' 11" | 0,605           | 0,606           | 0,607           |
| 4  | 1  | 1° 16' 22" | 1° 16' 41" | 1° 16' 16" | 0,515           | 0,515           | 0,517           |
| 10 | 0  | 0° 25' 40" | 0° 26' 49" | 0° 25' 16" | 0,222           | 0,230           | 0,219           |

TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 26 – Desvios-padrão dos POE – 3 câmeras (trajetória curva)

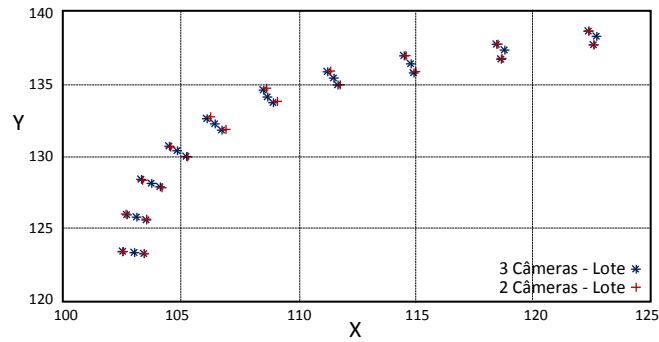
| TB | AB | $\omega$   | $\varphi$  | $\kappa$   | X <sub>CP</sub> | Y <sub>CP</sub> | Z <sub>CP</sub> |
|----|----|------------|------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2  | 1  | 2° 07' 30" | 2° 07' 39" | 2° 07' 29" | 0,852           | 0,852           | 0,852           |
| 3  | 1  | 1° 42' 13" | 1° 42' 31" | 1° 42' 11" | 0,686           | 0,686           | 0,687           |
| 4  | 1  | 1° 26' 28" | 1° 26' 55" | 1° 26' 22" | 0,583           | 0,585           | 0,586           |
| 10 | 0  | 0° 25' 21" | 0° 26' 32" | 0° 25' 00" | 0,220           | 0,229           | 0,216           |

TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base.

Fonte: Elaborada pelos autores.

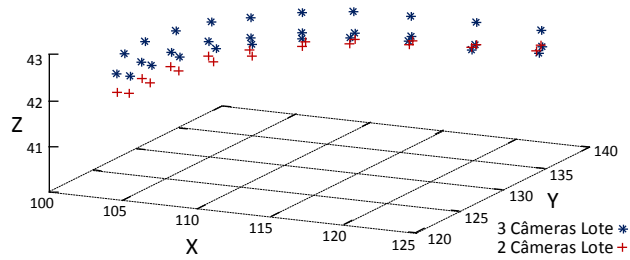
De acordo com as Tabelas 25 e 26, os POE obtidos no processamento sequencial tiveram maior precisão quando utilizado o arranjo com duas câmeras. Em contrapartida, no processamento em lote, os POE obtidos com o arranjo de duas câmeras tiveram precisão inferior aos obtidos pelo arranjo triangular. Analogamente ao experimento realizado na trajetória reta, a menor precisão dos POE estimados não resultou na direta melhora da precisão posicional dos pontos de verificação. As Figuras 21 e 22 mostram os POE calculados no processamento em lote, para ambos os arranjos de câmeras.

Figura 21 – POE calculados no processamento em lote – Visto de cima (trajetória curva)



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 22 – Pontos de verificação calculados no processamento em lote – Visto tridimensionalmente (trajetória curva)



Fonte: Elaborada pelos autores.

### 3.2.2 Análise: Sequencial x Lote e variações do tamanho do bloco e avanço de base

Para a análise do processamento sequencial e em lote em uma trajetória curva, foram utilizados os dados apresentados na Tabela 27, tais quais obtidos para ambos os processamentos e para cada arranjo de câmeras.

Tabela 27 – Sequencial x Lote (trajetória curva)

| CAM | TB | AB | SP | REMQU (m) |       |       |       |
|-----|----|----|----|-----------|-------|-------|-------|
|     |    |    |    | X         | Y     | Z     | R     |
| 2   | 2  | 1  | 9  | 5,686     | 7,146 | 2,284 | 9,413 |
|     | 10 | 0  | 1  | 2,768     | 3,775 | 2,727 | 5,418 |
| 3   | 2  | 1  | 9  | 5,747     | 6,832 | 1,821 | 9,112 |
|     | 10 | 0  | 1  | 2,527     | 3,517 | 2,170 | 4,844 |

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base, SP: sequências processadas.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 27, os resultados para os processamentos sequencial e em lote em uma trajetória curva foram análogos aos resultados obtidos para a trajetória reta, ou seja, o processamento em lote obteve melhores resultados para ambos os arranjos de câmeras. Mais uma vez, a propagação de erros de um bloco para seus subsequentes acabou resultando em baixa precisão para as estimativas dos blocos finais, tanto que, algumas combinações do processamento sequencial foram sequer capazes de processar o trajeto por completo.

Similarmente às precisões dos pontos de verificação, estão as precisões obtidas para os POE nos processamentos sequencial e em lote. De modo geral, os desvios-padrão obtidos no processamento em lote são relativamente bem menores que os obtidos no processamento sequencial. A Tabela 28 apresenta os desvios-padrão obtidos para cada POE.

Tabela 28 – Precisão dos POE obtidos nos processamentos sequencial e em lote

| CAM | TB | AB | $\omega$   | $\varphi$  | $\kappa$   | $X_{CP}$ | $Y_{CP}$ | $Z_{CP}$ |
|-----|----|----|------------|------------|------------|----------|----------|----------|
| 2   | 2  | 1  | 1° 57' 10" | 1° 57' 17" | 1° 57' 09" | 0,782    | 0,783    | 0,783    |
|     | 10 | 0  | 0° 25' 40" | 0° 26' 49" | 0° 25' 16" | 0,222    | 0,230    | 0,219    |
| 3   | 2  | 1  | 2° 07' 30" | 2° 07' 39" | 2° 07' 29" | 0,852    | 0,852    | 0,852    |
|     | 10 | 0  | 0° 25' 21" | 0° 26' 32" | 0° 25' 00" | 0,220    | 0,229    | 0,216    |

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

Analisando a Tabela 28, conclui-se que em termos angulares, os valores obtidos no processamento sequencial chegaram a até cinco vezes o valor obtido no processamento em lote. Entretanto, essa diferença pode

chegar a quatro vezes o valor do processamento em lote no caso dos parâmetros de posição.

Para se analisar a influência do tamanho do bloco na determinação das coordenadas dos pontos no espaço objeto, foram utilizados os dados dos processamentos sequenciais já apresentados anteriormente na Tabela 23. Analisando essa tabela, apesar de não possuir todas as possíveis combinações de tamanho do bloco, é possível concluir que a precisão dos pontos de verificação aumenta de acordo com o também aumento do tamanho do bloco. Assim como no trecho reto, para o trecho em curva, as coordenadas que foram mais afetadas pela variação do tamanho do bloco foram as coordenadas X e Y. Nestas coordenadas, os valores de REMQ obtidos para o processamento sequencial com menor tamanho de bloco foram em torno de duas vezes maiores se comparados com os valores obtidos do processamento com o maior tamanho de bloco possível (lote). Porém, para a coordenada Z, o mesmo não se aplica, nesta coordenada ocorreu um aumento do REMQ quando processadas as imagens em lote, entretanto, este aumento foi relativamente pequeno se comparado com os valores para X e Y. Assim como para X e Y, os valores das resultantes também foram menores no processamento em lote, em torno de até 50,0% dos valores do processamento sequencial.

Semelhantemente ao aumento do tamanho do bloco no processamento sequencial, a variação do avanço de base não resultou em bons processamentos dos dados. Para o trecho em curva, só foi possível completar o caminhamento fotogramétrico quando utilizados avanços de base unitários. As demais combinações de processamentos com avanços de bases variados resultaram na não convergência do ajustamento da fototriangulação. Sendo assim, não foi possível analisar a influência da variação do avanço de base para o caminhamento fotogramétrico em trecho curvo.

## 4 Conclusões

Neste trabalho foi utilizado um sistema de baixo custo, e conseqüentemente, de pouca precisão para realizar o mapeamento no entorno de uma quadra urbana, em trechos retos e curvos. Com o sensor GNSS utilizado, apesar de possuir pouca precisão, foi possível obter os parâmetros posicionais do sistema para os objetivos deste trabalho. Além disto, com os dados do sensor GNSS foi possível calcular parâmetros de atitude aproximados, o que acabou compensando, em parte, a ausência do sensor inercial.

A utilização de um par de câmeras em um SMM apresenta deficiência na determinação das coordenadas-objeto dos pontos. O objetivo principal deste trabalho foi estudar a influência da adição de uma terceira câmera ao sistema, de modo a formar um arranjo coplanar triangular de câmeras. O arranjo triangular teve como objetivo aumentar a redundância de raios homólogos por pontos, de modo atenuar a propagação dos erros no bloco.

Os experimentos mostraram que de fato a adição da terceira câmera ao arranjo contribuiu para a determinação das coordenadas dos pontos de enlace no espaço objeto. Houve uma melhora perceptível para a trajetória curva, em que foi verificada em 100,0% dos casos, enquanto que na trajetória reta foi de 66,7%. Analisando cada coordenada isoladamente, o arranjo triangular obteve melhores resultados para as coordenadas Y e Z na trajetória curva e para Z na trajetória reta. O arranjo com duas câmeras obteve resultados ligeiramente melhores para a coordenada Y no trecho reto. Nos demais casos, houve um equilíbrio entre os resultados dos dois arranjos.

A principal contribuição deste trabalho não está diretamente ligada à precisão, uma vez que o SMM foi montado objetivando o baixo custo. A contribuição está em comprovar que o método automatizado desenvolvido neste trabalho utilizando três câmeras funciona adequadamente para os objetivos propostos neste trabalho.

Para melhorar os resultados apresentados neste trabalho, faz-se necessário um investimento financeiro no sistema de mapeamento para substituir o sensor GNSS de baixo custo por um sensor GNSS de alta precisão posicional (da ordem de centímetros). A inclusão de um inercial nível tático determinaria os parâmetros de orientação exterior (POE) da plataforma sem a necessidade de ser estimada no decorrer do caminhamento fotogramétrico. Esses sensores de alta precisão, integrados ao SMM, produziriam dados mais confiáveis com a realidade, e uma grande melhora nos resultados.

## Referências

- BARBOSA, R. L. **Caminhamento fotogramétrico utilizando o fluxo óptico filtrado**. Tese de doutoramento. Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2006.
- BLASECHI, V. **Caminhamento fotogramétrico com arranjo triangular de câmaras fotográficas**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2016. 86p.
- BOSSLER, J. D.; GOAD, C.; JOHNSON, P.; NOVAK, K. GPS and GIS Map the Nation's Highways. **GeoInfo Systems Magazine**, March, 1991, pp. 26-37.
- BROWN, D. C. Close-range camera calibration. **Photogrammetric Engineering**, vol. 37, n. 8, 1971, pp. 855-866.
- FISCHLER, M. A.; BOLLES, R. C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image. Analysis and Automated Cartography. **Communications of the ACM**, vol. 24, n. 6, 1981, pp. 381-395.
- FRYER, J. G. **Camera Calibration. Close Range Photogrammetry and Machine Vision**. Whittler Publishing: Caithness, Scotland, UK, 1996, pp. 156–179.
- GHOSH, S. K. **Fundamentals of computational photogrammetry**. [S.l.]: Concept Publishing Company, 2005. 254 p.

- HELMERT, F. R. **Theorieen der Höheren Geodäsie**. Teubner: Leipzig, 1880. 377 p.
- LEMES NETO, M. C. **Orientação semi-automática de uma sequência de pares de imagens frontais por fototriangulação a partir de fotocoordenadas extraídas pelo SIFT**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, 2014. 114p.
- LOWE, D. G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, **Springer**, vol. 60, n. 2, 2004, pp. 91-110.
- OLIVEIRA, E. B. **Implementação do módulo de Interseção Fotogramétrica em um Banco de Imagens Georreferenciadas**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2003. 112p.
- RUY, R. S.; TOMMASELLI, A. G.; HASEGAWA, J. K.; GALO, M.; IMAI, N. N.; CAMARGO, P. O. SAAPI: a lightweight airborne image acquisition system: design and preliminary tests. **Proceedings of 7th Geomatic Week—High resolution sensors and their applications**, Barcelona, 2007, pp. 1-8.
- SILVA, J. F. C. **Fototriangulação no Caminhamento Fotogramétrico. Tese de livre docência**. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 1997. 85p.
- SILVA, J. F. C.; OLIVEIRA, R. Triangulation of a Sequence of Terrestrial Digital Images. **Proceedings of the International Symposium of Data Integration: Systems and Techniques**, Cambridge, UK, ISPRS, 1998, pp. 273-277.
- SILVA, J. F. C.; CAMARGO, P. O.; OLIVEIRA, R. A.; GALLIS, R. B. A.; GUARDIA, M. C.; REISS, M. L. L.; SILVA, R. A. C. A Street Map built by a Mobile Mapping System. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 33, 2000, pp. 510-517.
- SILVA, J. F. C.; CAMARGO, P. O.; GALLIS, R. B. A.; GUARDIA, M. C.; REISS, M. L. L.; SILVA, R. A. C. Mapeamento de Ruas com um Sistema Móvel de Mapeamento Digital. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, vol. 53, 2001, pp. 82-91.

- SILVA, S. L. A.; TOMMASELLI, A. M. G.; ARTERO, A. O. Utilização de alvos codificados do tipo ArUco na automação do processo de Calibração de Câmaras. **Boletim de Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná**, Centro Politécnico, vol. 20, n. 3, 2014, pp. 626-646.
- TAO, C. V.; LI, J. **Advances in Mobile Mapping Technology**. London: ISPRS Book Series, Taylor & Francis Group, vol. 4, 2007.
- WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry with applications in GIS**, 3<sup>a</sup> ed. Boston: McGraw-Hill, 2000. 608p.