



VICTOR BLASECHI

**CAMINHAMENTO FOTOGRAMÉTRICO COM ARRANJO TRIANGULAR DE
CÂMARAS FOTOGRÁFICAS**



VICTOR BLASECHI

**CAMINHAMENTO FOTOGRAMÉTRICO COM ARRANJO TRIANGULAR DE
CÂMARAS FOTOGRÁFICAS**



Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. João Fernando Custódio da Silva

FICHA CATALOGRÁFICA

B579c Blasechi, Victor.
Caminhamento fotogramétrico com arranjo triangular de câmaras /
Victor Blasechi. - Presidente Prudente : [s.n], 2016
86 f.

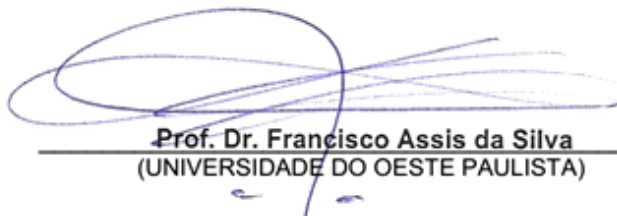
Orientador: João Fernando Custódio da Silva
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. Caminhamento Fotogramétrico. 2. Detecção de erros grosseiros. 3.
fototriangulação sequencial. I. Blasechi, Victor. II. Silva, João Fernando
Custódio da. III. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e
Tecnologia. IV. Caminhamento fotogramétrico com arranjo triangular de
câmaras.

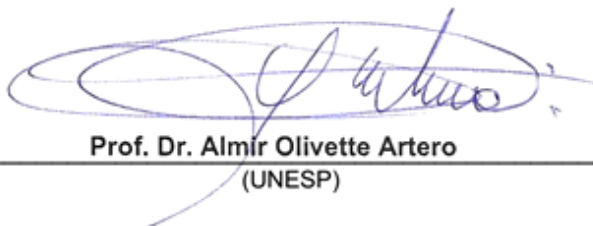
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. João Fernando Custodio Silva
(ORIENTADOR)



Prof. Dr. Francisco Assis da Silva
(UNIVERSIDADE DO OESTE PAULISTA)



Prof. Dr. Almir Olivette Artero
(UNESP)

Victor Blaschi
VICTOR BLASECHI

Presidente Prudente (SP), 15 de fevereiro de 2016.

Resultado: APROVADO

Dedico este trabalho aos meus pais, Cleide e Ademar, e à minha companheira Vanessa, que me apoiaram incondicionalmente em minhas escolhas, sem as quais o resultado deste trabalho não seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor João Fernando Custódio da Silva, primeiramente por acreditar e estimular minha busca por conhecimento e também pela orientação de mestrado, profissional e de vida.

Ao professor Antônio Maria Garcia Tommaselli, por ter me incentivado a buscar, pesquisar, entender e desenvolver o conhecimento científico.

Ao professor, Júlio Kiyoshi Hasegawa pelo aprendizado no estágio de docência bem como no grande apoio durante o desenvolvimento de aplicações práticas deste trabalho.

A todos os professores do programa de pós-graduação em Ciências Cartográficas.

Ao meu amigo Maurício, pela parceria, cooperação e crescimento mútuo nos estudos do caminhamento fotogramétrico.

Aos meus amigos Édico e Marcus, pelo apoio na experimentação e grandes ajudas.

Aos meus amigos discentes do PPGCC, que juntos pudemos superar muitos desafios podendo contar com grande apoio de bom coração.

À CAPES, pela bolsa de estudos, sem a qual provavelmente eu não teria conseguido me manter no PPGCC.

“A persistência é o caminho do êxito”

Charles Chaplin

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Elementos presentes nas aplicações de mapeamento móvel (Adaptado de: EL-SHEIMY, 2005).	15
Figura 2: Levantamento fotogramétrico utilizando SLAM. (Fonte: <i>Robust Robotics Group – MIT</i>)	18
Figura 3: Exemplo de caminhamento fotogramétrico (Adaptado de SILVA, 1997).	19
Figura 4: Processamento sequencial da fototriangulação.....	26
Figura 5: Resolução angular para duas câmaras com distâncias focais diferentes.....	31
Figura 6: Descrição das posições das câmaras e disposição dos pontos no espaço-objeto. Fonte: FÖRSTNER, 1985.	32
Figura 7: Influência de observações adicionais para a força da geometria. Fonte: (FÖRSTNER, 1985).	34
Figura 8: Influência de observações adicionais em uma geometria fraca. Fonte: FÖRSTNER, 1985.	35
Figura 9: Influência de observações adicionais em uma geometria forte. Fonte: FÖRSTNER, 1985.	35
Figura 10: Relatório de ajustamento emitido pelo programa de fototriangulação.	44
Figura 11: Sistema de coordenadas fotogramétrico.	46
Figura 12: Sistema de coordenadas de imagem digital.	47
Figura 13: Ilustração do ambiente simulado e o sistema de coordenadas local.	47
Figura 14: Arranjo de câmaras em formação triangular.....	48
Figura 15: Paralelepípedos de recobrimento.	48
Figura 16: Recobrimento horizontal.....	50
Figura 17: Perda de área útil de recobrimento.....	53
Figura 18: Distribuição das estações ao longo do logradouro em um percurso em linha reta.	54
Figura 19: Ilustração do perfil a ser descrito no ambiente simulado.....	56
Figura 20: Distribuição dos pontos ao longo do logradouro.	56
Figura 21: Pontos simulados em uma imagem digital.....	57
Figura 22: Processamento em lote (a) e sequencial (b) – Erro médio quadrático entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas das estações de exposição ao longo do percurso.	62
Figura 23: Processamento em lote - Discrepâncias entre as posições verdadeiras e ajustadas das estações de exposição no espaço-objeto (a) projetadas sobre o plano horizontal XY.	63
Figura 24: Processamento em lote e sequencial – Erro médio quadrático entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas dos pontos de enlace ao longo do percurso.	64
Figura 25: Processamento em lote - Discrepâncias entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas dos pontos de enlace no espaço-objeto (a) projetadas sobre o plano horizontal XY e (b) sobre o plano vertical YZ.....	65

Figura 26: Processamento sequencial - Discrepâncias entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas dos pontos de enlace no espaço-objeto (a) projetadas sobre o plano horizontal XY e (b) sobre o plano vertical YZ.....	65
Figura 27: Processamento com janelas de quatro (a) e dois (b) eventos e avanço de base de 1 evento – Erro médio quadrático entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas estações de exposição ao longo do percurso.....	67
Figura 28: Processamento com janelas de 4 eventos e avanço de base de dois (a) e (b) eventos – Erro médio quadrático entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas estações de exposição ao longo do percurso.	69
Figura 29: Processamento com câmaras com distância focal de 18 mm e 45 mm – Erro médio quadrático entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas estações de exposição ao longo do percurso.	71
Figura 30: Processamento com câmaras com distância focal de 18 mm - Discrepâncias entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas dos pontos de enlace no espaço-objeto (a) projetadas sobre o plano horizontal XY e (b) sobre o plano vertical YZ.	72
Figura 31: Processamento com câmaras com distância focal de 45 mm - Discrepâncias entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas dos pontos de enlace no espaço-objeto (a) projetadas sobre o plano horizontal XY e (b) sobre o plano vertical YZ.	72
Figura 32: Processamento com arranjo de câmaras com base de um (a) e dois (b) metros – Erro médio quadrático entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas das estações de exposição ao longo do percurso.	74
Figura 33: Processamento com arranjo de câmaras com base de 1 metro - Discrepâncias entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas dos pontos de enlace no espaço-objeto (a) projetadas sobre o plano horizontal XY e (b) sobre o plano vertical YZ.	75
Figura 34: Processamento com arranjo de câmaras com base de 2 metros - Discrepâncias entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas dos pontos de enlace no espaço-objeto (a) projetadas sobre o plano horizontal XY e (b) sobre o plano vertical YZ.	75
Figura 35: Processamento com arranjo triangular de câmaras – Erro médio quadrático entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas estações de exposição ao longo do percurso.....	78
Figura 36: Posições das estações de exposição no percurso sinuoso.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coordenadas Y inicial, final e profundidade calculadas para paralelepípedo mapeado.....	51
Tabela 2: Precisoões esperadas sobre nas profundidades inicial e final do bloco.....	52
Tabela 3: relatório do processamento em lote.	61
Tabela 4: EMQ das estações de Exposição no experimento de ajustamento em lote e sequencial.	62
Tabela 5: EMQ dos pontos de enlace do experimento com processamento em lote e sequencial.	63
Tabela 6: EMQ dos parâmetros das estações de exposição do experimento com janelas de processamento diferentes.....	66
Tabela 7: EMQ dos pontos de enlace do experimento com janelas de processamento diferentes.	67
Tabela 8: EMQ das estações de exposição do experimento com avanço de bases diferentes.	68
Tabela 9: EMQ dos pontos de enlace do experimento com avanço de bases diferentes.....	69
Tabela 10: EMQ das estações de exposição do experimento com câmaras de diferentes distâncias focais.....	70
Tabela 11: EMQ dos pontos de enlace do experimento com diferentes distâncias focais.	71
Tabela 12: EMQ dos pontos de enlace do experimento diferentes distâncias de base.....	73
Tabela 13: EMQ dos pontos de enlace do experimento diferentes distâncias de base.....	74
Tabela 14: EMQ das estações de exposição do experimento com câmaras de diferentes distanciamentos entre tomadas de fotografia subsequentes.	76
Tabela 15: EMQ dos pontos de enlace do experimento com diferentes distanciamentos entre tomadas de fotografia subsequentes.	76
Tabela 16: EMQ das estações de exposição do experimento com percurso aleatório.	79
Tabela 17: EMQ dos pontos de enlace do experimento com percurso aleatório.	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CF: Caminhamento Fotogramétrico

CP: Centro Perspectivo

EMQ: Erro Médio Quadrático

FT: Fototriangulação

GNSS: *Global Navigation Satellite system*

GPS: *Global Positioning System*

MMQ: Método dos Mínimos Quadrados

MVC: Matriz Variância-Covariância

OE: Orientação Exterior

OI: Orientação Interior

OR: Orientação Relativa

POE: Parâmetros de Orientação Exterior

POI: Parâmetros de Orientação Interior

PVA: Posição, Velocidade e Atitude

SLAM: *Simultaneous Locating And Mapping*

SMM: Sistema de Mapeamento Móvel

SMMT: Sistema de Mapeamento Móvel Terrestre

RESUMO

Os sistemas de mapeamento móvel (SMM) podem ser definidos como um conjunto de sensores instalados sobre uma mesma plataforma com o intuito de obter informação espacial. Estes sensores têm função de imageamento ou orientação. A orientação integrada utilizando a fototriangulação pode ser empregada tanto na extração de informações espaciais quanto para a orientação do SMM. No mapeamento móvel terrestre, o caminhamento fotogramétrico (CF), é um modo especial de levantamento utilizando pares estereoscópicos para determinar as orientações e coordenadas tridimensionais de pontos do terreno. No CF, um mesmo ponto pode ser visto por um par de imagens ou por quantas for possível. Esta característica, entretanto, não garante que erros grosseiros sejam detectados em todas as direções. A introdução de uma terceira câmara que não forme uma geometria coplanar (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. Os principais objetivos deste trabalho são mostrar a contribuição da terceira câmara para a qualidade da fototriangulação, encontrar uma situação ótima de trabalho para este arranjo e mostrar que a orientação obtida no processamento sequencial da fototriangulação pode ser utilizada como um sensor de *dead-reckoning*. Isto é feito através de 9 experimentos, em que são analisadas as características de processamento, geometria e controlabilidade de erros grosseiros. Em todos os experimentos, a determinação da orientação exterior é precisa. Os erros nos pontos de enlace são bem maiores e se propagam na direção do caminhamento. A comparação entre processamento em lote com o sequencial mostra que o processamento em lote pode ser menos oneroso do que o sequencial quando se tem poucas observações, mesmo tendo mais iterações. A controlabilidade é maior no processamento em lote, sendo que a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos de enlace é mais acurada. Maiores janelas de processamento resultam em maior qualidade na orientação, mas não afetam os pontos de enlace. A quantidade de avanços de base não afeta a qualidade. O aumento da distância focal resulta em melhora na estimativa da trajetória no sentido do caminhamento, mas reduz o ângulo de abertura, diminuindo o campo de visão. Uma maior distância focal melhora a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos de enlace proporcionalmente ao aumento da distância focal. Aumentando-se o espaçamento entre as câmaras do arranjo, aumenta-se a qualidade do posicionamento das câmaras no sentido do levantamento, bem como a acurácia das coordenadas dos pontos de enlace, mas torna-se mais difícil a correspondência intra-imagens de feições próximas às câmaras. O distanciamento entre estações de exposição subsequentes não afeta a qualidade da fototriangulação, mas pode dificultar a correspondência de imagens. Na comparação com o arranjo formado por um par estereoscópico, o arranjo triangular permitiu a detecção-localização-tratamento do erro introduzido, enquanto que o par estereoscópico perde convergência já nas primeiras janelas de processamento. Um percurso sinuoso tende a reduzir a acurácia, mas mesmo assim, o programa mostrou conseguir processar toda a sequência.

Palavras-chave: Caminhamento Fotogramétrico, Detecção de erros grosseiros, fototriangulação sequencial, mapeamento móvel.

ABSTRACT

The Mobile Mapping Systems (MMS) can be defined as a set of sensors embedded on a common platform in order to get spatial information. These sensors are used for imaging or orientation. The integrated orientation using phototriangulation can be employed on both spatial information extracting and MMS orientation. On terrestrial mobile mapping, the photogrammetric bridge (PB) is a special mode of surveying that uses stereopairs to determine the orientation and tridimensional points on terrain. On PB, a point can be viewed by one pair of images or as many as possible images. This characteristic, however, do not ensure that blunders can be detected for all directions. Introducing a third camera having a non-coplanar geometry (based on the epipolar plane) allows a quality improvement of the photogrammetric network determination, formed by the object-space points and exposure stations. The main objectives of this work are showing the third camera contribution for the phototriangulation quality, find an optimal working situation for this set and show that the orientation obtained on the sequential phototriangulation processing can be used as a dead-reckoning sensor. This is done through nine experiments by which are analyzed processing characteristics, geometry and controllability of blunders. On all experiments, the exterior orientation determination is precise. The tiepoints errors are larger and propagates on the moving direction of the platform. The comparison between batch and sequential processing shows that the batch can be less onerous than sequential when it has few observations, even though it costs more iterations. The controllability is better on the batch processing and the tiepoints tridimensional coordinates determination is more accurate. Bigger processing windows results in more quality on the orientation, but do not affect the tiepoints determination. The dimension of base lift does not affects the quality. A rise of the focal length results on improvement of the trajectory estimation in the movement direction, but reduces the aperture angle, decreasing the field of view. A bigger focal length improves the tiepoints tridimensional coordinates determination proportionally to the rising of focal length. When rising the distance between cameras of the arrange, the positioning quality of the cameras rises in the movement direction as well the tiepoints accuracy, but it turns intra-images matching more difficult for close features. The distance between subsequent exposure stations does not affects the phototriangulations quality, but image matching tends to be more difficult. Comparing with arrange formed by a stereopair, the triangular arrange allowed a detecting-localization-treatment of an intentionally introduced blunder, while the stereopair lost convergence on the early processing windows. A sinuous trajectory tends to reduce the accuracy, but even so, the program had success on processing the whole sequence.

Key-words: Photogrammetric Bridging. Blunder Detection, Sequential Phototriangulation, Mobile Mapping.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Sistemas de Mapeamento Móvel	15
1.2	Caminhamento Fotogramétrico	18
1.3	Arranjo Triangular de Câmaras.....	19
1.4	Objetivos.....	20
1.4.1	Objetivos Gerais	20
1.4.2	Objetivos Específicos	20
1.5	Estrutura do Trabalho	21
2	FOTOTRIANGULAÇÃO	22
2.1	Modelo Matemático	22
2.2	Modo de Processamento.....	24
3	SISTEMAS REDUNDANTES E DETECÇÃO DE ERROS GROSSEIROS...27	
3.1	A Influência da Geometria.....	27
3.2	Números de Redundância	32
3.3	Confiabilidade Externa	35
3.4	Deteção, Localização e Tratamento do Erro	37
4	MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1	Elaboração de Programa para o Processamento do Caminhamento Fotogramétrico.....	42
4.2	Simulação de Caminhamento Fotogramétrico	45
4.2.1	Definição dos Sistemas de Coordenadas Envolvidos.....	45
4.2.2	Delimitação da Área de Interesse e Planejamento do Levantamento.....	48
4.2.3	Simulação do Ambiente e Distribuição de Pontos de Coordenadas Conhecidas	54
5	EXPERIMENTOS.....	59
5.1	Processamento em Lote Versus Sequencial	59
5.2	Tamanho de Janelas de Processamento	65
5.3	Quantidade de Avanços de Base	68
5.4	Distância Focal das Câmaras	70
5.5	Distanciamento Entre Câmaras no Arranjo	73
5.6	Distanciamento Entre Tomadas de Fotografias	76
5.7	Arranjo Triangular Versus Par Estereoscópico	77

5.8	Introdução de Erros Grosseiros nas Observações.....	77
5.9	Percurso Aleatório.....	78
5.10	Discussão	79
6	CONCLUSÕES.....	81
7	REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

1.1 Sistemas de Mapeamento Móvel

O mapeamento móvel é um tipo de levantamento de informações espaciais em que são usados sensores integrados embarcados sobre uma plataforma móvel. Estes sistemas são desenvolvidos de forma a atender problemas específicos (SHEIMY, 2005). Eles são definidos por alguns autores como Habib e Grejner-Brzezinska como sendo plataformas móveis que integram um conjunto de sensores de imagem, posição, velocidade e atitude (PVA), que, sincronizados, se destinam à coleta de informações espaciais. Estes tipos de sensores são ilustrados na figura 1, em que (a) são os sensores de imageamento, (b) são os sensores voltados à determinação de posicionamento e atitude, embarcados nas plataformas (c).

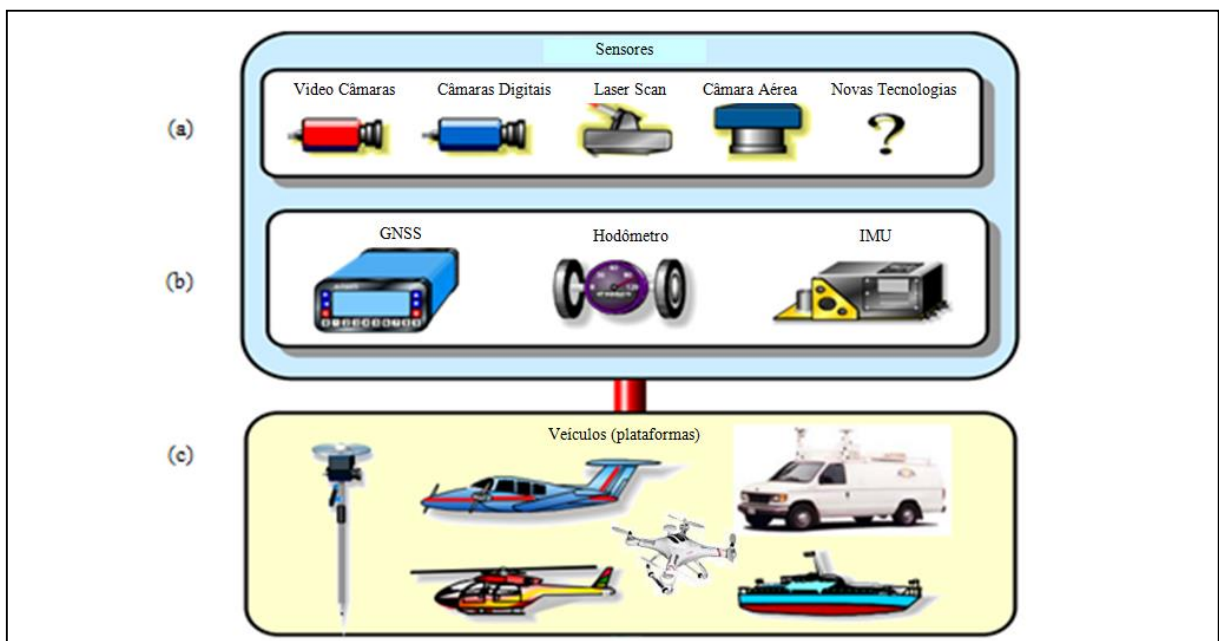


Figura 1: Elementos presentes nas aplicações de mapeamento móvel (Adaptado de: EL-SHEIMY, 2005).

Os conceitos em que se baseia o mapeamento móvel surgiram de temas como levantamento cinemático, mapeamento dinâmico e mapeamento com veículos. Eles começaram a surgir na literatura no final da década de 1980 (Tao, Chapman, & Chaplin, 2007).

Os sensores dividem-se de acordo com seus papéis no processo de aquisição de dados espaciais podendo atuar na extração de informações espaciais nos quais se incluem os

sensores imageadores (câmaras em geral e scanners a laser) mostrados na figura 1-a, ou na determinação da orientação da plataforma, como é o caso de sensores de navegação, dos quais o uso predominante é do conjunto integrando o sistema de posicionamento por satélite (GNSS – *Global Navigation Satellite System*) com navegação inercial (IMU – *Inertial Measurement Unit*) mostrados na figura 1-b. Todos eles são montados em plataformas que podem ser desde aviões, helicópteros, veículos aéreos não tripulados (VANT), veículos terrestres e aquáticos, ou até mesmo pessoas (figura 1-c).

Segundo Silva (1997), os sistemas de mapeamento móvel (SMM) são concebidos para funcionarem especificamente em um determinado meio, de acordo com as características almejadas para determinado tipo de mapeamento. Nos casos em que as regiões a serem levantadas são amplas, sistemas orbitais, aviões ou VANT costumam ser as plataformas dos SMM. Existem também aplicações em que o ambiente a ser mapeado é constituído entorno do veículo. Este é o caso do sistema de mapeamento móvel terrestre (SMMT), que apesar do nome, pode incluir meios de locomoção aquáticos marítimos e fluviais.

Em resumo, estes sistemas são feitos para georreferenciar câmaras fotogramétricas ou *laser scanners* no momento da coleta de informações espaciais. No caso das câmaras, além da orientação exterior direta (geralmente provida pelo sistema composto por IMU e GPS), é possível também a orientação indireta e a integrada (BLÁZQUEZ & COLOMINA, 2012). A orientação exterior direta de uma ou mais câmaras é determinada pelos sensores posicionais unicamente. Isso não ocorre na forma indireta, que depende de pontos de controle no espaço-objeto para a orientação das câmaras. A integração das duas soluções costuma render melhores resultados. Nos SMM, em geral, é empregado o georreferenciamento direto, mas sem excluir a possibilidade de uso de pontos de controle externos.

Além da melhoria de qualidade conseguida por meio da integração de sensores diversos (que é em grande parte, conseguida pela redundância de observações/informações oriundas de hodômetros, bússolas, barômetros, etc.), há a possibilidade de se fazer uso da fotogrametria, tornando as câmaras sensores atuantes no posicionamento. Em sistemas já implementados com orientação direta, elas podem ser úteis como sensores substitutos ou de emergência em casos de falha. Independente do tipo de SMM, isto torna mais robusto, adjetivo que indica: rigidez, solidez, firmeza. No contexto deste trabalho, um sistema robusto é tido como aquele que não falha, ou que, quando falha, avisa o usuário quando a informação produzida não é confiável, pois o sistema é imune a observações anômalas. Isto pode ser

realizado utilizando-se a orientação exterior obtida a partir de uma fototriangulação como se fosse um sensor de *dead-reckoning*.

O *dead-reckoning* funciona a partir de um processo de determinação de uma posição atual a partir do conhecimento da trajetória, velocidade e posição conhecida em um momento anterior assim como predizendo uma posição futura a partir do conhecimento da trajetória, velocidade e posição atual (exemplos: giroscópios, acelerômetros). Assim, seria possível extrair da fototriangulação informações de PVA.

Pode-se notar que a fototriangulação faz com que, ao mesmo tempo o sensor possa ser capaz de ser utilizado para mapear e determinar sua própria posição no espaço apoiado em outras informações espaciais que correlacionem o espaço fotogramétrico ao espaço-objeto. Desta forma, é possível aumentar a confiabilidade na relação entre as determinações oferecidas pelos sensores imageadores e de orientação, pois há uma relação física-geométrica que tem que ser obedecida ou que restrinja grandes erros de observação. Atuando de forma isolada, a técnica de se auto orientar e determinar as coordenadas de objetos no espaço-objeto é conhecida como SLAM (*Simultaneous Location and Mapping*) ou ainda por *ego-motion* (HARRIS & PIKE, 1987; DAVIDSON et al., 2007). Geralmente trata-se de sistemas automatizados em que as observações nas imagens são realizadas geralmente em tempo real a fim de determinar a orientação de uma ou mais câmaras e a localização de pontos no espaço-objeto.

A maioria dos sistemas desenvolvidos encontra-se em ambientes *indoor* e fazem uso somente das informações oriundas de câmaras. Os resultados deste tipo de levantamento podem ser vistos na figura 2. O trabalho de Harris & Pike (1987) mostra resultados bons e relativamente estáveis, obtidos com estereocâmaras na determinação da orientação. Trabalhos similares como o de Davidson et al. (2007) utilizando apenas uma câmara (MonoSLAM) também têm conseguido não somente determinar a posição de uma câmara ao longo do tempo, como simultaneamente extrair feições e determinar suas coordenadas. Griebbach et al. (2010) trazem um método que combina sensores como IMU, GPS e a própria determinação baseada em imagem formando um SMMT.

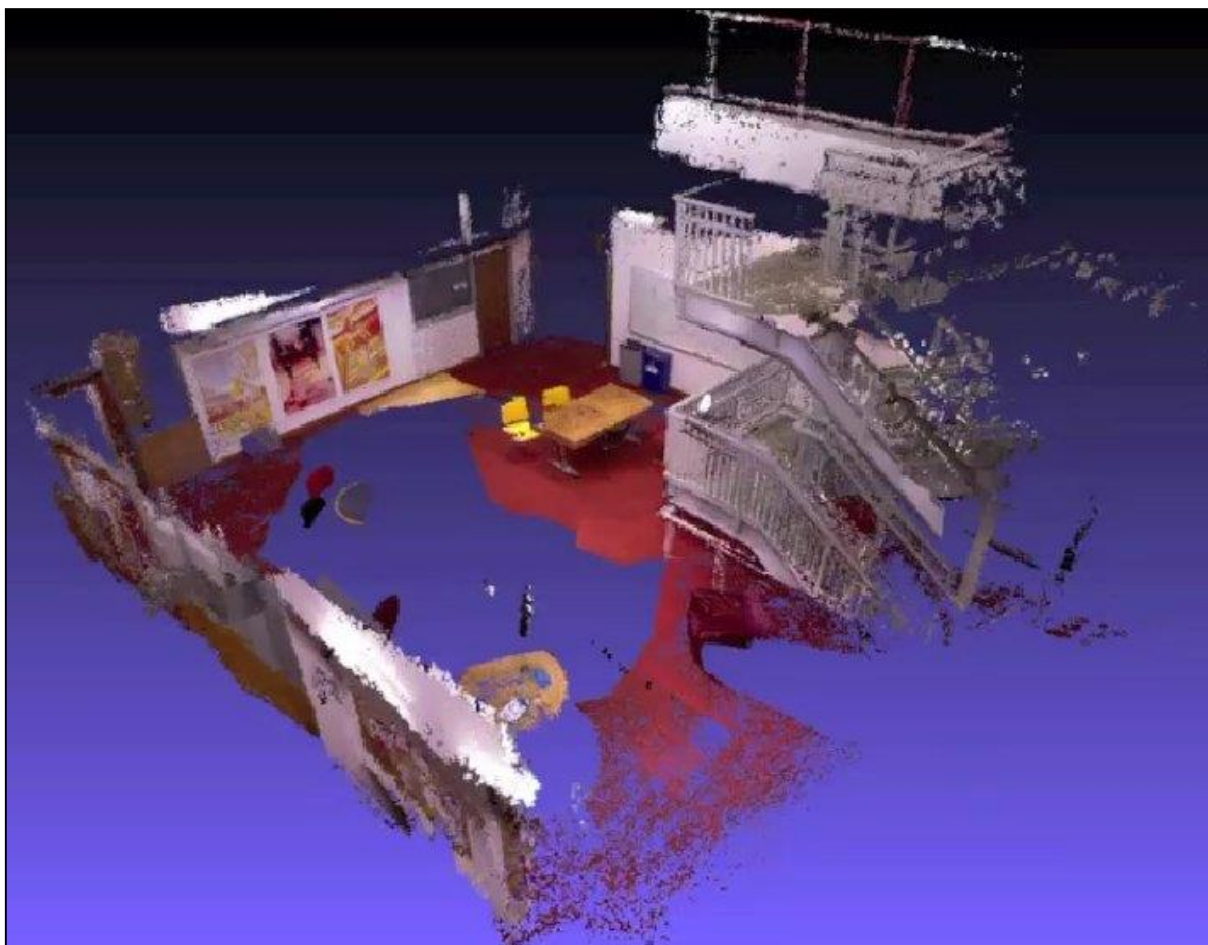


Figura 2: Levantamento fotogramétrico utilizando SLAM. (Fonte: *Robust Robotics Group – MIT*)

O mapeamento de vias urbanas, estradas e ferrovias tem grande potencial a ser explorado com o mapeamento móvel. Sobretudo obtendo-se informação espacial de qualidade. Para esta aplicação, encaixa-se perfeitamente o conceito de caminhamento fotogramétrico (CF).

1.2 Caminhamento Fotogramétrico

O caminhamento fotogramétrico, da forma como é chamado por Silva (1997), é um modo especial de levantamento fotogramétrico terrestre baseado em sucessivos pares estereoscópicos, cuja base formada entre os centros perspectivos das estações de exposição é perpendicular ao eixo do levantamento (sentido em que as câmaras caminham). Ele é destinado à obtenção de dados e informações espaciais acerca de feições urbanas e arredores de rodovias ou ferrovias.

Uma característica marcante no método é que um ponto pode ter suas coordenadas

determinadas por um único par, por meio da intersecção fotogramétrica, ou por quantos pares for possível fazê-lo (figura 3). Ao realizar esta tarefa simultaneamente entre tomadas subsequentes, tem-se o conceito de fototriangulação aplicado com a particularidade da grande variação em escala, crescente na medida em que as posições das estações de exposição se encontram mais próximas ao ponto.

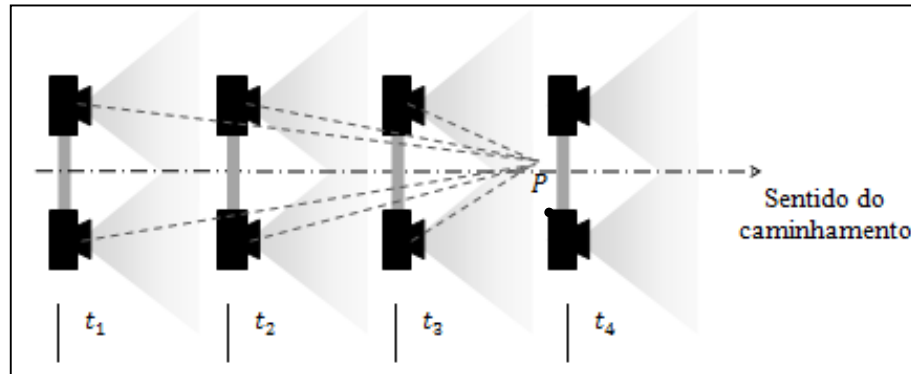


Figura 3: Exemplo de caminhamento fotogramétrico (Adaptado de SILVA, 1997).

O método baseia-se em uma fototriangulação sequencial sem pontos de apoio, tendo conhecimento *a priori* de parâmetros de orientação interior e de orientação relativa. Pode ser utilizado no contexto de navegação, tanto em tempo real como pós-processado.

1.3 Arranjo Triangular de Câmaras

É proposta neste trabalho uma extensão do modelo apresentado por Silva (1997) que utiliza um par estereoscópico. Entende-se que a redundância de observações traz maior confiabilidade na determinação de coordenadas tridimensionais de pontos no espaço-objeto. Por isto, uma terceira câmara é acrescentada ao arranjo. Foi analisado em estudo dirigido (BLASECHI, 2014) que a configuração de câmaras em formação não colinear (ou próxima disto), tem maiores chances de detectar e localizar erros que porventura ocorram e possam ser detectados segundo uma probabilidade. Em uma simulação de um SMM, serão utilizadas três câmaras em um arranjo triangular, de forma que passa a existir redundância de raios perspectivos na determinação de um ponto no espaço objeto determinado a partir da relação intra-imagens.

O prefixo intra denota um posicionamento interior. Ao se utilizar um arranjo de câmaras que deverão formar um conjunto de estações de exposição, esta é a relação de correspondência entre pontos homólogos das fotos tomadas pelas câmaras do arranjo (duas ou

mais) em um mesmo instante. Por outro lado, a relação inter-imagens indica a relação entre imagens de uma mesma câmara tomadas em instantes diferentes. O uso deste arranjo triangular, a princípio, deve levar a uma melhora nas precisões internas e externas. A precisão interna vem da qualidade das observações e consequentemente na consistência do modelo. Esta melhora se propaga para a determinação dos parâmetros de orientação exterior (POE), que serão utilizados no mapeamento por meio da intersecção fotogramétrica.

O processamento da triangulação sequencial, como será visto a diante, foi elaborado e construído para poder modelar o mapeamento móvel, devendo obter como resultado final a orientação das câmaras e o mapeamento de pontos no espaço-objeto. Espera-se demonstrar que a introdução da terceira câmara aumenta a qualidade da informação espacial, ao menos em relação ao caminhar utilizando um par de câmaras.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos Gerais

- Mostrar como a adição de uma terceira câmara, formando uma geometria triangular entre os centros perspectivos, pode contribuir na melhoria da qualidade da fototriangulação no caminhar fotogramétrico;
- Encontrar situação ótima de trabalho com este arranjo de câmaras levando em conta a geometria formada entre os elementos fotogramétricos, a redundância de observações e a forma de processamento da fototriangulação;
- Mostrar que o CF pode funcionar como um método de *dead-reckoning*, fazendo com que o SMM possa usufruir não somente das informações de mapeamento (levantamento), mas também da orientação da plataforma que o acolhe (fazendo parte da integração de sensores que determinam PVA).

1.4.2 Objetivos Específicos

- Simular dados que representem as situações reais de trabalho do CF;
- Elaborar programa (em linguagem C++) que:
 - Possa processar os dados em forma de sequência de blocos de imagens de forma automática;

- Detecte, localize e minimize os efeitos das observações com erros grosseiros em tempo de processamento;
- Emita relatórios que permitam a análise da contribuição de cada observação (nas coordenadas x e y nas imagens) por meio de números de redundância;
- Possibilite um ajustamento livre (ou similar) para analisar somente observações.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi estruturado para conter a base teórica, a descrição do método e materiais envolvidos, apresentação dos experimentos e conclusões acerca dos resultados. No capítulo 2, são apresentados os conceitos e modelos matemáticos que dão base à metodologia desenvolvida. Para isto, são apresentados os modelos de fototriangulação e, em seguida, no capítulo 3, um aprofundamento na questão da qualidade do ajustamento relacionado à geometria do levantamento. O capítulo 4 apresenta os materiais e métodos da aplicação que visa explorar as variáveis de geometria e processamento da fototriangulação no caminhamento fotogramétrico com arranjo triangular de câmaras. Esta aplicação foi testada em nove experimentos, que mostram, dentre vantagens e desvantagens, os potenciais de uso da técnica. Estes experimentos e seus resultados são discutidos no capítulo 5. A ponderação sobre os resultados é realizada nas conclusões contidas no capítulo 6, que também traz uma análise do panorama que pode ainda ser explorado acerca deste tema.

2 FOTOTRIANGULAÇÃO

2.1 Modelo Matemático

Na determinação das coordenadas no espaço objeto foi utilizada a fototriangulação pelo método de feixes de raios perspectivos (*bundle*), considerando as equações de colinearidade na forma:

$$\begin{aligned} x'^{[i,j]} &= x_0^{[j]} + \Delta x^{[i,j]} - f \frac{r_{11}(X^{[j]} - X_{CP}^{[j]}) + r_{12}(Y^{[j]} - Y_{CP}^{[j]}) + r_{13}(Z^{[j]} - Z_{CP}^{[j]})}{r_{31}(X^{[j]} - X_{CP}^{[j]}) + r_{32}(Y^{[j]} - Y_{CP}^{[j]}) + r_{33}(Z^{[j]} - Z_{CP}^{[j]})} \\ y'^{[i,j]} &= y_0^{[j]} + \Delta y^{[i,j]} - f \frac{r_{21}(X^{[j]} - X_{CP}^{[j]}) + r_{22}(Y^{[j]} - Y_{CP}^{[j]}) + r_{23}(Z^{[j]} - Z_{CP}^{[j]})}{r_{31}(X^{[j]} - X_{CP}^{[j]}) + r_{32}(Y^{[j]} - Y_{CP}^{[j]}) + r_{33}(Z^{[j]} - Z_{CP}^{[j]})} \end{aligned} \quad (1)$$

em que i é o identificador da estação de exposição de onde está sendo observada a coordenada; j é o identificador do ponto observado; X_{CP} , Y_{CP} e Z_{CP} são as coordenadas do centro perspectivo da estação de exposição; X , Y e Z as coordenadas do ponto observado no espaço-objeto; r_{11} a r_{33} os elementos da matriz de rotação passiva entre os sistemas de coordenadas, f é a distância focal; x e y as coordenadas do ponto no sistema fotogramétrico. x_0 e y_0 são as coordenadas do ponto principal e Δx e Δy são as correções de erros sistemáticos de distorção radial simétrica, distorção descentrada e não ortogonalidade entre os eixos.

Do ponto de vista do ajustamento de observações, o modelo funcional é não-linear, o que requer o fornecimento de valores iniciais aproximados para os parâmetros a serem ajustados. O método de ajustamento é o paramétrico, com ponderação generalizada dos parâmetros (SILVA, 1987), cujo modelo pode ser resumido por:

- Equações de observação (modelo funcional), representando as equações de colinearidade:

$$\mathbf{l}_a = F(\mathbf{x}_a) \quad (2)$$

$$G(\mathbf{x}_a) = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{v} = A\mathbf{x} + \mathbf{l} \quad (4)$$

$$P = \sigma_0^2 \Sigma_l \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_i = C + \mathbf{l}_i \quad (6)$$

$$P_i = \sigma_0^2 \Sigma_{l_i} \quad (7)$$

$$\mathbf{x} = -(A^T P A + C^T P_i C)^{-1} (A^T P \mathbf{l} + C^T P_i \mathbf{l}_i) \quad (8)$$

$$\mathbf{x}_a = \mathbf{x}_0 + \mathbf{x} \quad (9)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T P \mathbf{v} + \mathbf{v}_i^T P_i \mathbf{v}_i}{n - u + c} \quad (10)$$

$$\Sigma_x = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A + C^T P_i C)^{-1} \quad (11)$$

onde:

- $\mathbf{l}$: vetor de observações;
- $\mathbf{l}_i$: vetor de injunções;
- $\mathbf{l}_a$: vetor de observações ajustadas;
- $\mathbf{x}$: vetor dos parâmetros;
- $\mathbf{x}_a$: vetor de parâmetros ajustados;
- A : matriz design do modelo funcional;
- C : matriz design das equações de injunção;
- $\mathbf{v}$: vetor de resíduos das observações;
- $\mathbf{v}_i$: vetor de resíduos das injunções;
- $F(\mathbf{x}_a)$: modelo funcional, que no caso, representam as equações de colinearidade;

- $G(x_a)$: equações de injunções;
- σ_0^2 : fator de variância *a priori*;
- $\hat{\sigma}_0^2$: fator de variância *a posteriori*;
- Σ_l : matriz de covariância das observações;
- Σ_x : matriz de covariância dos parâmetros;
- Σ_{l_i} : matriz de covariância das injunções;
- P : matriz peso das observações;
- P_l : matriz peso das injunções;

A introdução de injunções com todos os parâmetros ponderados (ponderação generalizada) que leva à equação (8) onde são atribuídos os seguintes pesos de acordo com a característica desejada (Silva J. F., A Inferência Bayesiana e a Detecção e Localização de Erros Grosseiros em Fototriangulação por Feixes de Raios, 1987):

$$p_{x_i} \rightarrow 0 \{\text{Variável livre}\}$$

$$p_{x_i} \rightarrow \infty \{\text{Constante}\}$$

Computacionalmente estes pesos são dados atribuindo-se valores relativamente muito maiores (constantes) ou menores (variável livre) para os pesos das variáveis.

2.2 Modo de Processamento

Neste trabalho, o processamento da fototriangulação ocorreu em lote ou na forma sequencial. O primeiro (lote) considerou o processamento de todos os parâmetros de forma simultânea enquanto que o modo sequencial criou sub-blocos ao longo do levantamento. O processamento sequencial da fototriangulação visa diminuir a abrangência das informações processadas para poder, principalmente, reduzir o custo computacional. Como consequências surgem vantagens e desvantagens acerca dos blocos processados. Dentre as vantagens pode-se destacar a facilidade em se alcançar sucesso na convergência do processo iterativo, a maior facilidade em encontrar erros grosseiros detectáveis e a possibilidade de usar um sistema local para cada bloco e determinar o PVA da plataforma que comporta a câmara (ou sistema de câmaras). Como desvantagens, podem ser apontadas principalmente o maior acúmulo de erros no sentido do caminharmento ao se processar a sequência de forma parcialmente

retroalimentada e a complexidade de informações geradas em cada processamento de bloco.

O processamento sequencial aplicado neste trabalho funciona baseado em dois conceitos de divisão das tarefas de processamento: as janelas de processamento e o avanço de base. Para melhor entendê-los, faz-se necessário definir os seguintes conceitos:

- **Ação:** Ato, comportamento, evento (exemplo: disparar um sinal elétrico, tomar uma fotografia, gravar dados, etc.).
- **Evento:** Ação ou conjunto de ações referenciadas a um instante, podendo ter duração maior que zero na escala de tempo (exemplo: tomada simultânea de fotografia por várias câmaras)
- **Base:** Neste trabalho, a base, quando no contexto de processamento sequencial, refere-se ao arranjo de câmaras. Esta definição foi adotada a partir das definições usuais no caminhamento fotogramétrico no trabalho de Silva (1997). Neste, a base é um vetor formado pelos centros perspectivos de um par estereoscópico no caso normal (eixos óticos paralelos).

A partir destas definições, pode-se também definir os conceitos de janela e avanço de base como segue:

- **Janela:** A definição de janela para este trabalho remete à quantidade de eventos subsequentes.
- **Avanço de base:** Neste trabalho, quando no contexto de processamento (ajustamento ou fototriangulação) sequencial, representa a quantidade de eventos que se avança por entre eventos subsequentes no tempo, sendo maior ou igual a um evento e menor que o tamanho da janela (se for igual ao tamanho da janela, não há interligação entre janelas).

Considerando uma situação de exemplo na figura 4 em que um bloco completo de fotografias é composto por quinze fotos, das quais estão separadas em cinco eventos (tomadas de fotografia) nos instantes de t_1 a t_5 , supondo-se a aquisição simultânea por três câmaras de um arranjo triangular. Uma janela de processamento (J_1) igual a três eventos é aplicada, restringindo o processamento a nove imagens. Após o término do processamento deste sub-bloco, avança-se para a próxima janela (J_2) com um avanço de um evento B_{12} ou avanço de base.

A janela pode ter dimensões de um a n eventos, sendo menor ou igual à quantidade de eventos. Quando a dimensão é igual ao total de eventos, tem-se o ajustamento em lote. O avanço de base deve ser maior que zero e menor que o tamanho da janela. Se o

avanço fosse igual ao tamanho da janela, não seria possível utilizar os dados ajustados na primeira janela, fazendo com que não houvesse conexão entre os blocos subsequentes.

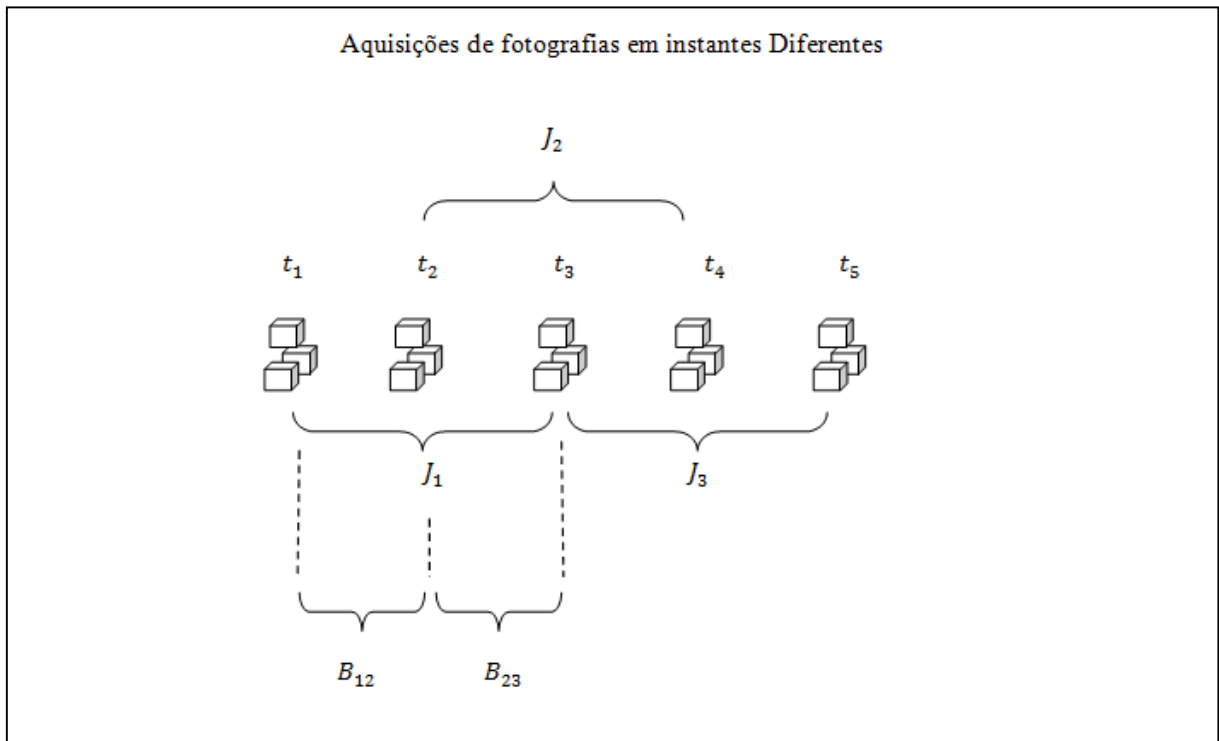


Figura 4: Processamento sequencial da fototriangulação.

3 SISTEMAS REDUNDANTES E DETECÇÃO DE ERROS GROSSEIROS

A qualidade de um ajustamento de observações pode ser descrita pela confiabilidade, que se traduz na capacidade do modelo possibilitar a detecção de erros e pode ser dividida entre interna e externa. A confiabilidade interna dá a magnitude de um erro grosseiro em uma observação (V_{li}), que, até certo nível de probabilidade, não pode ser detectado. A confiabilidade externa mostra o efeito produzido por um erro grosseiro não detectado sobre o vetor solução (x_a).

3.1 A Influência da Geometria

O desenho da rede e o modelo de ajustamento podem ser considerados a parte mais problemática ao se almejar resultados de alta acurácia (GRÜN, 1980), o que segundo Wolf e Dewitt (2000), depende do ângulo formado na intersecção dos raios perspectivos, sendo que a máxima ocorre em ângulos de intersecção de 90° .

A acurácia almejada varia de acordo com a aplicação. Por exemplo, em arqueologia, em termos de proporção, tem-se acurácia da ordem de 1:500 para um sítio arqueológico (relativa entre o erro admissível e o tamanho do objeto que está sendo restituído). Em aplicações de alta precisão, como é o caso da indústria aeronáutica, os sistemas de medição alcançam acurácia da ordem de 1:100.000 ou melhor (FRASER, 1992).

O conjunto formado pelas câmaras e os pontos no espaço-objeto compõem a chamada rede fotogramétrica. Ela deve ter um desenho que lhe dê fortes características geométricas. Isto significa que por meio da geometria formada pelos elementos que a compõem, pode-se ter um ajustamento com maior confiabilidade. É, portanto, de grande necessidade a otimização do design da rede para garantir tais características.

Partindo-se do modelo funcional linearizado e o modelo estocástico da autocalibração (FRASER, 1992; 1996):

$$\begin{aligned} v &= Ax - l \\ \Sigma_{L_b} &= \sigma_0^2 P^{-1} \end{aligned} \tag{12}$$

onde l , v e x são os vetores observação, resíduos e dos parâmetros incógnitos,

respectivamente; A é a matriz *design* ou de configuração; Σ_{L_b} é a matriz de covariância das observações; P é a matriz peso; e σ_0^2 é o fator de variância *a priori*.

Como o alvo das funções são as coordenadas XYZ dos pontos no espaço-objeto, é de grande utilidade particionar o vetor x em dois grupos de parâmetros (FRASER, 1992; 1996):

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

onde x_1 são os parâmetros interior e exterior das câmaras, bem como os parâmetros adicionais da autocalibração; e x_2 são os parâmetros XYZ dos pontos no espaço-objeto. Com este esquema de particionamento, as equações normais tomam a seguinte forma (FRASER, 1992; 1996):

$$\begin{bmatrix} A_1^T P A_1 & A_1^T P A_2 \\ A_2^T P A_1 & A_2^T P A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^T P l \\ A_2^T P l \end{bmatrix} \quad (14)$$

Em uma rede fotogramétrica é preciso que se tenha bem resolvidos todos os elementos envolvidos na fototriangulação. Deve-se levar em conta o *datum*, a geometria e pesos atribuídos.

Em fotogrametria a curta distância, as redes fotogramétricas empregam configurações fortes, por meio de convergência e multiestações. Esta característica faz com que haja uma limitação da propagação do erro relacionado ao *datum*, sendo que a matriz de covariância de traço mínimo é dada aproximadamente por (FRASER, 1992; 1996):

$$\Sigma_{x_2} = \sigma_0^2 (A_2^T P A_2 + P^{inj})^{-1} \quad (15)$$

Como apontado em Fraser (1987 apud FRASER, 1992), a matriz de covariância Σ_{x_2} dos pontos no espaço-objeto obtidas pela equação (15), para propósitos práticos, são os mesmos que os determinados utilizando ajustamento livre paramétrico com injunções. Um

apontamento importante é feito com relação à equação, pois dela resulta a variância mínima $\hat{\sigma}_{x_2}^2$, que é uma precisão média ótima para as coordenadas XYZ dos pontos no espaço-objeto, obtida por (FRASER, 1992):

$$\hat{\sigma}_{x_2}^2 = \frac{tr(\Sigma_{x_2})}{3n} \rightarrow \text{mínimo} \quad (16)$$

onde n é o número de pontos, ou ainda, como é apresentado em Grün (1980):

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_X^2 &= \frac{tr(\Sigma_{XYZ}^X)}{n} \\ \hat{\sigma}_Y^2 &= \frac{tr(\Sigma_{XYZ}^Y)}{n} \\ \hat{\sigma}_Z^2 &= \frac{tr(\Sigma_{XYZ}^Z)}{n} \end{aligned} \quad (17)$$

Para efeitos práticos, as precisões das medições sobre as coordenadas-imagem são tomadas como sendo iguais em x e y . Assim σ_x e σ_y são substituídos por um único valor σ . Tratando as observações como independentes e o fator de variância unitário, a expressão para Σ_{x_2} toma a seguinte forma (FRASER, 1992; GRÜN, 1980):

$$\Sigma_{x_2} = \sigma^2 (A_2^T A_2)^{-1} \quad (18)$$

Nesta equação o problema da geometria é designado como sendo o produto matricial $A_2^T A_2$ e o do peso por σ^2 . Observa-se aqui que o peso oferece nada mais do que uma escala para a matriz de covariância dos parâmetros. Entretanto, a separação dos problemas de geometria e pesos representados pela equação (18) não é completa.

Considerando uma rede com quatro estações de exposição, com sua matriz de covariâncias Σ_{x_2} , em que se assume que foram tomadas duas fotografias em cada uma destas estações. O resultado seria uma simples escala de Σ_{x_2} por um fator 0,5 (FRASER, 1992). No

entanto, resta a dúvida sobre onde foi de fato melhorado o valor. Se a influência deu-se na geometria da rede ou no peso das observações. O valor pode ser interpretado entre uma efetiva escala de $(A_2^T A_2)$ devida a uma “melhor” configuração ou a geometria da triangulação ou pode ser correspondida como sendo o simples fato de se assumir várias observações de coordenadas de um mesmo ponto. Duas observações independentes de coordenadas irão resultar em uma variância observacional que é igual à metade de sua correspondente com uma única leitura. Assim, a equação (18) pode ser estendida (Fraser, Photogrammetric Measurement to One Part in a Million, 1992):

$$\Sigma_{x_2} = \frac{\sigma^2}{k} (A_{2b}^T A_{2b})^{-1} \quad (19)$$

Em que A_{2b} é a matriz *design* para a configuração “básica” e k é o número de fotografias tomadas em cada estação nesta rede.

As múltiplas fotografias indicadas por k podem não ser necessariamente tomadas sobre o mesmo lugar ou próximas para serem válidas. Uma condição é que esta rede tenha forte geometria (de solução consistente e precisa), o que significa que estações de exposição adicionais não devam melhorar significativamente a triangulação representada pela rede básica.

A ideia de uma rede básica tem o potencial de simplificar o pré-planejamento de estágios de desenvolvimentos de redes de alta precisão fotogramétrica, especialmente quando se usa conjuntamente a fórmula (Fraser, Photogrammetric Measurement to One Part in a Million, 1992):

$$\hat{\sigma}_{x_2}^2 = qSk^{-0.5}\sigma \quad (20)$$

No planejamento do design da rede fotogramétrica, dois aspectos devem ser considerados: acurácia e praticidade. Com relação ao aspecto prático, é desejável escolher uma configuração que permita ver todos os alvos no espaço objeto. O arranjo formado pelas câmaras normalmente ajuda na questão da homogeneidade da precisão das medidas em dos alvos. Para a otimização da acurácia, é necessário adotar a maior distância focal possível para

a câmara.

Sendo as precisões das observações geralmente fixas *a priori*, a única maneira de realmente melhorar a resolução angular é aumentando a distância focal. A resolução angular se refere ao menor ângulo formado no centro perspectivo da câmara por um triângulo, cuja base dispõe-se sobre o quadro sensor onde a dimensão é formada por elementos pictoriais, como resolução do filme (no caso de câmaras analógicas, em pares de linhas por milímetro) ou dimensão do elemento sensor (no caso de câmaras digitais, pixel). Na figura 5 é mostrada a diferença dos ângulos $\Delta\theta_1$ e $\Delta\theta_2$ formados no centro perspectivo, cuja base é formada por elementos pictoriais com a mesma dimensão (Δx). É possível perceber que para um mesmo sensor, ao se aumentar a distância focal, o ângulo máximo de abertura é reduzido. Em contrapartida, a dimensão da base e seus sub elementos serão os mesmos. Assim, a resolução angular pode ser vista como a quantidade de subdivisões do ângulo máximo de abertura da câmara.

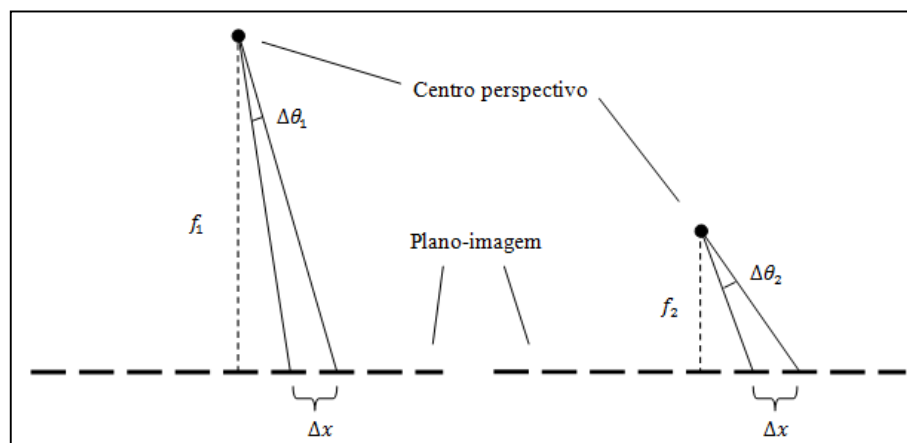


Figura 5: Resolução angular para duas câmaras com distâncias focais diferentes.

A propagação de variâncias não é a única questão importante. Existe também o erro sistemático que influencia na geometria da rede. Uma maior fidelidade é alcançada com a realização de uma autocalibração. Mas acima e abaixo das perturbações na imagem que podem ser deterministicamente compensadas, existem erros sistemáticos que não são modelados facilmente. Eles podem ser invariáveis de foto para foto, como imperfeições na simetria rotacional das superfícies das lentes ou deformação do filme. Alternativamente, erros sistemáticos podem assumir diferentes papéis em cada fotografia, embora ainda não aleatórios. Alguns exemplos são: imperfeições no sensor ou quando o mesmo não está formando um plano, não ortogonalidade dos eixos x e y , pequena instabilidade na orientação interior ou ainda dificuldades em se mirar precisamente em alguns alvos.

3.2 Números de Redundância

Baarda (1968 apud FÖRSTNER, 1985, p.1138) indica o conceito de acurácia como sendo composto por precisão e confiabilidade. Förstner (1985) utiliza o termo “qualidade” em vez de acurácia, por considerar mais adequado para descrever erros não detectáveis no modelo matemático e seus efeitos. Uma visão geral apresentada em Förstner (1985) é dada na figura 6.

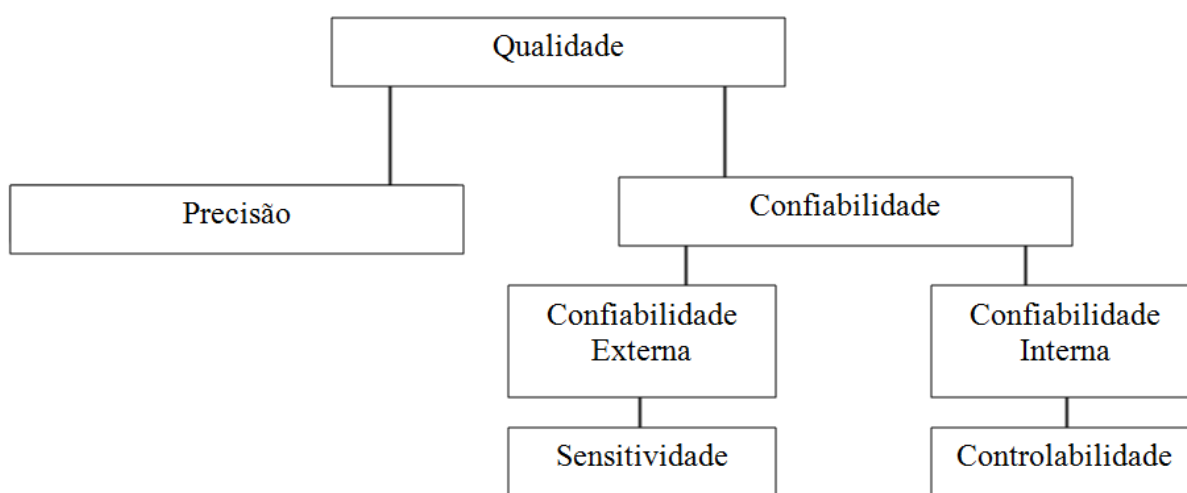


Figura 6: Descrição das posições das câmaras e disposição dos pontos no espaço-objeto. Fonte: FÖRSTNER, 1985.

O termo “confiabilidade” define a qualidade do modelo de ajustamento com respeito à detecção de erros. Estes erros podem ser grosseiros, sistemáticos ou ainda erros relacionados com os pesos das observações. Entretanto, o termo “confiabilidade” refere-se principalmente à detecção de erros grosseiros, uma vez que os erros sistemáticos podem ser tratados com modelos como, por exemplo, a autocalibração e os erros relacionados aos pesos das observações podem ser tratados separadamente (Grün, 1980).

Confiabilidade interna é a controlabilidade das observações em que, dada uma determinada probabilidade, são determinados limites mínimos acima dos quais os erros grosseiros que podem ser detectados.

O efeito causado por erros grosseiros não detectados é descrito por fatores de erros-padrões das coordenadas e indica o quanto pode ser deteriorado no pior caso. Estes fatores descrevem a confiabilidade externa ou sensibilidade das coordenadas desconhecidas. Existe obviamente uma conexão com a validação da precisão (Förstner, 1985).

A magnitude de um erro grosseiro em uma observação (∇_{l_i}) que não é detectável a certo nível de probabilidade, assumindo-se que apenas um erro grosseiro consta no ajustamento de uma rede é (GRUN, 1980):

$$\nabla_{l_i} = \sigma_0 \frac{\delta}{P_i \sqrt{q_{v_i v_i}}} = \sigma_0 \frac{\delta}{\sqrt{r_i}} \quad (21)$$

onde δ é o parâmetro de não centralidade do teste *data-snooping*; P_i é a matriz peso das observações; e $q_{v_i v_i}$ é um elemento diagonal da matriz de covariâncias dos resíduos (Q_{VV}). Em um ajustamento, a matriz Q_{VV} pode ser dada por (Förstner, 1985):

$$\Sigma_V = \Sigma_{L_b} - A(A^T P A)^{-1} A^T \quad (22)$$

onde Σ_{L_b} é a matriz de covariâncias das observações. A redundância r no ajustamento pode ser dada em função de Σ_V por (Förstner, 1985):

$$posto(\Sigma_V P) = traço(\Sigma_V P) = \sum_{i=1}^n (\Sigma_V P)_{ii} = r \quad (23)$$

cujos números de redundância r_i variam de 0 a 1. Uma observação com $r_i = 1$ é totalmente controlável, ao contrário do que acontece com uma observação com $r_i = 0$. A redundância relativa r é uma média da redundância em relação ao número de observações. Em blocos fotogramétricos ela costuma variar de 0,2 a 0,5, sendo este último um indicador de um bloco estável. Na parte superior das equações (24), a redundância relativa é dada em relação às coordenadas-imagem x e y . Os indicadores de confiabilidade interna globais são definidos como (Grün, 1980):

$$R_i(x) = \frac{tr(\Sigma_V^x)}{n}, \quad R_i(y) = \frac{tr(\Sigma_V^y)}{n} \quad (24)$$

$$\nabla_{x_M} = \frac{1}{n} \sum \nabla_{x_i}, \quad \nabla_{y_M} = \frac{1}{n} \sum \nabla_{y_i}$$

em que $tr(\Sigma_V^x)$ e $tr(\Sigma_V^y)$ são os subtraços da matriz de covariâncias (ou de uma forma mais genérica, de coeficientes dos resíduos) das observações (Σ_V); ∇_{x_M} e ∇_{y_M} é o tamanho médio do erro grosseiro não-detectável; e n é o número de observações.

Os três exemplos que seguem (figura 7) ilustram as condições para uma boa confiabilidade que têm forte relação com a geometria local. Neles, pode-se ver a confiabilidade sendo descrita a partir de números de redundância (r_i) que são vistos ao lado das representações dos raios perspectivos e abaixo de cada figura tem-se a redundância do ajustamento (r). A figura mostra diagramas de intersecções a vante com diferentes quantidades de observações. Elas demonstram a influência de observações adicionais em relação à força da geometria. No primeiro caso, elas não são controláveis, isto é, são apenas necessárias à determinação das coordenadas. No segundo caso, cada observação é controlável, ou seja, elas não servem somente para a determinação de coordenadas. Entretanto, erros nas observações não são localizáveis ou identificáveis, ou seja, cada um serve para controlar o erro do outro. No terceiro caso, tem-se finalmente erros localizáveis nas observações, pois as observações não estão servindo apenas para controlar o erro umas das outras. Qualquer observação a mais é então supérflua para a detecção de um simples erro grosseiro. O aumento do número de raios perspectivos acompanha o crescimento da força da geometria que pode ser descrita pela sequência de termos comuns: determinação-controle-localização.

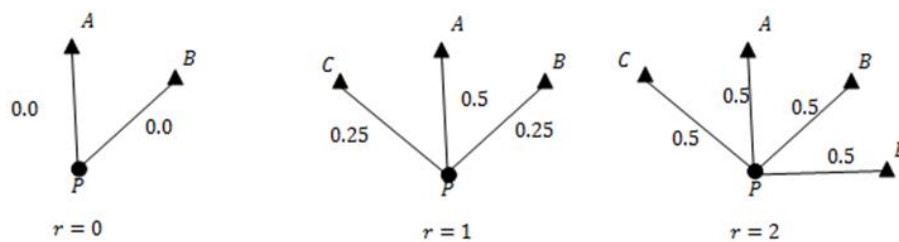


Figura 7: Influência de observações adicionais para a força da geometria. Fonte: (FÖRSTNER, 1985).

Obviamente o desenho do terceiro caso foi escolhido apropriadamente para alcançar uma determinação de coordenadas confiável. Isto é diferente nas figuras 8 e 9. Na primeira situação da figura 8, a determinação do ponto P é fraca, portanto, a direção D na segunda situação não é controlável. As direções A e B controlam uma à outra. Em consequência, erros grosseiros nas direções C e D na terceira situação da figura 8

praticamente não podem ser localizados. Qualquer direção adicional na terceira situação da figura 9, exceto alguma existente com um ângulo de aproximadamente 45°, possibilita a localização de erros grosseiros em qualquer direção (FÖRSTNER, 1985).

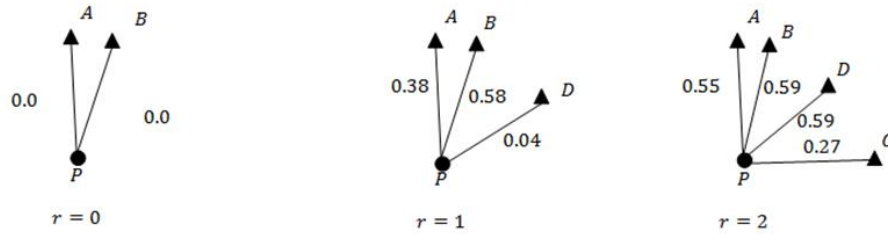


Figura 8: Influência de observações adicionais em uma geometria fraca. Fonte: FÖRSTNER, 1985.

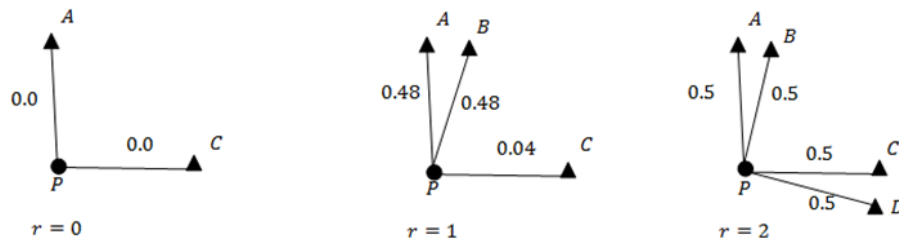


Figura 9: Influência de observações adicionais em uma geometria forte. Fonte: FÖRSTNER, 1985.

Grün (1980) observou em seu experimento sobre a confiabilidade interna que os pontos do controle observados são confiáveis em todos os experimentos. Já nos pontos fotogramétricos comuns, existem diferenças significantes entre as redes. No caso de duas fotografias, as observações em direções próximas à da base (x) entre os centros perspectivos não podem ser verificadas e as sobre a direção perpendicular à base (y) têm confiabilidade dentro da média dos outros experimentos.

3.3 Confiabilidade Externa

A confiabilidade externa indica o efeito de um erro grosseiro não detectável nas quantidades estimadas na forma (GRUN, 1980):

$$\nabla_{xj} = (A^T P A)^{-1} A^T P \nabla_{l_i} \quad (25)$$

O efeito sobre as coordenadas de um ponto no espaço objeto tem grande interesse. Assim, a confiabilidade interna pode ser considerada definida no espaço-imagem e a confiabilidade externa definida no espaço-objeto.

Como indicado na equação (25), o erro grosseiro (∇_{l_i}) é propagado para o vetor ∇_{x_j} . Assim, o formato da rede de estações de exposição que determina a matriz normal ($N = (A^T P A)^{-1}$), tem essencial influência na qualidade da confiabilidade externa. Existe uma relação direta entre confiabilidade externa e a precisão, dado que a matriz de covariâncias da resolução do sistema é dada pelo produto de N pelo sigma a *posteriori* (σ_0^2). Desta forma, mesmo com valores de confiabilidade interna idênticos, tem-se valores diferentes de confiabilidade externa em redes de estações de exposição com formações diferentes. Isto implica que a confiabilidade interna pode não ser suficiente para descrever a confiabilidade externa de uma rede. Esta descrição cabe às medidas de confiabilidade externa.

Os limites adotados como tolerância para a detecção de erros grosseiros foram baseados no teste de hipóteses *data-snooping* (BAARDA, 1968). As tolerâncias podem ser distinguidas em três tipos:

Tolerâncias de primeira ordem - Valores para pontos que não sejam de controle causados por erros grosseiros nas observações inerentes a estes pontos;

Tolerâncias de segunda ordem - Valores para pontos que não sejam de controle causados por erros grosseiros nas observações de pontos de controle;

Tolerâncias de terceira ordem - Valores para pontos que não sejam de controle causados por erros grosseiros nas observações de outros pontos que não sejam de controle.

Segundo Grün (1980), As máximas distorções nas coordenadas no espaço objeto são causadas por erros nas observações do ponto correspondente. Em relação a estes valores, os efeitos das tolerâncias de segunda ordem são relativamente pequenos, entretanto, não são desprezíveis. Em relação a toda a rede, as tolerâncias de terceira ordem são pequenas, contudo, pode acontecer de pontos de terceira ordem exceder as tolerâncias de primeira ordem.

Dobrando o número de fotos sem mudar o tamanho da base leva a uma melhora nas máximas tolerâncias de segunda e terceira ordens por um fator de 2 (dois). Ao manter o número de fotos constante, um aumento na dimensão da base não causa melhoras na confiabilidade interna. Entretanto, isto causa uma melhora na confiabilidade externa de forma significativa, bem como se tem valores para a confiabilidade externa nas coordenadas X, Y e Z tornam-se mais homogêneos. Pode-se afirmar que, com respeito à confiabilidade (no que concerne à detecção de erros grosseiros), as redes formadas por apenas pares de fotos são completamente falhos, de forma que as tolerâncias de primeira ordem resultam em valores próximos ao infinito.

Algumas considerações devem ser levadas em conta antes de se determinar o desenho de uma rede:

- Deve-se considerar que medidas precisas não são de grande valor se a confiabilidade da rede é ruim;
- Para evitar uma séria deterioração da precisão requerida em determinados componentes (pontos no espaço objeto, por exemplo) devem ser excluídos os parâmetros adicionais que tornem o sistema de equações fraco;
- São necessárias ao menos quatro fotos para se obter a mínima redundância para a detecção de erros grosseiros. Devem-se evitar arranjos de raios que levem a um plano epipolar comum entre eles.

3.4 Detecção, Localização e Tratamento do Erro

O ajustamento é composto da estimativa de variáveis aleatórias dentre parâmetros e observações e ainda suas MVC. O MMQ não precisa conhecer as distribuições de variáveis aleatórias envolvidas *a priori*. Entretanto, as análises estatísticas que são feitas após o ajustamento precisam destas informações. Assume-se que as observações têm distribuição normal, e o ajustamento tem o modelo funcional linear. Quando não linear, o modelo é linearizado por meio de uma série de Taylor em um processo iterativo, chegando-se a um resultado próximo da solução real.

Para analisar o ajustamento, uma estatística que pode ser realizada envolve a variância de referência, que é considerada não tendenciosa (MIKHAIL, 1976, p. 288). Sua estimativa *a posteriori* em um ajustamento de observações indiretas é dada por (MIKHAIL, 1976; CAMARGO, 2000):

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T P \mathbf{v}}{r} \quad (26)$$

onde r é a redundância ou graus de liberdade do ajustamento visto na equação (24), ou também (MIKHAIL, 1976; CAMARGO, 2000):

$$r = E(\mathbf{v}^T P \mathbf{v}) = (n - u) \quad (27)$$

A estatística a ser realizada compara o valor arbitrado *a priori* (geralmente escolhe-se um fator de variância unitário, ou seja: $\sigma_0^2 = 1$) com o estimado $\hat{\sigma}_0^2$ utilizando um teste qui-quadrado (χ^2), onde existem duas possibilidades de testes de hipóteses, sendo a primeira um teste bicaudal, em que (MIKHAIL, 1976):

$$\chi_r^2 = \frac{r\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} \quad (28)$$

tem uma distribuição χ^2 com r graus de liberdade, sendo as hipóteses:

$$H_0: \sigma^2 = \hat{\sigma}_0^2 \text{ contra } H_a: \sigma^2 \neq \hat{\sigma}_0^2 \quad (29)$$

rejeita-se H_0 quando:

$$\chi_r^2 < \chi_{1-\alpha/2, r}^2 \text{ ou } \chi_r^2 > \chi_{\alpha/2, r}^2 \quad (30)$$

O teste unicaudal é outra possibilidade. Nele, o valor de χ_r^2 é calculado diretamente a partir dos resultados do ajustamento (MIKHAIL, 1976):

$$\chi_r^2 = \frac{\Phi}{\sigma_0^2} = \frac{\mathbf{v}^T P \mathbf{v}}{\sigma_0^2} \quad (31)$$

em que são lançadas as hipóteses

$$H_0: \sigma^2 = \hat{\sigma}_0^2 \text{ contra } H_a: \sigma^2 > \hat{\sigma}_0^2 \quad (32)$$

rejeita-se H_0 quando:

$$\chi_r^2 > \chi_{\alpha, r}^2 \quad (33)$$

Dentre os testes apresentados, o unicaudal é geralmente o mais empregado.

Uma falha no teste de $\hat{\sigma}_0^2$ indica que o ajustamento está ruim e, portanto, deve-se investigar as causas possíveis.

Camargo (2000) afirma que distinguir os erros grosseiros dos aleatórios e sistemáticos é algo difícil de realizar, pois os resíduos de um ajustamento são compostos por todos estes tipos de erros. O resíduo mostra apenas parte do erro da observação, que é proporcional à redundância geométrica no ponto. Ele pode ser calculado a partir de (FÖRSTNER, 1985; SILVA, 1987):

$$\mathbf{v} = -\Sigma_V P \mathbf{l} \quad (34)$$

em que $\mathbf{l} = \mathbf{l}_0 - \mathbf{l}_b$, sendo $\mathbf{l}_0$ dado em função do modelo em $\mathbf{x}_0$ variando a cada iteração; e $\mathbf{l}_b$ o vetor de observações. Sabendo que um erro ∇l_i em uma observação provoca uma variação ∇v_i no resíduo v_i , então (SILVA, 1987):

$$v_i + \nabla v_i = \underbrace{q_{v_i} p_i}_{r_i} (l_i + \varepsilon_i) \quad (35)$$

onde ε_i é um erro cometido na observação l_i ; se pode ver que o produto $q_{v_i} p_i$ leva ao número de redundância da observação r_i cujo valor varia de zero a um ($0 \leq r_i \leq 1$). Um valor $r_i = 1$ indica que a observação é totalmente controlável, enquanto que $r_i = 0$ denota uma observação que não pode ser verificada (FÖRSTNER, 1985). Assim, a localização de uma observação contendo um erro ε_i pode ser feita através do calculo dos resíduos normalizados, que na forma matricial se apresentam (CAMARGO, 2000):

$$\mathbf{W} = \frac{\mathbf{C}^T P \mathbf{v}}{\sqrt{\mathbf{C}^T P \Sigma_v P \mathbf{C}}} \quad (36)$$

onde o numerador representa o resíduo transformado e o denominador o erro estimado; ${}_n \mathbf{C}_1$ é um vetor que representa a observação a ser testada (CAMARGO, 2000):

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \frac{1}{i} & 0 & \dots & \frac{0}{n} \end{bmatrix}^T \quad (37)$$

No caso da representação da MVC das observações ser diagonal (variáveis independentes), a equação (37) pode ser reduzida para cada observação testada (SILVA, 1987; CAMARGO, 2000):

$$\hat{w}_i = \frac{|v_i|}{\hat{\sigma}_{v_i}} \quad (38)$$

em que o desvio-padrão do resíduo ($\hat{\sigma}_{v_i}$) pode ser calculado por (FÖRSTNER, 1985; SILVA, 1987):

$$\hat{\sigma}_{v_i} = \sqrt{\sigma_0^2 q_i} = \sigma_{l_i} \sqrt{r_i} \quad (39)$$

$\hat{w}_i$ tem distribuição estatística igual à raiz quadrada da distribuição F Senedecor, com graus de liberdade 1 e ∞ . A raiz quadrada desta distribuição em uma amostra tem comportamento normal. Assim, compara-se o valor do resíduo normalizado com um valor de referência (SILVA, 1987):

$$c = t_{n,\alpha} = \sqrt{F_{1,n;\alpha}} \quad (40)$$

Faz-se um teste de bicaudal, com as seguintes hipóteses:

$$H_0: \forall l_i = 0 \text{ contra } H_a: \forall l_i \neq 0 \quad (41)$$

sendo que H_0 não é rejeitada a certo nível de significância α_0 (da desigualdade de Bonferroni)(CHEN et al., 1987 apud CAMARGO, 2000):

$$\alpha_0 = \frac{\alpha}{n} \quad (42)$$

quando

$$-c \leq \hat{w}_i \leq c \quad (43)$$

sendo que mais do que um resíduo testado pode exceder os valores críticos, acusando observações errôneas. Segundo Silva (1987), o resíduo padronizado recebe a influência global

do ajustamento bem como da precisão da observação, no caso em que se usa $\hat{\sigma}_0^2$ para calcular $\hat{w}_i$. Por isto, um valor de resíduo alto, em termos de valores absolutos, não será necessariamente uma observação inconsistente.

O teste é aplicado em uma observação por vez, e deve ser repetido até que todas as observações com erro sejam tratadas ou eliminadas. Deve-se atentar ainda quanto à redundância, uma vez que se tende a reduzir este número a cada erro detectado.

No caso de ser indicada a presença de erros grosseiros, procede-se sua localização. Para efetivar o controle de qualidade o último passo é tratar o erro. A observação eivada de erro localizada pode ser retirada do ajustamento (CAMARGO, 2000). Outro procedimento visto em Silva (1987) sugere a uma função analítica que estabelece o peso das observações tal que pesos menores são dados aos módulos de resíduos maiores e vice-versa.

Neste último, esta função ($p_i = F(|v_i|)$) recalcula o peso das observações sendo que após nova convergência os pesos são novamente recalculados sempre que se aplica o algoritmo de detecção de erros.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolver da pesquisa ocorreu em sua maior parte nas dependências do laboratório de mapeamento móvel (Lammov) da Unesp de Presidente Prudente. As simulações realizadas neste trabalho procuravam espelhar as características do material empregado em aplicação prática, de modo que fosse mais fácil a comparação e análise.

Na elaboração da metodologia, implementação das rotinas no programa, testes e simulações foram utilizados os seguintes materiais:

- Notebook com as seguintes características de interesse ao processamento das informações:
 - Processador Intel i5 2410M;
 - Memória RAM de 4GB;
- Programa desenvolvido na linguagem C++ para o processamento da fototriangulação por meio de autocalibração (AutocLoSe);
- Editor de imagens Irfanview na versão 4.37;
- Editor de texto Notepad++ 6.5.1;
- Editor de planilhas Microsoft Excel 2007;
- Editor de texto Microsoft Word 2007;
- Compilador Ming v. 4.8 64 bits;
- IDE QT Creator 5.5 64 bits;
- Scilab 5.5.2 64 bits.

4.1 Elaboração de Programa para o Processamento do Caminhamento Fotogramétrico

Para a aplicação dos métodos foi desenvolvido um programa que fosse capaz de processar todas as variáveis envolvidas na fototriangulação do CF tanto no modo em lote (comum) como no sequencial de forma automática. O programa foi denominado autocalibração em lote e sequencial – AutocLoSe. Nele, as tabelas são os dados de entrada contendo:

- Configurações de processamento (máximo de iterações, critério de convergência, tratamento de erro);

- Parâmetros de orientação exterior e suas precisões (fixos, ou ponderados ou livres);
- Parâmetros de orientação interior e suas precisões (fixos, ou ponderados ou livres);
- Pontos tridimensionais no terreno e suas precisões (controle, ou verificação ou enlace);
- Injunções de distância e suas precisões;
- Observações de coordenadas-imagem (coordenadas em milímetros ou pixels, de acordo com a especificação da câmara utilizada);
- Instantes de exposição;

Após o processamento, o programa entrega tabelas de parâmetros de orientação interior, exterior, pontos do terreno e injunções ajustados, bem como relatórios de ajustamento de cada bloco ou lote. É opcional a geração de um relatório de entrada de dados, que contém os dados lidos pelo programa.

Nos relatórios, são apresentadas as seguintes informações:

- Tempo de processamento;
- Número de iterações;
- Critério de convergência;
- Número de observações (para o ajustamento);
- Número de parâmetros (POE+POI+XYZ);
- Sigma posteriori;
- Números de redundância médios e por observação (x e y);
- Redundância média nas direções x e y ;
- Valores de RMSE, erro médio e desvio-padrão (precisa de pontos de verificação ativos);
- Valores ajustados, precisão e resíduo para o ajustamento dos parâmetros de câmaras, estações de exposição e pontos no terreno (relatório separado para pontos de controle, enlace e verificação);
- Valores ajustados (em milímetros), resíduos, número de redundância, resíduo, resíduo normalizado (nas direções x , y e resultante) para as observações;

Na figura 10 é mostrada uma tela capturada que mostra o início do relatório de

processamento. Este relatório é emitido a cada bloco de processamento no caso sequencial e em arquivo único no processamento em lote.

Tempo de processamento (s):	0.284
Numero de iteracoes (max. 30):	5
Criterio de convergencia:	0.000100
Numero de observacoes:	1504
Numero de parametros (POE + POI + XYZ):	340
Parametros de orientacao interior:	10
Parametros de orientacao exterior:	84
Parametros de pontos de controle:	246
sigma posteriori:	0.613450
Número de redundancia:	1276.682
Redundancia média na direção x:	0.844
Redundancia média na direção y:	0.854
VTPV:	121.824537
VTPVi:	661.355911

Estadística	X	Y	Z	Resultante
REMQ	0.002	0.001	0.000	0.002
EM	-0.002	0.001	0.000	0.002
DP-EM	0.000	0.000	0.000	0.000

Descricao	Dado	f	x0	y0	k1	k2	k3
cam 1	Ajustado	25.641	0.288	-0.012	-1.659e-004	3.471e-007	1.447e-011
	Desvio-padrao	0.018	0.033	0.024	1.909e-005	2.763e-007	1.196e-009
	Residuo	0.641	0.288	-0.012	-1.659e-004	3.471e-007	1.447e-011

Estacao(oes) de Exposicao							
Descricao	Dado	Omega	Fi	Kapa	X	Y	Z
1	Ajustado	6°28'56"	43°26'01"	-3°57'35"	115.123	401.306	10.494
	Desvio-padrao	0°04'48"	0°04'33"	0°03'09"	0.007	0.007	0.008
	Residuo	6°28'56"	-1°33'59"	-3°57'35"	0.123	0.306	0.494

Figura 10: Relatório de ajustamento emitido pelo programa de fototriangulação.

Antes de processar a fototriangulação, a função de validação organiza e estabelece relações lógicas entre as variáveis de entrada, de forma que somente sejam processados elementos que estejam se interligando racionalmente. Por exemplo, se uma câmara é desativada, todas as estações de exposição que usavam esta câmara também serão; se um ponto de controle é desativado, todas as observações sobre este ponto também são; mas ao contrário, se uma observação é desativada, não necessariamente serão desativados pontos no terreno, ou estações ou câmaras.

O programa tem a capacidade de organizar, ordenar e processar as estações de exposição de acordo com a ordem de disparo efetuada durante o levantamento que deve ser registrada concomitantemente ao funcionamento do SMM. São consideradas apenas as estações, pontos e observações ativas. Pode-se incluir ou ignorar os elementos que se deseja que participem do processamento. Desta forma, são possíveis de obter processamentos

sequenciais, mas sem deixar de existir a opção da fototriangulação em lote.

Neste trabalho não foi considerada a velocidade de deslocamento das câmaras ao longo do tempo. Por isto, os instantes de disparo das câmaras foram representados apenas pela sequência de números naturais $\{1, 2, 3, \dots, n\}$ e não pela informação do momento de disparo em relação ao tempo (em segundos).

4.2 Simulação de Caminhamento Fotogramétrico

4.2.1 Definição dos Sistemas de Coordenadas Envolvidos

Para entendimento deste trabalho, quatro sistemas de referência devem ser conhecidos:

- Fotogramétrico;
- Imagem digital;
- Terreno (local);
- Sistema de coordenadas do arranjo.

O sistema fotogramétrico tem sua origem no centro perspectivo (CP) de cada câmara, localizado no ponto nodal anterior, pois está sendo considerado um diapositivo. Como está ilustrado na figura 11, o eixo x encontra-se sobre o plano focal e, perpendicular a ele, o eixo y também no mesmo plano é ortogonal a ele e está direcionado para a parte de cima da câmara. O eixo z é coincidente com o eixo ótico da câmara e torna o sistema dextrógiro, de forma que aponta para a parte de trás da câmara. As coordenadas deste sistema são dadas na unidade do milímetro (mm).

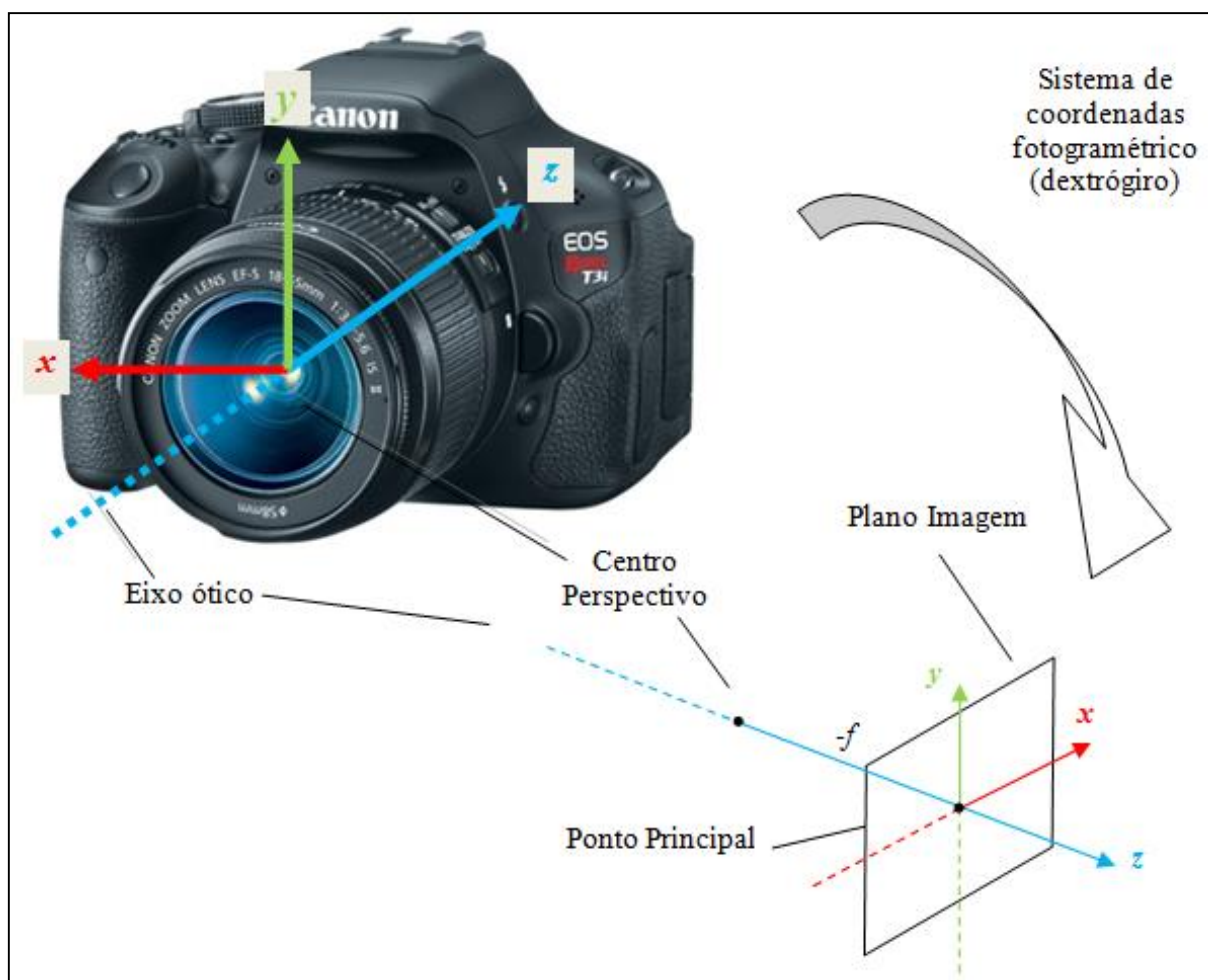


Figura 11: Sistema de coordenadas fotogramétrico.

O sistema de coordenadas da imagem digital (figura 12) relaciona-se com o fotogramétrico sobre o plano da imagem. O PP é a intersecção do eixo óptico com este plano. A origem do sistema está no canto superior esquerdo da imagem e para efeitos práticos da simulação, o centro da imagem foi considerado coincidente com o PP. Este sistema é levogiro, as unidades adotadas são linhas e colunas com mesma escala e perfeitamente ortogonais (assumido por questões de simplicidade).

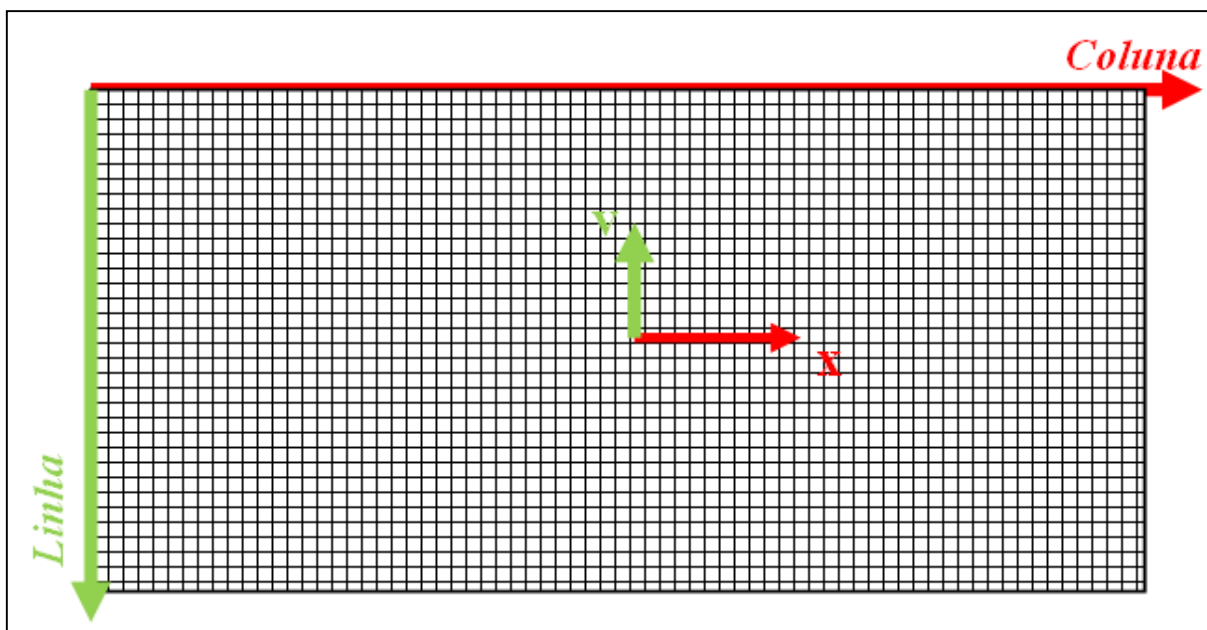


Figura 12: Sistema de coordenadas de imagem digital.

A simulação do espaço-objeto representa um seguimento de logradouro, contendo a área de pavimentação da rua, calçadas e as testadas de imóvel (paredes e grades). A origem do sistema arbitrário foi determinada no canto inferior esquerdo no início do percurso (figura 13). O sistema é dextrogiro, sendo que o eixo Y está na direção do caminhar (se visto por um observador que mira o final da rua a partir do meio da rua, representa a profundidade). O eixo Z aponta para cima e o eixo X para a direita (em relação ao sentido do caminhar). As coordenadas são dadas em metros.

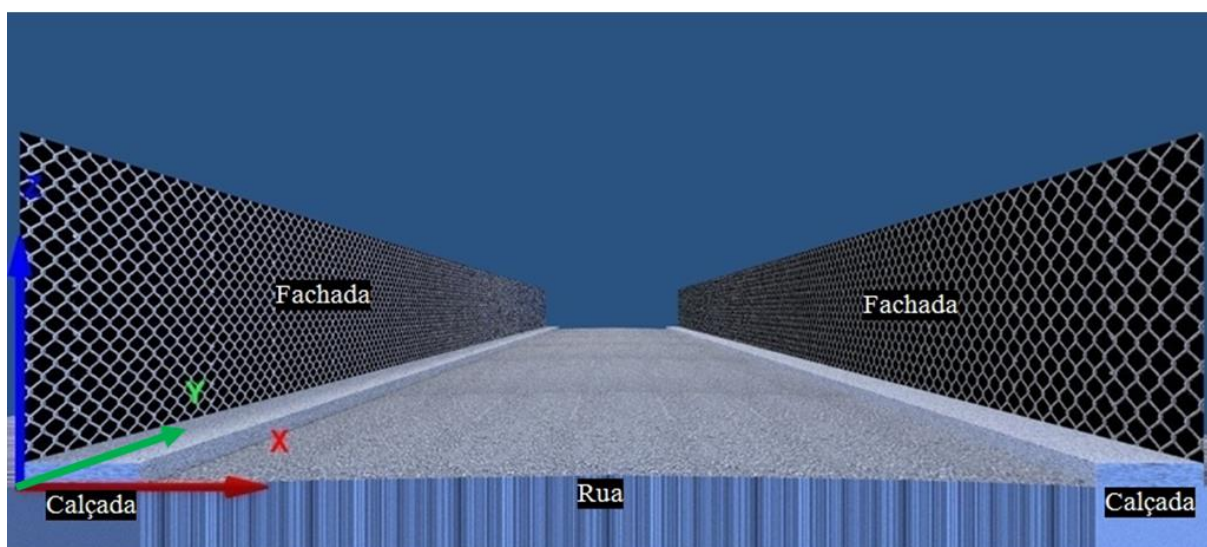


Figura 13: Ilustração do ambiente simulado e o sistema de coordenadas local.

O sistema de coordenadas do arranjo triangular de câmaras tem origem na câmara que fica ao centro do arranjo (figura 14). O eixo x fica na direção à direita da câmara de

origem, z está apontado para cima e y está na direção do caminhamento, formando um sistema dextrogiro, com coordenadas dadas em metros.

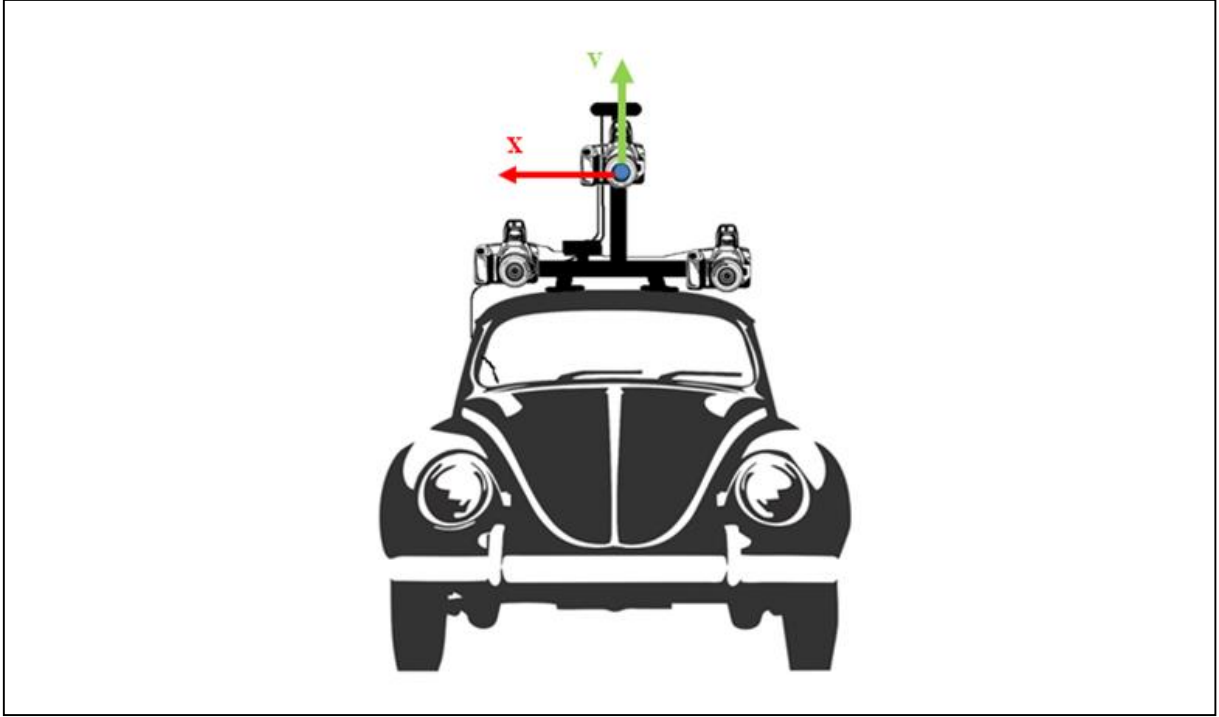


Figura 14: Arranjo de câmeras em formação triangular.

4.2.2 Delimitação da Área de Interesse e Planejamento do Levantamento

O primeiro fator a ser considerado é a delimitação de um sólido que compreenda a área a ser mapeada. Esta região de interesse pode ser delimitada por um paralelepípedo onde há recobrimento garantido das fotografias. Uma de suas faces fica de frente para as câmeras, e tem largura igual à do espaço da via que está sendo mapeado (exemplo: quinze metros para uma rua) e altura igual à média dos objetos da cena. Esta situação pode ser melhor compreendida observando-se a figura 15.

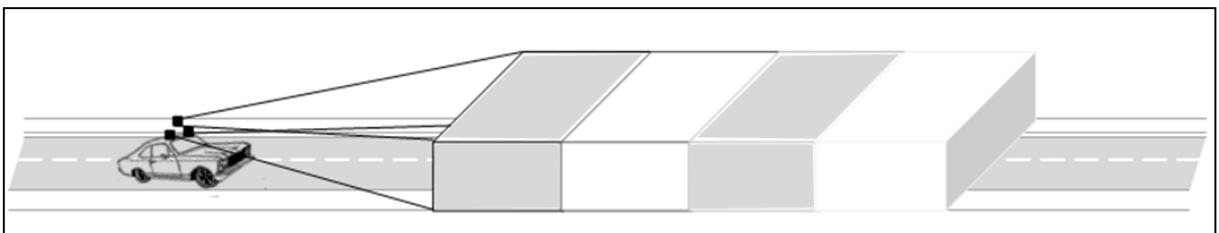


Figura 15: Paralelepípedos de recobrimento.

A terceira dimensão do sólido é dada pela profundidade (D) que deve ser

calculada, pois depende diretamente das características da câmara e da sobreposição desejada. A base (B) e o ângulo de abertura das lentes (θ) são os principais fatores envolvidos na determinação desta distância, que é dada em relação à profundidade (relativa ao modelo fotogramétrico) onde começa a existir sobreposição.

Como o formato dos quadros das câmaras digitais geralmente tem forma retangular, os ângulos de abertura podem ser verificados separadamente para cada um dos eixos no sistema de coordenadas imagem. No caso das lentes da câmara EOS Rebel t3i simulada, pode-se variar a distância focal, e assim, variar os ângulos de abertura. Os cálculos que seguem foram feitos para três configurações possíveis de distâncias principais com $f = 18\text{ mm}$, $f = 35\text{ mm}$ e $f = 55\text{ mm}$, com o quadro sensor de dimensões $14,9 \times 22,3\text{ mm}$

Mantendo-se a distância de base e a largura do espaço mapeado (considerando o caso normal da fotogrametria: câmaras com eixos óticos alinhados paralelamente, apenas com translação entre elas), pode-se utilizar a semelhança de triângulos para estabelecer a seguinte relação na horizontal:

$$Y_{inicio} = \frac{f(B + L)}{d_x} \quad (44)$$

onde Y_{inicio} é a distância onde há sobreposição completa do espaço mapeado considerando a largura do logradouro; f é a distância principal; d_x é a dimensão do quadro sensor no eixo x .

A figura 16 ilustra a situação do recobrimento na direção horizontal. Nela, pode-se ver que, para f maiores - mantendo-se fixas as outras variáveis possíveis - a profundidade na qual a sobreposição total das fotografias ocorre é maior. Pode ser verificado também que o ângulo de abertura em x está embutido na equação (44) por meio de d_x e f .

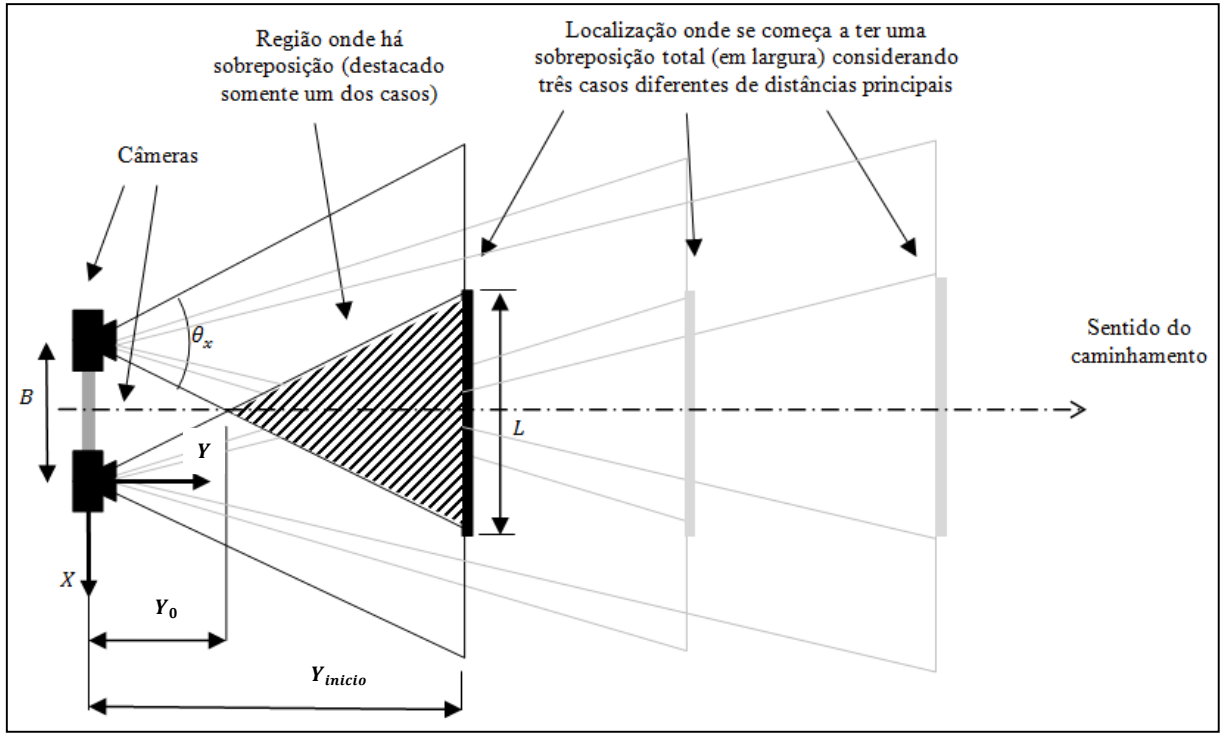


Figura 16: Recobrimento horizontal.

A profundidade é estabelecida dentro dos limites inicial e final calculados. Como $Z_{início}$ já é conhecido, a profundidade até o final (Z_{final}) é baseada nesta distância. Z_{final} será o limite inicial do próximo instante de exposição e assim sucessivamente. Novamente pela relação de proporção de triângulos, a profundidade que encerra o paralelepípedo (área de interesse) é encontrada a partir da sobreposição (s):

$$E_{final} = E_{início} \times s \quad (45)$$

Sabendo-se que a escala será formada pela proporção de f pelas distâncias até os objetos (que são as áreas das faces definidas pela largura e altura do espaço a ser mapeado), a distância da face que representa a profundidade maior permanece desconhecida. Assim, relacionando-se as escalas formadas, a equação (45) fica:

$$\frac{f}{Y_{final}} = \frac{f}{Y_{início}} \times s \quad (46)$$

que sendo rearranjada, dá a coordenada Y do final do sólido imaginário:

$$Y_{final} = \frac{Y_{inicio}}{s} \quad (47)$$

A diferença entre Y_{final} e $Y_{inicial}$ dá a distância que deve ser avançada entre as aquisições.

A Tabela 1 traz na segunda coluna os resultados obtidos para as três diferentes distâncias focais utilizadas, com uma base de 2 m e largura da área mapeada igual a 10 m.

Tabela 1: Coordenadas Y inicial, final e profundidade calculadas para paralelepípedo mapeado.

$f(mm)$	$Y_{inicio}(m)$	$Y_{final}(m)$	$\Delta Y(m)$
18	9,67	16,12	6,45
35	18,83	31,38	12,55
55	29,60	49,33	19,73

Os valores apresentados na segunda coluna da tabela 1 serão complementados pelos da terceira, que são os resultados dos cálculos para Y_{final} com uma sobreposição de 60% inter-imagens. Ainda considerando uma sobreposição de 60% entre fotografias subsequentes, como exemplo, e considerando que cada bloco é formado por três diferentes instantes, a sobreposição inter-imagens teórica entre as primeiras e a últimas imagens de uma mesma câmara será de 36%.

Analisando a tabela 1 e as características da qualidade da determinação de uma posição no caso normal, pode-se ter ideia do comportamento de cada uma das três configurações apresentadas. Com distâncias focais maiores, as profundidades relacionadas também aumentam.

Sendo a base fixa, é fácil ver que a relação base/profundidade (muito importante ao se procurar por uma maior homogeneidade nas precisões em todas as direções XYZ) fica muito prejudicada em Y na medida em que pontos localizam-se mais distantes das câmaras. A homogeneidade também é necessária quando se comparam as diferentes precisões em Y de um conjunto de pontos delimitado entre um paralelepípedo e outro. A análise parte das precisões esperadas na profundidade (KRAUS, 2007):

$$\sigma_Y = \frac{Y^2}{fB} \sigma_p \quad (48)$$

e para o plano XY:

$$\sigma_X = \frac{Y}{f} \sigma_x, \sigma_Z = \frac{Y}{f} \sigma_y \quad (49)$$

onde σ_x , σ_y e σ_p são as precisões nas medidas das coordenadas-imagem nos eixos x , y e a resultante de ambas, respectivamente.

Para as situações configuradas até este momento, foram determinadas as precisões na profundidade Y e no plano XY paralelo às imagens em $Y_{inicial}$ e Y_{final} . Os valores podem ser vistos na tabela 2. A precisão adotada para as medidas corresponde à dimensão do pixel de 0,0116 mm. É possível ver que nesta situação do arranjo de câmaras, o aumento da profundidade é severamente sentido na precisão da mesma, representando precisões de 20 a 65 vezes piores do que nas coordenadas no plano XY. Por causa da determinação do avanço por meio de proporção, a homogeneidade entre as coordenadas é menos prejudicada. A precisão de um ponto no início do paralelepípedo aproximadamente é 1,67 vezes melhor do que a de um ponto no final no caso da sobreposição inter-imagens de 80% entre instantes subsequentes ao longo do caminhamento.

Tabela 2: Precisões esperadas sobre nas profundidades inicial e final do bloco.

$f(mm)$	$Y_{inicial}$		Y_{final}	
	σ_X ou $\sigma_Y [m]$	$\sigma_Z [m]$	σ_X ou $\sigma_Y [m]$	$\sigma_Z [m]$
18	0,009	0,061	0,015	0,168
35	0,009	0,118	0,015	0,328
55	0,009	0,186	0,015	0,516

Os números apresentados sugerem o uso de uma abertura das lentes maior (distância focal menor). Eles, no entanto, não refletem a precisão obtida pela triangulação, uma vez que haverá muitas observações redundantes, que consequentemente irão melhorar estas precisões.

Dadas as condições de operação do sistema, não é possível ter o aproveitamento total da cena. A perda no recobrimento ocorre tanto na direção da altura (vertical) como da largura (horizontal) da face do paralelepípedo mapeado. Trata-se da área que deixa de ser útil, pois, ao contrário do que acontece nos levantamentos fotogramétricos terrestres convencionais, as câmaras não podem ser redirecionadas livremente a cada exposição para conter o objeto no todo.

Na direção horizontal, esta perda irá ocorrer quando o veículo estiver fora do alinhamento central do corredor formado pela via. Esta situação ocorre, por exemplo, em avenidas ou ruas com mão dupla onde o veículo deve permanecer dentro da faixa destinada ao sentido percorrido.

Certo controle é possível na direção vertical, já que de forma geral, se conhece o comportamento desta perda, pois depende principalmente da altura das câmaras em relação ao chão, da abertura das lentes e da distância onde começa haver sobreposição total do corredor. A figura 17 ajuda a compreensão desta perda de informação útil.

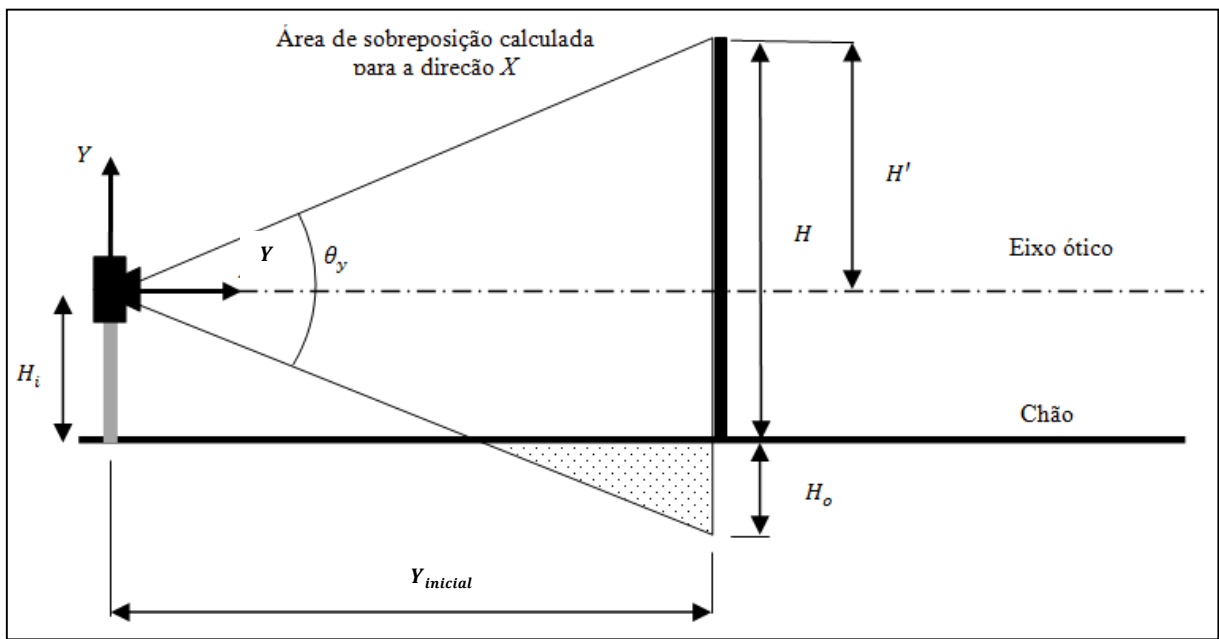


Figura 17: Perda de área útil de recobrimento.

Uma estimativa pode ser feita partindo-se de simplificações. Considerando o eixo-óptico de cada câmara perpendicular à área onde começa haver sobreposição total do paralelepípedo, é possível ver que a dimensão recoberta na vertical é a soma das bases de dois triângulos retângulos espelhados idênticos. No entanto, a base do triângulo inferior é composta de parte da altura útil (H) e outra parte é perdida por oclusão (H_o). Assim, têm-se as relações:

$$H' = H_i + H_o = H - H_i \quad (50)$$

$$\theta_y = 2 \operatorname{atan} \left(\frac{q_y}{f} \right) \quad (51)$$

então

$$\frac{q_y}{f} = \frac{(H_i + H_0)}{Y_{inicial}} = \frac{(H - H_i)}{Y_{inicial}} \quad (52)$$

rearranjando:

$$H = \frac{Y_{inicial} \cdot q_y}{f} + H_i \quad (53)$$

onde H_i é a altura da câmara em relação ao chão; q_y e θ_y são a dimensão do quadro sensor da câmara e o ângulo de abertura da lente na direção y .

A uma altura de $H_i = 2 \text{ m}$, chega-se a uma altura útil de aproximadamente 14 m em todos os três casos.

4.2.3 Simulação do Ambiente e Distribuição de Pontos de Coordenadas Conhecidas

Para a simulação do ambiente, foram distribuídos pontos de maneira uniforme e a sobreposição inter-imagens de pelo menos 60% (tabela 1), o intervalo entre exposições no sentido do caminhamento padrão foi de 5 m . A direção do caminhamento no sistema de coordenadas local apresentado no item 4.2.1 acompanha o eixo Y no mesmo sentido do eixo. A figura 18 ilustra a disposição de estações de exposição no espaço-objeto com um arranjo triangular de base igual a 2 m e espaçamento de 5 m em um percurso em linha reta de 95 m .

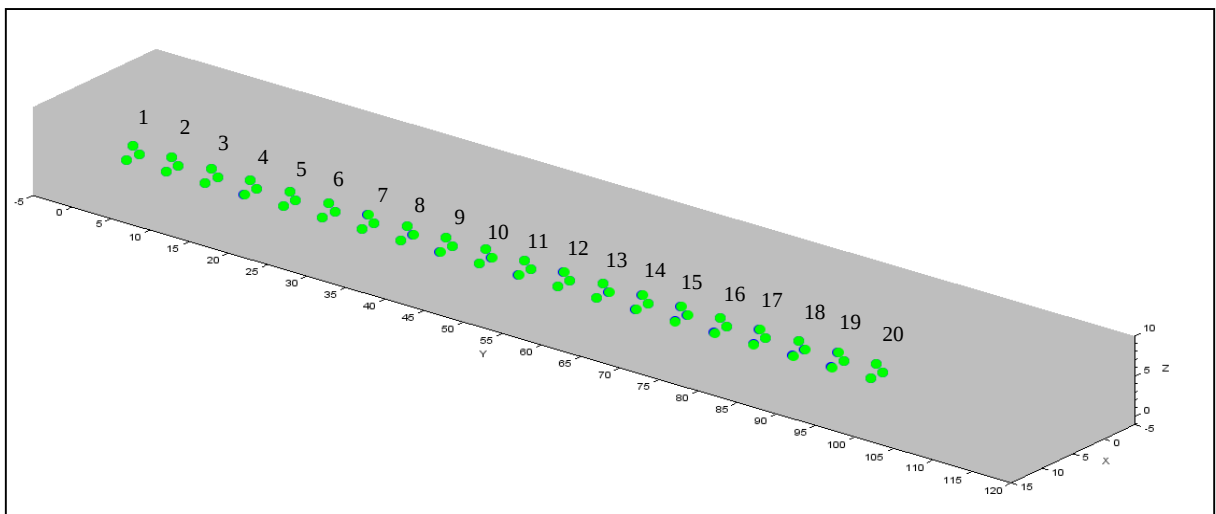


Figura 18: Distribuição das estações ao longo do logradouro em um percurso em linha reta.

A atitude das câmaras para um percurso em linha reta envolveu apenas uma

rotação de $\omega = -90^\circ$ sobre o eixo x (do sistema de coordenadas fotogramétrico para o do espaço-objeto e na ordem $\kappa\phi\omega$). As rotações indicando mudanças no plano horizontal no espaço-objeto são aplicadas sobre o eixo y do sistema fotogramétrico.

O ambiente simulou um trecho de uma rua com 100 *m* de comprimento. Visualizando o arruamento no sentido do caminhamento, foram indicados pontos notáveis que normalmente definem o ambiente. Fazendo um corte em perfil, como o visto na figura 19, podem ser destacados os pontos que definem o arruamento, calçadas e fachadas.

A partir destas considerações, foram definidas as coordenadas dos pontos a serem extraídos nas imagens, cuja codificação reflete a posição em relação ao logradouro (arruamento, calçada, testada) e a posição ao longo da trajetória (sequência que se inicia em 01 e vai até 20, contados a cada 5 *m*):

- Centro da rua (ARR_C: vinte pontos distribuídos ao longo do eixo Y espaçados a cada 5 *m*; coordenada X = 5 *m*; coordenada Z = 0 *m*);
- Sarjeta à esquerda e à direita (ARR_E e ARR_D: vinte pontos distribuídos ao longo do eixo Y espaçados a cada 5 *m*; coordenada X = 1 *m* ou X = 9 *m*; coordenada Z = 0 *m*);
- Limite inferior da testada dos imóveis à direita e à esquerda (CAL_E e CAL_D: vinte pontos distribuídos ao longo do eixo Y espaçados a cada 5 *m*; coordenada X = 0 *m* ou X = 10 *m*; coordenada Z = 0 *m*);
- Limite superior da testada dos imóveis (FAC_E e FAC_D: vinte pontos distribuídos ao longo do eixo Y espaçados a cada 5 *m*; coordenada X = 0 *m* ou X = 10 *m*; coordenada Z = 3 *m*);

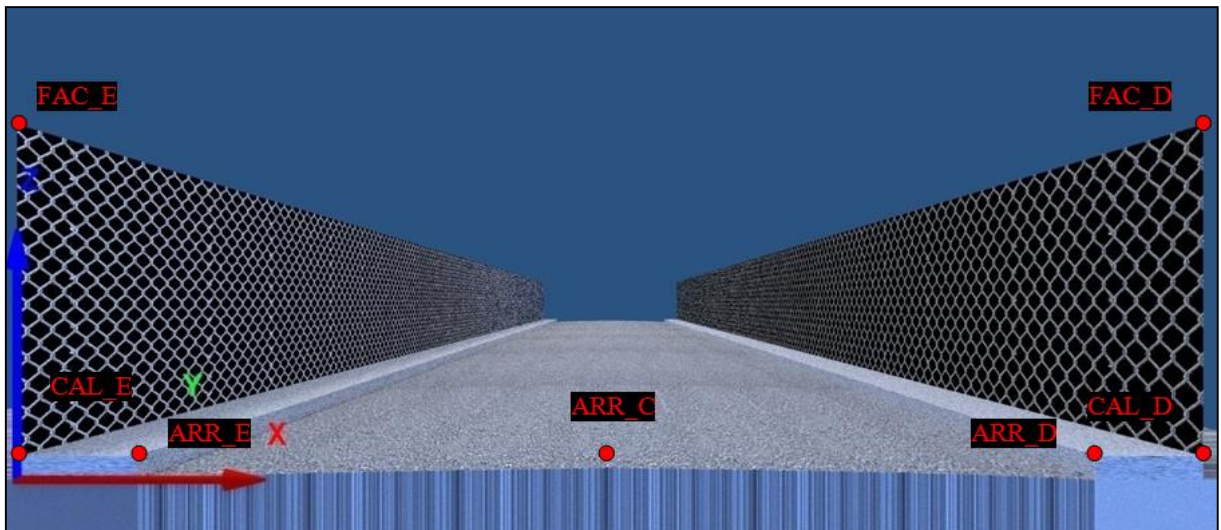


Figura 19: Ilustração do perfil a ser descrito no ambiente simulado.

A distribuição destes pontos ficou conforme o mostrado na figura20.

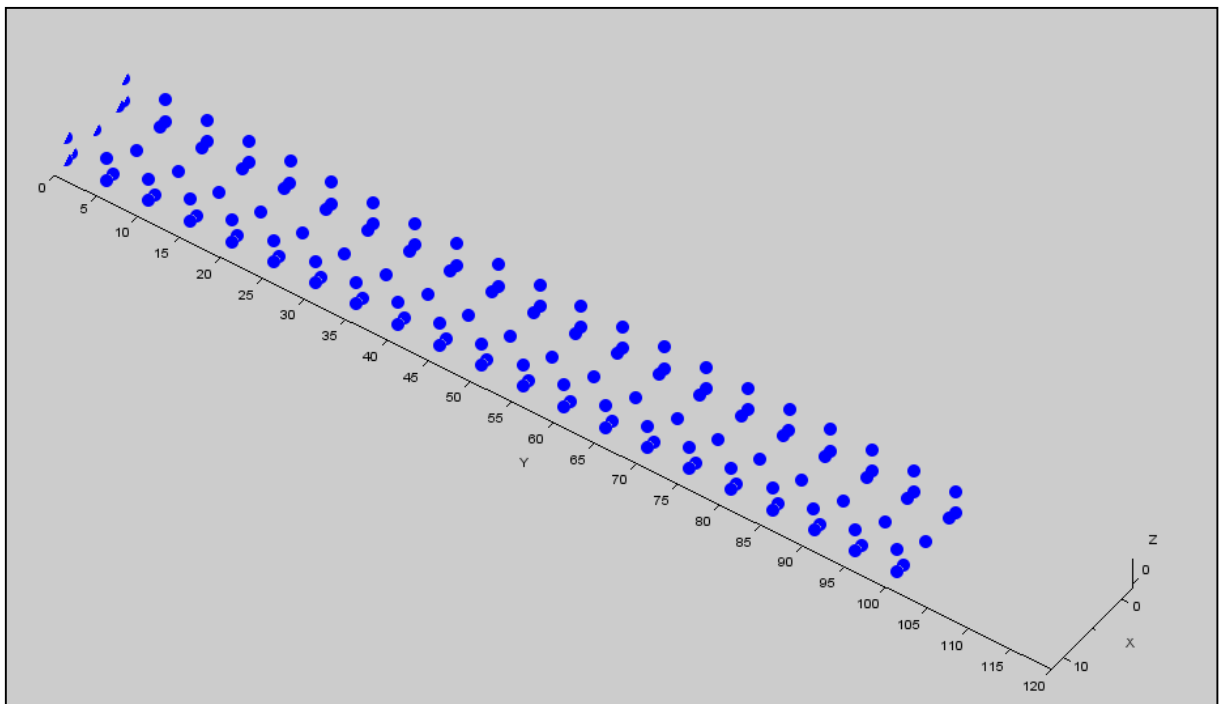


Figura 20: Distribuição dos pontos ao longo do logradouro.

As coordenadas-imagem dos pontos foram obtidas pela transformação de colinearidade na forma inversa. Em seguida, eles foram transformados para um sistema de coordenadas de imagem digital, considerando os parâmetros nominais da câmara Cannon EOS t3i simulada neste trabalho.

O comportamento aleatório das observações foi simulado introduzindo-se um erro proposital com magnitude de até 1σ . O programa utiliza uma função randômica de forma que

as coordenadas x e y sobre o plano-imagem são dadas por:

$$\begin{aligned}x_{\varepsilon} &= x + \sigma \times F(R) \\y_{\varepsilon} &= y + \sigma \times F(R)\end{aligned}\tag{54}$$

onde $F(R)$ é uma função randômica.

Na figura 21 é ilustrada a distribuição dos pontos visíveis sobre a imagem simulada. Neste caso, as coordenadas simuladas já se encontram no sistema de coordenadas da imagem digital e eivadas de erros aleatórios. Não foram simulados (introduzidos) erros sistemáticos de distorção das lentes, deslocamento do ponto principal, distorção descentrada e não ortogonalidade entre os eixos de coordenadas.

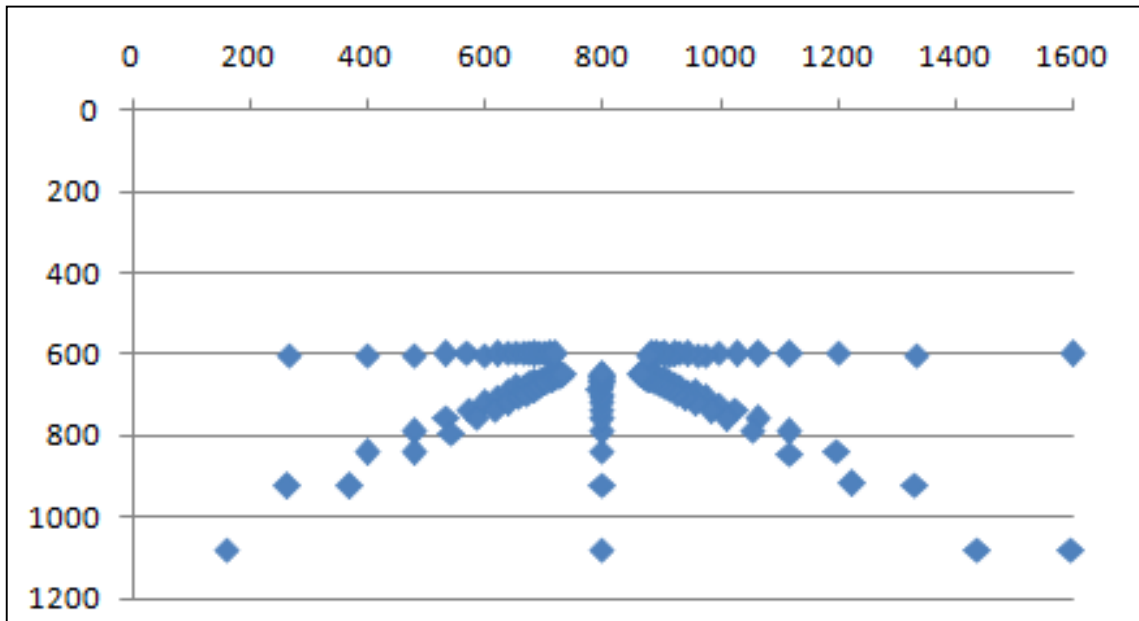


Figura 21: Pontos simulados em uma imagem digital.

A fototriangulação realizada foi apoiada apenas em pontos de enlace, cabendo a definição do *datum* à fixação da posição das câmaras no primeiro evento. Em um sistema implementado, este papel pode ser atribuído a outros sensores de posicionamento como o GNSS ou definindo-se sistemas de coordenadas arbitrários com origem no sistema de câmaras.

É importante destacar que em aplicações práticas deve ser tomado cuidado antes de se fixar a orientação das câmaras, levando-se em conta que cada evento de disparo de câmaras não ocorre de maneira perfeitamente simultânea. Assim, para um veículo em

movimento, a orientação relativa não é válida e fica pior quanto maior for a velocidade do veículo em relação ao sistema de coordenadas do espaço-objeto. Como exemplo, pode-se considerar uma diferença de disparo de 0,01 s entre duas câmaras que correm lado a lado apontadas paralelamente à direção do movimento, em uma velocidade de 50 km/h. O vetor de deslocamento entre a posição relativa no sistema do arranjo (relativo entre câmaras) e a posição relativa no sistema local em vetor é de 13,8 *cm* neste caso.

Considerando a grande variação de escala ocasionada pela proximidade dos objetos da cena, esta diferença pode ser significativa ao se considerar a orientação relativa das câmaras na determinação das coordenadas tridimensionais de feições adquiridas por intersecção fotogramétrica. Por entender que este problema demanda um estudo à parte, a introdução da orientação relativa entre as câmaras como forma de injunção na fototriangulação foi desconsiderada para este trabalho.

5 EXPERIMENTOS

Foram elaborados nove experimentos de forma que se pudesse destacar as características que influenciam a qualidade do CF. A análise destas variáveis visa destacar os ajustes necessários ao planejamento de um levantamento deste tipo. Foram adotados valores-padrão que refletem aspectos práticos em torno do material simulado bem como de valores teóricos explorados nos capítulos 2 a 4.

Quando não mencionado, os seguintes valores-padrão foram adotados no processamento:

- Distância focal: 35 *mm*;
- Dimensão da base: 2 *m* , com origem do arranjo na câmara C $\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_C$, sendo os seguintes vetores de translação: Câmara A $\begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ -1,5 \end{bmatrix}_{AC}$; Câmara B $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1,5 \end{bmatrix}_{BC}$);
- Distância entre tomadas subsequentes: 5 *m*;
- Critério de convergência: 0,0000001;
- Número máximo de iterações: 30;
- Deslocamento entre o PP e o centro da imagem: $(x_0, y_0) = (0; 0)$ *mm*;
- Parâmetros de distorção radial simétrica: $k_1 = 0; k_2 = 0; k_3 = 0$;
- Parâmetros de distorção descentrada: $p_1 = 0; p_2 = 0$;
- Parâmetros de não ortogonalidade: $A = 0; B = 0$;
- Dimensão do pixel: 0,011615 *mm*
- Dimensão da imagem (em pixels): 1920 x 1280 *pixels*;
- Injunção de distância: não
- Sistema reponderar observações (detecção-localização-tratamento): sim;
- Janela de processamento: 3 eventos;
- Avanço de base: 1 evento.

5.1 Processamento em Lote Versus Sequencial

No processamento em lote há maior quantidade de observações a serem ajustadas, pois existem mais estações de exposição. Em algumas situações, todas as imagens podem ser

inter-relacionadas por meio dos raios perspectivos, como é o caso de levantamentos fotogramétricos, com imagens convergindo para um mesmo objeto ao centro do espaço-objeto.

Esperava-se que, no processamento sequencial, as observações envolvendo apenas estações próximas umas das outras fizessem com que o custo computacional e a complexidade do modelo de ajustamento formado fossem menores. Como visto na seção 3.1, a qualidade final do ajustamento das posições depende, principalmente, da geometria da rede e da redundância de informações. Esta última é onerosa e deve ser reduzida a um número mínimo possível em termos de otimização. Por outro lado, a geometria deve ser tão boa o quanto possível, de forma que possibilite uma solução robusta.

No entanto, o CF em sua concepção original com pares estereoscópicos vai na contramão destes conceitos. Considerando um percurso retilíneo (uma autoestrada, por exemplo), o ajustamento de observações em uma reta seria hiper-redundante, e ainda assim, os erros nas observações no sentido transversal à base (na direção vertical a redundância média $R_i(y)$) seria próxima de 0. Esta situação deveria ser melhorada com a introdução da terceira câmara cuja posição no espaço não fosse correlacionada ao par.

Com o CF apoiado somente em pontos de enlace, o processamento sequencial certamente acumularia erros ao longo da trajetória realizada pelo arranjo de câmaras. O experimento comparando os arranjos de par estereoscópico com o triangular teve como objetivo expor o quanto isto ocorreu, mostrando os efeitos no ajuste da orientação exterior das estações de exposição bem como na determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos de enlace. Estes últimos eram esperados para serem os mais sensíveis, pois dada a relação de escala entre exposições subsequentes, os erros cometidos nas observações seriam propagados para o espaço-objeto proporcionalmente à escala.

O experimento foi realizado utilizando-se a configuração padrão, vista no início do capítulo 5, para ambos os casos (lote e sequencial), com um percurso de 95 m em linha reta.

A quantidade de iterações no processamento pode ser vista na tabela 3. Nota-se na segunda coluna que o processamento em lote teve uma quantidade de iterações ligeiramente maior do que cada sequência da série. É notável que o custo computacional neste caso foi maior no caso do processamento em lote, mas ao somar todas as iterações do processamento sequencial, nota-se que o custo computacional é reduzido apenas quando se tem grande quantidade de observações. É possível notar também que no processamento em lote a

controlabilidade (R_i) foi superior a todos os resultados oriundos dos processamentos sequenciais. A maior quantidade de observações (n) em relação à quantidade de parâmetros incógnitos pôde ser notada pela redundância dos modelos (r) e as redundâncias médias nas direções x e y das fotografias. Entretanto, ela não pode ser considerada conclusiva no caso destes experimentos, já que a quantidade de observações ficou limitada pelos pontos-objeto e o campo de visão das câmaras (havia menos pontos a se observar, conforme o levantamento avançava).

Tabela 3: relatório do processamento em lote.

Processamento	Iterações	n	r	$\hat{\sigma}_0^2$	$R_i(x)$	$R_i(y)$
Lote	6	6974	6295,000	0,333	0,895	0,910
Seq. 01	5	2094	1689,000	0,327	0,795	0,818
Seq. 02	5	1968	1589,449	0,324	0,796	0,820
Seq. 03	5	1842	1847,692	0,316	0,795	0,820
Seq. 04	5	1718	1385,080	0,332	0,794	0,819
Seq. 05	5	1592	1279,881	0,340	0,791	0,817
Seq. 06	5	1464	1169,666	0,329	0,786	0,811
Seq. 07	5	1338	1067,638	0,324	0,785	0,811
Seq. 08	4	1218	968,550	0,318	0,782	0,809
Seq. 09	4	1104	869,436	0,329	0,774	0,802
Seq. 10	5	982	768,135	0,338	0,768	0,797
Seq. 11	5	854	663,784	0,336	0,762	0,793
Seq. 12	4	728	555,462	0,339	0,747	0,779
Seq. 13	4	586	437,292	0,326	0,730	0,763
Seq. 14	4	452	324,379	0,309	0,704	0,731
Seq. 15	5	324	220,109	0,319	0,666	0,693
Seq. 16	4	204	116,949	0,323	0,558	0,588
Seq. 17	4	94	39,810	0,295	0,398	0,449
Seq. 18	3	22	2,345	0,196	0,000	0,213
Seq. 19	1	4	0,000	0,000	0,000	0,000

Na tabela 4 são mostrados os EMQ das estações de exposição ajustadas por processamentos em lote e sequencial. Elas apresentaram pouca discrepância em relação à dimensão do espaço-objeto mapeado. Também houve grande estabilidade nos ângulos de atitude. A partir dos resultados apresentados, não há razão para crer que as diferenças sejam significativas para as estações de exposição. O comportamento visto na figura 22 confirma esta afirmação, mas mostram que o EMQ das estações ajustadas no final do percurso é menor no caso sequencial.

Tabela 4: EMQ das estações de Exposição no experimento de ajustamento em lote e sequencial.

Processamento	ω [°]	φ [°]	κ [°]	X_L [m]	Y_L [m]	Z_L [m]
Lote	0,010	0,008	0,014	0,003	0,016	0,004
Sequencial	0,011	0,008	0,022	0,003	0,011	0,004



Figura 22: Processamento em lote (a) e sequencial (b) – Erro médio quadrático entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas das estações de exposição ao longo do percurso.

Na figura 23 são mostrados os vetores representando a discrepância entre a posição real e a ajustada em ambos modos de processamento. As colunas de dois a quatro representam as discrepâncias em ângulos de Euler, enquanto que da quinta à sétima colunas representam a discrepância nas posições das estações. Pode-se notar que, proporcionalmente ao caminhar, o erro apresentado foi tão pequeno que somente em alguns casos é possível visualizar a discrepância. Por isto, este tipo de análise não foi representada de forma gráfica nos outros experimentos.

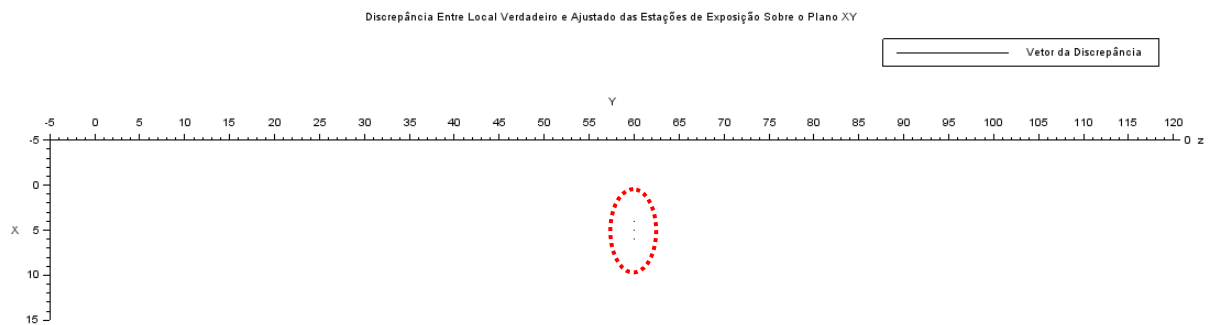


Figura 23: Processamento em lote - Discrepâncias entre as posições verdadeiras e ajustadas das estações de exposição no espaço-objeto (a) projetadas sobre o plano horizontal XY.

O ajustamento dos pontos de enlace não trouxe resultados tão estáveis e bem comportados como os das estações de exposição. Na tabela 5 é possível notar a grande diferença de EMQ entre os eixos X, Y e Z. Sabendo-se que Y foi o sentido do caminhamento, percebe-se que o erro propagado para a profundidade é em torno de 20 a 40 vezes maior do que o encontrado para os eixos X e Z, respectivamente. Neste caso, nota-se que há diferenças na qualidade para os dois tipos de processamento, sendo que a do ajustamento em lote apresenta qualidade cerca de 20% melhor do que a sequencial.

Tabela 5: EMQ dos pontos de enlace do experimento com processamento em lote e sequencial.

Processamento	X [m]	Y [m]	Z [m]
Lote	0,118	2,098	0,040
Sequencial	0,143	2,582	0,050

Na figura 24 são mostrados os EMQ ao longo do caminhamento. Nota-se que até os 15 m do percurso este valor é igual a zero. Isto se deve ao fato de que os pontos que estivessem a uma distância menor do que esta não foram observados ou, se observados, não apareceram em mais de uma imagem (requisito necessário para a introdução de um ponto de enlace na fototriangulação). Os pontos de 15 m a 95 m ajustados mostram os efeitos do acúmulo de erros propagados. Apesar do comportamento aleatório visto, verifica-se que há um crescente desvio, sobretudo na direção do caminhamento.



Figura 24: Processamento em lote e sequencial – Erro médio quadrático entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas dos pontos de enlace ao longo do percurso.

Os desvios crescentes ao longo do caminharmento podem ser melhor analisados visualizando-se a figura 25 para o ajustamento em lote e na figura 26 para o ajustamento sequencial. Olhando-se sobre os planos horizontal e vertical é possível ver que a tendência do erro de posicionamento ocorreu principalmente na direção do caminharmento, com leve tendência para fora do eixo do levantamento (sobre o eixo X).

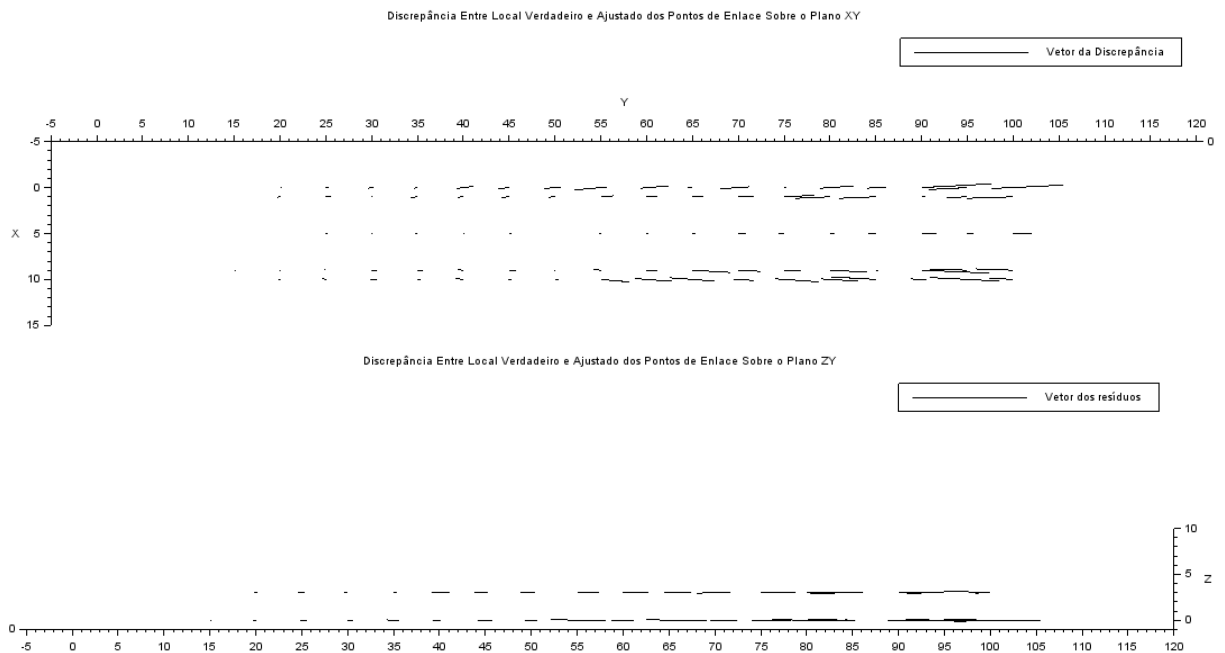


Figura 25: Processamento em lote - Discrepâncias entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas dos pontos de enlace no espaço-objeto (a) projetadas sobre o plano horizontal XY e (b) sobre o plano vertical YZ.

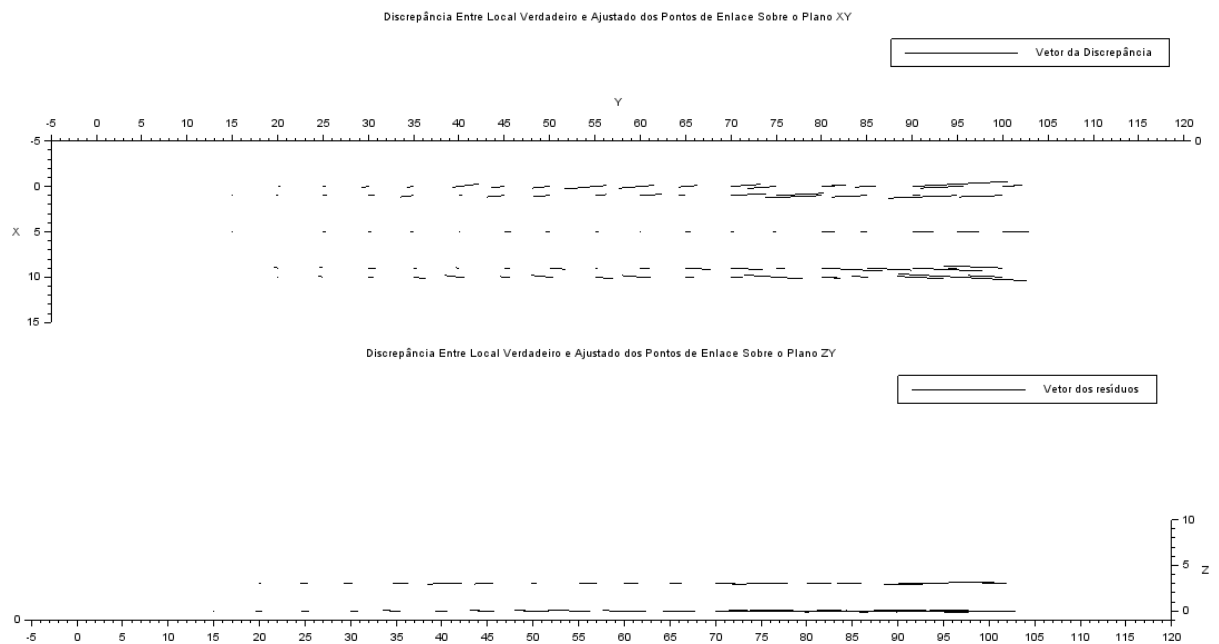


Figura 26: Processamento sequencial - Discrepâncias entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas dos pontos de enlace no espaço-objeto (a) projetadas sobre o plano horizontal XY e (b) sobre o plano vertical YZ.

5.2 Tamanho de Janelas de Processamento

O processamento sequencial divide o a triangulação em sub-blocos, contendo uma determinada quantidade de eventos. O evento neste caso é a tomada de fotografia e em cada

um deles são adicionadas ao levantamento três novas fotografias, que é o número de câmaras do arranjo.

O experimento foi realizado utilizando-se a configuração padrão para as câmaras e o arranjo, de forma que se percorre um trajeto retilíneo de 95 *m* ao longo do logradouro (figura 18). Foram avaliadas três dimensões para as janelas de processamento: 2, 3 e 4 instantes. O intuito era explorar o comportamento relacionado à dimensão das janelas. A expectativa era de que janelas maiores resultassem melhor qualidade de ajustamento, mas também gerassem um volume muito maior a ser processado.

As estações de exposição ajustadas apresentaram pouco deslocamento, se comparadas à dimensão do espaço-objeto mapeado. No entanto, como mostrado na tabela 6, é possível notar uma sensível diferença na qualidade dos parâmetros estimados, que foram consideravelmente maiores no processamento com janela de dois eventos (em torno de 25% em relação aos processamentos com três e quatro eventos).

Tabela 6: EMQ dos parâmetros das estações de exposição do experimento com janelas de processamento diferentes.

Processamento	ω [°]	φ [°]	κ [°]	X_L [m]	Y_L [m]	Z_L [m]
Janela 2, AvB 1	0,015	0,010	0,035	0,004	0,019	0,005
Janela 3, AvB 1	0,011	0,008	0,022	0,003	0,011	0,004
Janela 4, AvB 1	0,011	0,008	0,018	0,003	0,014	0,004

As figuras 26 e 27 mostram comportamento semelhante ao longo do caminharmento, mas com destaque para o processamento com duas janelas, que teve mais erro em relação aos demais.



Figura 27: Processamento com janelas de quatro (a) e dois (b) eventos e avanço de base de 1 evento – Erro médio quadrático entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas estações de exposição ao longo do percurso.

Os efeitos sobre a qualidade dos pontos de enlace não foram sentidos com relação à quantidade de eventos processados por janela. Isto pode ser observado na tabela 7 em que os números apresentados para o EMQ das coordenadas dos pontos de enlace é o mesmo para as três janelas de processamento diferentes. Da mesma forma, se pôde observar na figura 27.

Tabela 7: EMQ dos pontos de enlace do experimento com janelas de processamento diferentes.

Processamento	$X [m]$	$Y [m]$	$Z [m]$
Janela 2, AvB 1	0,143	2,582	0,050
Janela 3, AvB 1	0,143	2,582	0,050
Janela 4, AvB 1	0,143	2,582	0,050

5.3 Quantidade de Avanços de Base

Toda fototriangulação precisa ter o problema da determinação do *datum* bem resolvido. Isto é feito ao fornecer coordenadas no espaço-objeto bem definidas e confiáveis (peso grande), bem como pode ser complementado com injunções de ângulos e distâncias. O primeiro bloco da sequência teve as posições das câmaras fixadas em relação ao espaço-objeto no primeiro instante. As posições restantes foram estimadas pela fototriangulação sem pontos de apoio. O bloco seguinte, para ter o conceito de janela formada, precisava das informações do bloco anterior para que estes estivessem interligados, formando um processamento retroalimentado.

A quantidade de eventos que podem ser avançados depende da dimensão da janela. Pode-se estimar as coordenadas das câmaras de um evento descartando-se o evento inicial de um bloco, como também se pode calcular um bloco inteiro a partir das informações ajustadas num bloco anterior (desde que se consiga resolver o problema de datum, que precisa definir sete parâmetros: três de translação, um de escala e três de rotação; isto não seria possível, por exemplo, utilizando apenas uma câmara por evento).

No experimento de avanços de base (*AvB*) foram testadas as quantidades de eventos que poderiam ser avançadas em uma janela de quatro eventos. Assim, foram realizados processamentos do levantamento de um percurso retilíneo de 95 utilizando a configuração padrão de câmaras e arranjo. Os avanços de base foram de um, dois e três eventos. Espera-se que avanços menores resultem em estimativas melhores, mas a custo de grande processamento. Foi avaliada a perda de qualidade frente à diminuição de processamento.

Sobre as estações de exposição os resultados do processamento utilizando diferentes avanços de base não foram conclusivos, pois não se pôde observar efeitos sobre os parâmetros ajustados (tabela 8)

Tabela 8: EMQ das estações de exposição do experimento com avanço de bases diferentes.

Processamento	ω [°]	φ [°]	κ [°]	X_L [m]	Y_L [m]	Z_L [m]
Janela 4, AvB 1	0,011	0,008	0,018	0,003	0,014	0,004
Janela 4, AvB 2	0,010	0,008	0,018	0,004	0,014	0,004
Janela 4, AvB 3	0,013	0,008	0,020	0,003	0,006	0,005

Os gráficos da figura 28 mostram que o comportamento do EMQ não sofre grande influência, bem como não há grandes discrepâncias entre os resultados da fototriangulação e

os valores reais dos parâmetros.



Figura 28: Processamento com janelas de 4 eventos e avanço de base de dois (a) e (b) eventos – Erro médio quadrático entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas estações de exposição ao longo do percurso.

Assim como para as estações de exposição, os resultados que seguem apresentados na tabela 9 mostram que o avanço de base não refletiu em qualquer efeito sobre a qualidade das coordenadas dos pontos de enlace.

Tabela 9: EMQ dos pontos de enlace do experimento com avanço de bases diferentes.

Processamento	X [m]	Y [m]	Z [m]
Janela 4, AvB 1	0,143	2,582	0,050
Janela 4, AvB 2	0,143	2,582	0,050
Janela 4, AvB 3	0,143	2,582	0,050

5.4 Distância Focal das Câmaras

A mudança na distância focal das câmaras é uma alteração crítica, já que dela derivam muitas outras características do levantamento. Ao alterá-la, também são alteradas escala, o campo de visão, a resolução angular, fatores impactam o relacionamento das câmaras em relação ao ambiente, à rede geométrica e até mesmo a correspondência de imagens.

O experimento sobre as variações na distância focal fez a comparação entre os levantamentos com câmaras com distâncias focais de 18 *mm* e 45 *mm*. Era esperado que a melhor resolução angular refletisse em melhores estimativas de posição, trazendo-se como desvantagem a diminuição do campo de visão das câmaras. Todas as outras características foram mantidas.

O comportamento em relação à maior distância focal não foi confirmado por completo. Deve-se observar que foram estimados os parâmetros de estações até a posição 17 (80 *m* de caminamento), devido ao menor campo de visão das câmaras com 45 *mm* de distância focal. Observando-se na tabela 10, é possível ver que para quase todos os parâmetros há uma ligeira perda de qualidade, exceto para a profundidade sobre o eixo Y, onde há significativa melhora.

Tabela 10: EMQ das estações de exposição do experimento com câmaras de diferentes distâncias focais.

Processamento	ω [°]	φ [°]	κ [°]	X_L [m]	Y_L [m]	Z_L [m]
$f = 18 \text{ mm}$	0,007	0,009	0,014	0,002	0,035	0,002
$f = 45 \text{ mm}$	0,009	0,009	0,015	0,004	0,020	0,004

O comportamento da propagação de erros visto na figura 29 apresenta maior consistência com a distância focal menor (maior ângulo de abertura).

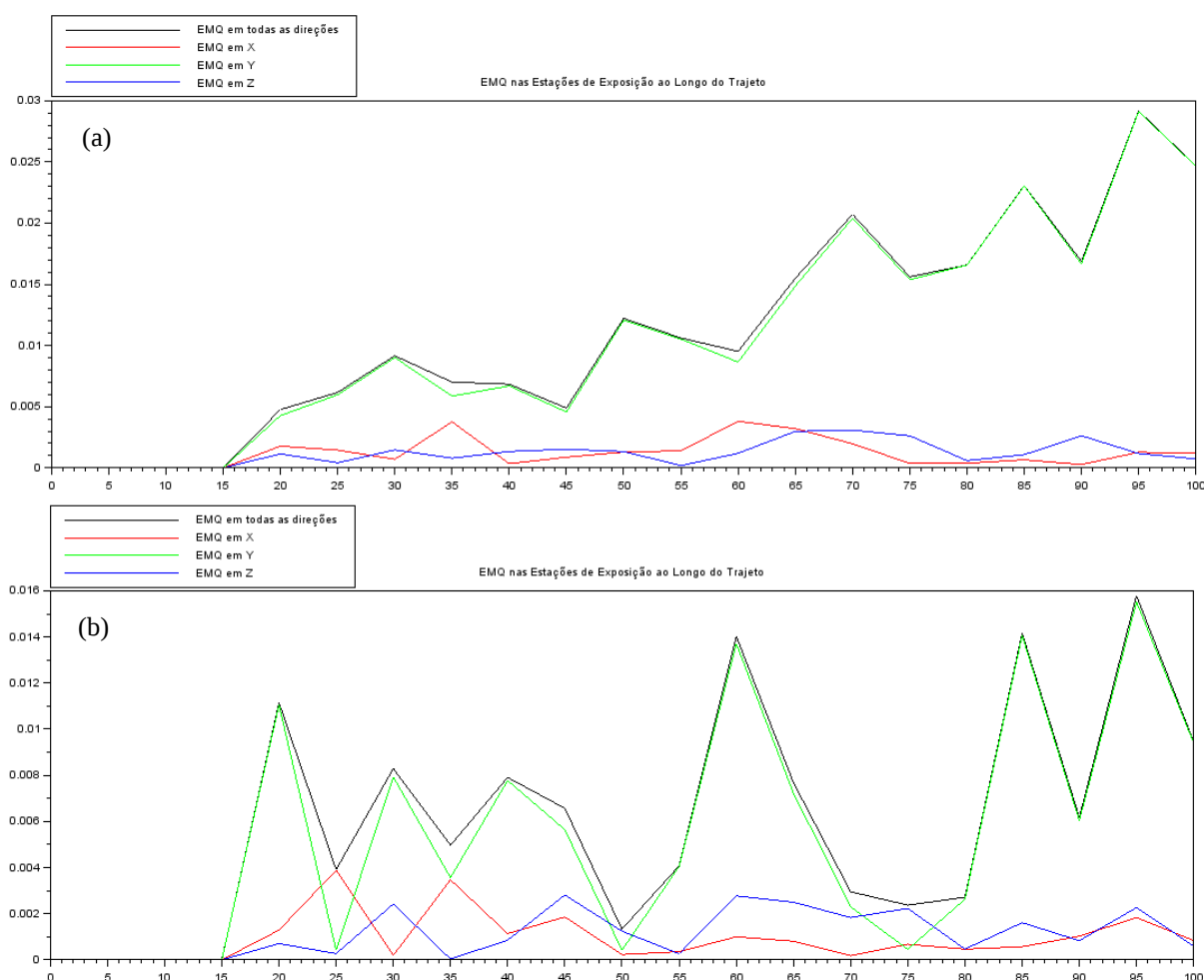


Figura 29: Processamento com câmaras com distância focal de 18 mm e 45 mm – Erro médio quadrático entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas estações de exposição ao longo do percurso.

A mudança de distância focal refletiu em melhor qualidade posicional para os pontos de enlace no caso da distância focal de 45 mm. Isto pode ser confirmado olhando-se a tabela 11 onde há uma melhora de aproximadamente 60% na acurácia das coordenadas, proporcional ao aumento da distância focal.

Tabela 11: EMQ dos pontos de enlace do experimento com diferentes distâncias focais.

Processamento	X [m]	Y [m]	Z [m]
$f=18\text{ mm}$	0,224	3,982	0,076
$f=45\text{ mm}$	0,093	1,668	0,032

O efeito e suas proporções sobre o terreno podem ser vistos comparando-se as figuras 30 e 31, cujo resultado representa as discrepâncias das coordenadas em relação ao seu valor real para as câmaras com distância focal de 18 mm na figura 30, e a figura 31 que traz os

resultados para as câmaras com distância focal de 45 mm. É possível notar o grande efeito de redução no deslocamento entre a posição real e verdadeira conforme foi aumentada a distância focal das câmaras.

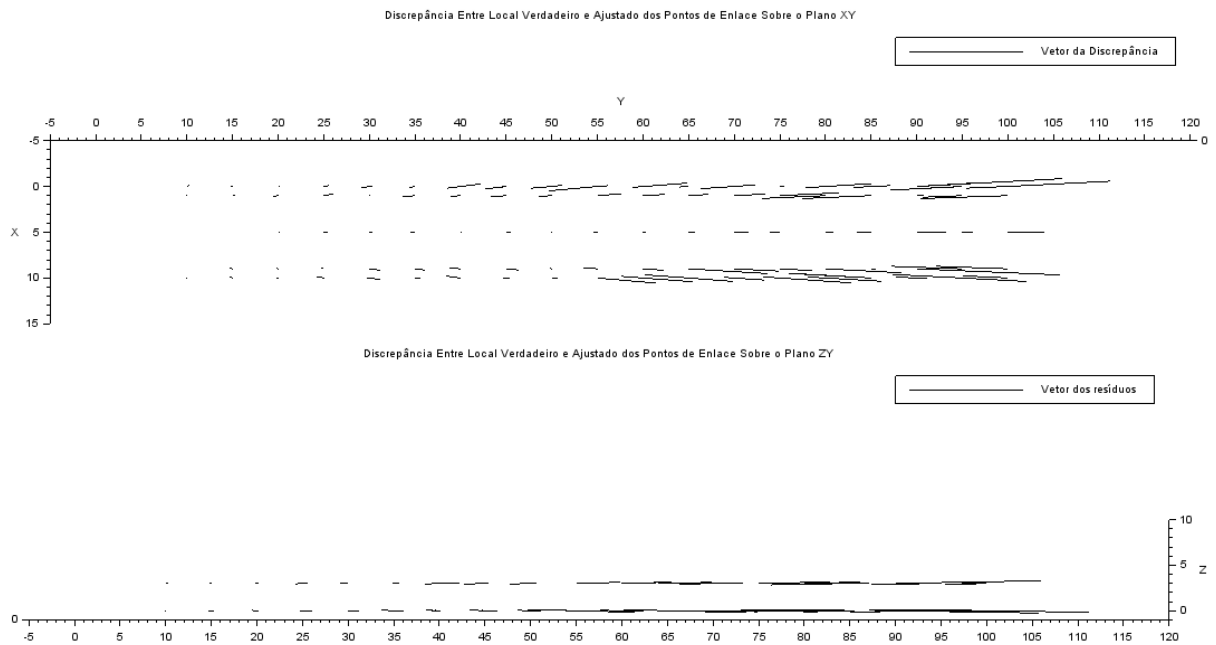


Figura 30: Processamento com câmaras com distância focal de 18 mm - Discrepâncias entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas dos pontos de enlace no espaço-objeto (a) projetadas sobre o plano horizontal XY e (b) sobre o plano vertical YZ.

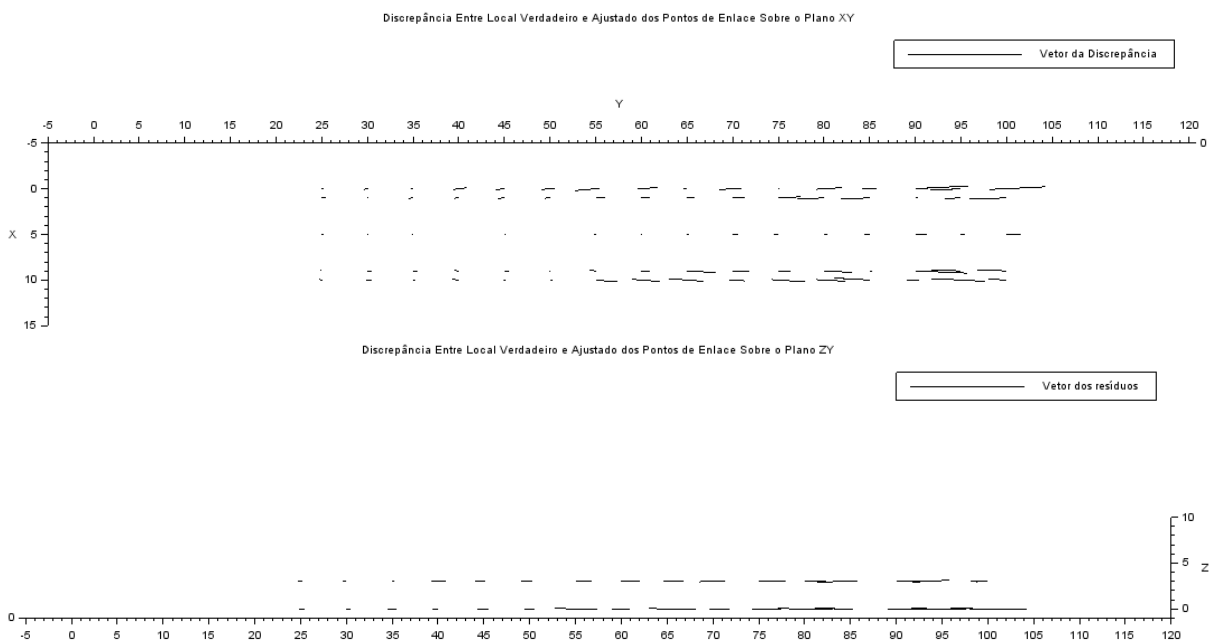


Figura 31: Processamento com câmaras com distância focal de 45 mm - Discrepâncias entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas dos pontos de enlace no espaço-objeto (a) projetadas sobre o plano horizontal XY e (b) sobre o plano vertical YZ.

5.5 Distanciamento Entre Câmaras no Arranjo

A separação entre as câmaras no arranjo, sobretudo para as fotos tiradas em um mesmo instante, influencia diretamente na geometria da rede. Quanto mais os ângulos de incidência se aproximam de 90° , melhor tende a ser o resultado das coordenadas estimadas para os pontos no espaço-objeto, que ao servirem como pontos de apoio, maior é a dependência do ajustamento em relação à qualidade destas coordenadas.

Esta característica, no entanto, pode ser ou não sensível de acordo com a proporção e as limitações que o ambiente proporciona. Foram testados arranjos cuja base (formada pelas 2 câmaras da parte inferior) eram de 1 e 2 metros, respectivamente. A distância vertical da terceira câmara (parte superior) também foi alterada proporcionalmente, sendo de 1 e 1,5 metros, respectivamente. Estas dimensões foram baseadas em aspectos práticos de montagem de câmaras sobre um veículo.

Foi avaliada neste experimento a sensibilidade da rede fotogramétrica relação à separação das estações de exposição.

Olhando-se a tabela 12 é possível notar que a alteração do distanciamento entre as câmaras causou grande mudança de comportamento na determinação do posicionamento das estações de exposição ao longo do caminhar, em que houve uma melhora de cerca de 80% ao se dobrar o distanciamento entre as câmaras da base. Pode ser notada também uma redução na qualidade da determinação do ângulo kapa. Entretanto, este comportamento pode ser explicado pela maior instabilidade do arranjo em estabelecer relações fortes de geometria sobre a rede.

Tabela 12: EMQ dos pontos de enlace do experimento diferentes distâncias de base.

Processamento	ω [°]	φ [°]	κ [°]	X_L [m]	Y_L [m]	Z_L [m]
B =1 m	0,010	0,007	0,013	0,003	0,051	0,004
B =2 m	0,010	0,008	0,021	0,003	0,010	0,004

O EMQ das estações do arranjo com base de um metro (figura 32) tem comportamento mais consistente e uniforme do que o da base com dois metros. Isto pode ser explicado pela maior dificuldade em se conseguir correspondências entre imagens com pontos que formem ângulos de intersecção relativamente mais próximos a 90° . Com as câmaras mais próximas, fica mais fácil de conseguir realizar a correspondência intra-imagens.

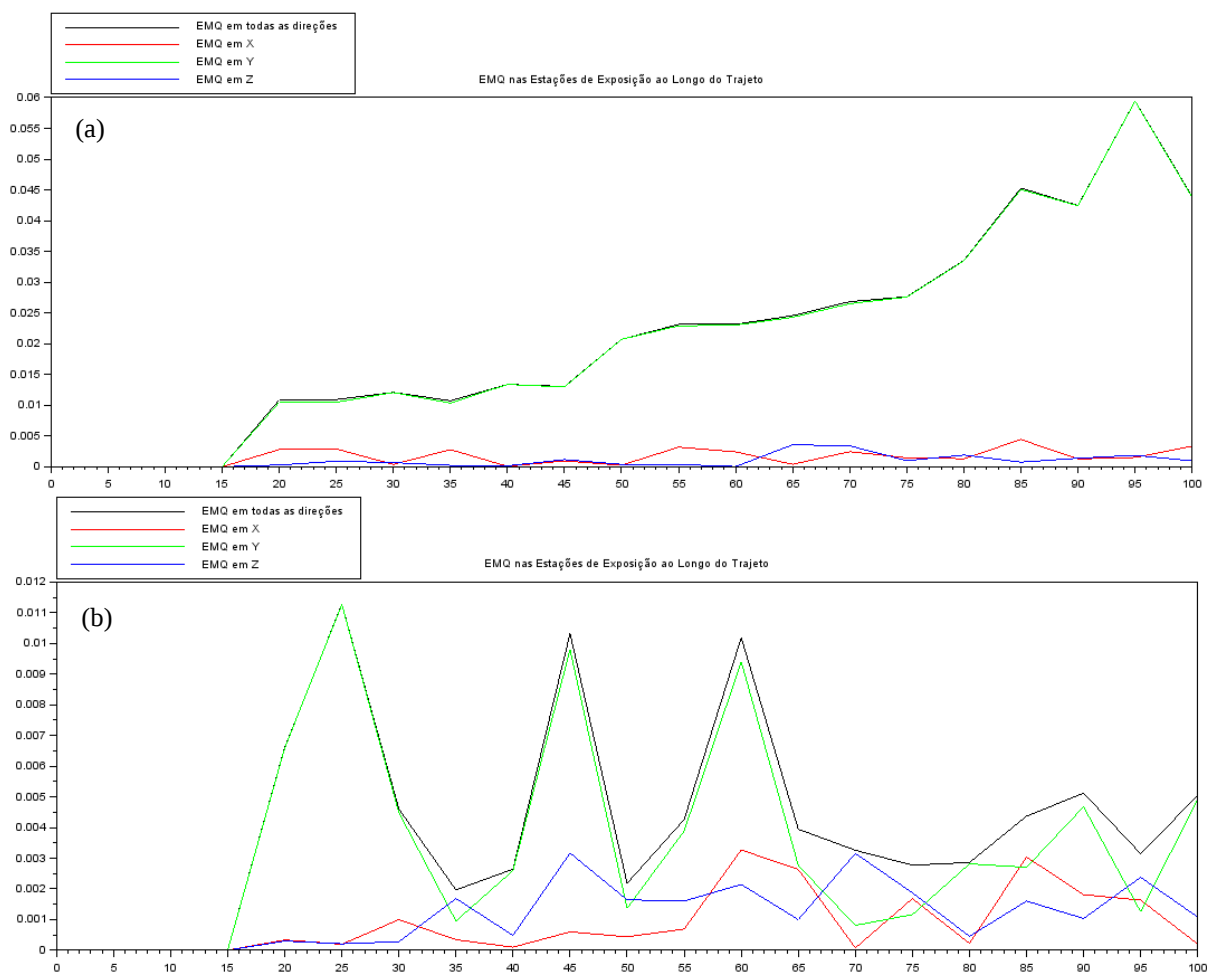


Figura 32: Processamento com arranjo de câmaras com base de um (a) e dois (b) metros – Erro médio quadrático entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas das estações de exposição ao longo do percurso.

O efeito sobre a qualidade da determinação das coordenadas dos pontos de enlace é proporcional ao distanciamento das câmaras nas direções x e y do plano-imagem (tabela 13). Consequentemente, há melhoria de qualidade direta sobre os eixos paralelos à estas direções e indiretamente na estimação da profundidade, que neste caso, caminha sobre o eixo Y do sistema local.

Tabela 13: EMQ dos pontos de enlace do experimento diferentes distâncias de base.

Processamento	$X [m]$	$Y [m]$	$Z [m]$
B =1 m	0,248	4,275	0,081
B =2 m	0,143	2,582	0,050

Comparando-se as figuras 33 e 34 é possível notar uma melhoria em qualidade fornecido pelo distanciamento entre as câmaras.

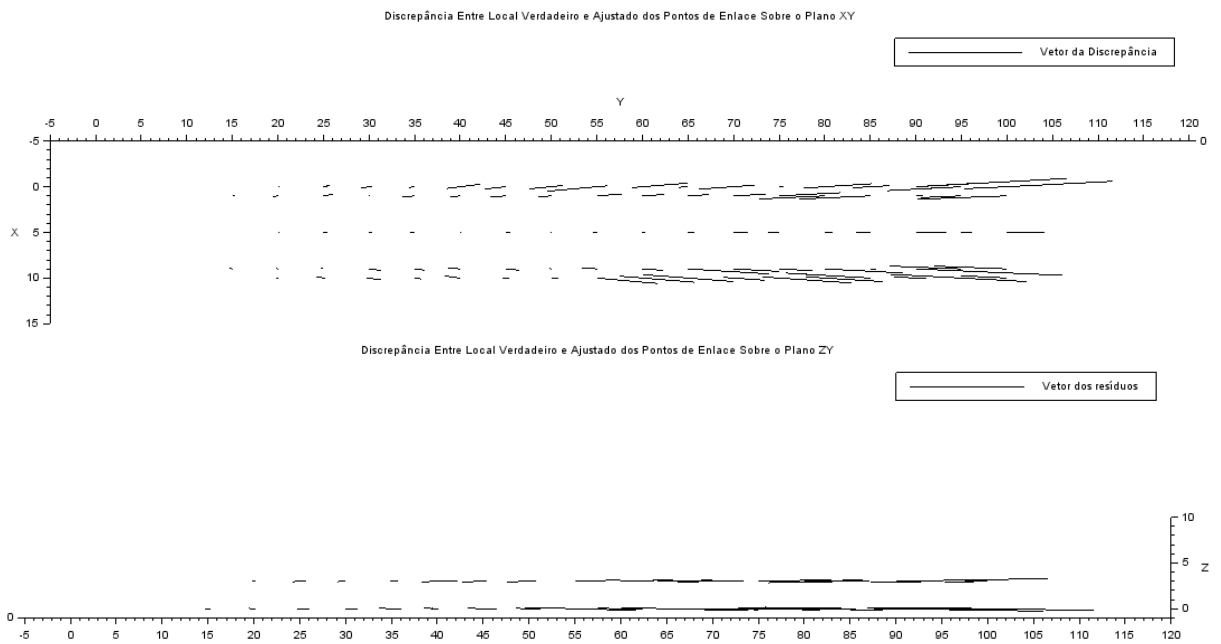


Figura 33: Processamento com arranjo de câmaras com base de 1 metro - Discrepâncias entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas dos pontos de enlace no espaço-objeto (a) projetadas sobre o plano horizontal XY e (b) sobre o plano vertical YZ.

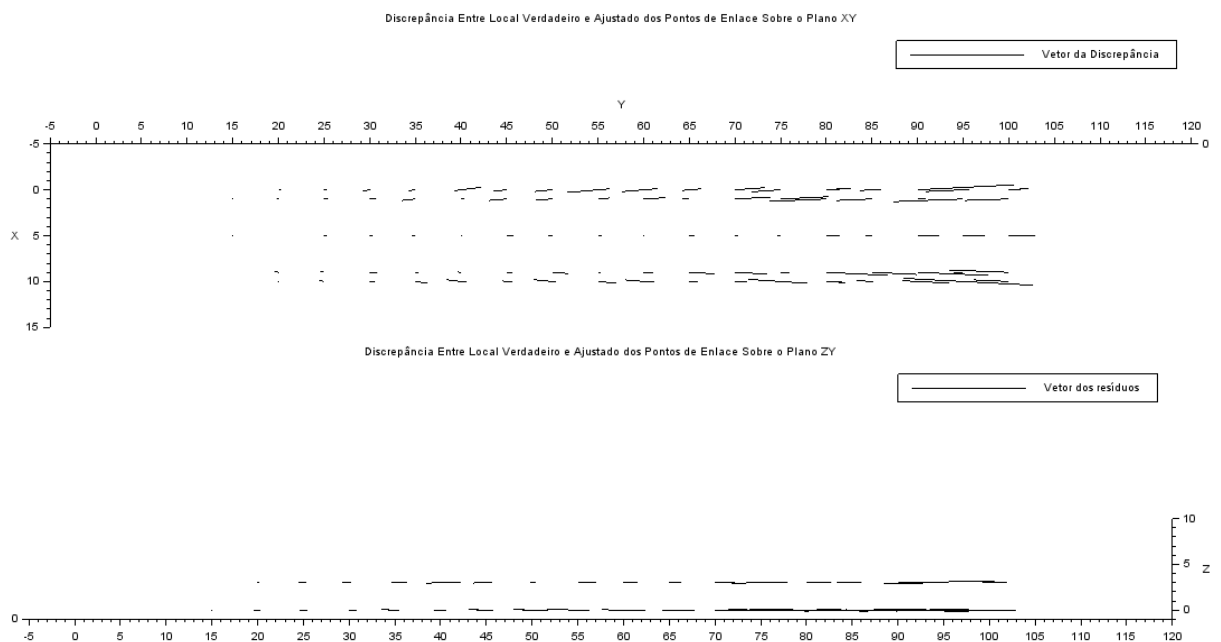


Figura 34: Processamento com arranjo de câmaras com base de 2 metros - Discrepâncias entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas dos pontos de enlace no espaço-objeto (a) projetadas sobre o plano horizontal XY e (b) sobre o plano vertical YZ.

5.6 Distanciamento Entre Tomadas de Fotografias

Dada a relação de escala em uma correspondência inter-imagens, somada à precisão das observações, grandes intervalos entre exposições podem fazer com que o ajustamento necessite de mais iterações até se chegar a uma solução. Isto porque há grande incerteza nos ângulos de intersecção no caso de visadas muito distantes das câmaras. Por outro lado, a grande quantidade de exposições tende a aumentar também o volume de informações a serem processadas, o que em muitos casos é desnecessário ou, em aspectos práticos, é até mesmo inviável. Entretanto, a maior quantidade de exposições em um mesmo percurso do levantamento pode trazer vantagens por meio da redundância.

Foram testados dois distanciamentos para as estações de exposição: 5 e 10 metros. Foi analisado se a maior quantidade de fotos tiradas para um mesmo percurso trazia benefícios significativos para a qualidade da solução.

Apesar das diferenças que se pode observar na tabela 14, não se pode afirmar que elas sejam conclusivas, já que há diferentes quantidades de exposições ao longo do caminhar e não há um padrão bem definido de redução ou aumento da discrepância.

Tabela 14: EMQ das estações de exposição do experimento com câmaras de diferentes distanciamentos entre tomadas de fotografia subsequentes.

Processamento	ω [°]	φ [°]	κ [°]	X_L [m]	Y_L [m]	Z_L [m]
int =5 m	0,011	0,008	0,022	0,003	0,011	0,004
int =10 m	0,009	0,016	0,014	0,006	0,011	0,004

Conforme pode ser visto na tabela 15, não houve qualquer diferença na acurácia entre os dois experimentos utilizando diferentes distanciamento entre exposições.

Tabela 15: EMQ dos pontos de enlace do experimento com diferentes distanciamentos entre tomadas de fotografia subsequentes.

Processamento	X [m]	Y [m]	Z [m]
int =5 m	0,143	2,582	0,050
int =10 m	0,143	2,582	0,050

5.7 Arranjo Triangular Versus Par Estereoscópico

No início deste trabalho foi apresentada e discutida a questão da redundância geométrica das observações. No caso do par estereoscópico que caminha sob o plano horizontal, há uma deficiência nos números de redundância no alinhamento perpendicular à linha de base. Isto pode ser melhorado com a introdução da terceira câmara formando um arranjo não colinear.

Uma mesma sequência foi processada utilizando-se as câmaras da base e posteriormente utilizando-se todas as três câmaras do arranjo. Com o maior controle sobre as observações esperado para o arranjo triangular, foi analisada como a propagação de erros afeta a qualidade do levantamento quando há menor controle sobre as observações.

Foi possível observar a fragilidade do arranjo com o par estereoscópico. Ao processar a triangulação, o sistema perdeu convergência a partir da terceira janela. Foram realizadas diversas tentativas, que resultaram em poucas janelas processadas. Assim, não houve como fazer uma comparação mais abrangente. Numericamente, não foi possível obter resultado satisfatório para a sequência do par estereoscópico. Entretanto, a quantidade de dados subsequentes processadas revela maior estabilidade do modelo triangular como solução fotogramétrica.

5.8 Introdução de Erros Grosseiros nas Observações

Este experimento complementa o anterior, de forma que foi introduzido um erro grosseiro em uma observação no terceiro evento da série. A magnitude do erro foi de 5 pixels nas direções das linhas e colunas, respectivamente. Ele foi introduzido na observação do ponto CAL_E_16, localizado sobre a calçada a partir da foto 02B.

Como o programa tem a capacidade de tratar os erros grosseiros (detecta, localiza e mitiga a influência deles), foi analisada a eficácia dos modelos em destacá-los.

O único erro introduzido na observação foi detectado, localizado e tratado com êxito para o arranjo triangular, resultado não conseguido com o par estereoscópico que perdeu a convergência do ajustamento. A figura 35 mostra que o comportamento da propagação foi pouco afetada pela introdução do erro grosseiro, pois a influência deste erro foi atenuada pelo programa. Da mesma forma, o erro não foi propagado à coordenada XYZ do ponto alterado,

pois dada a grande redundância de observações, a determinação permaneceu com qualidade.

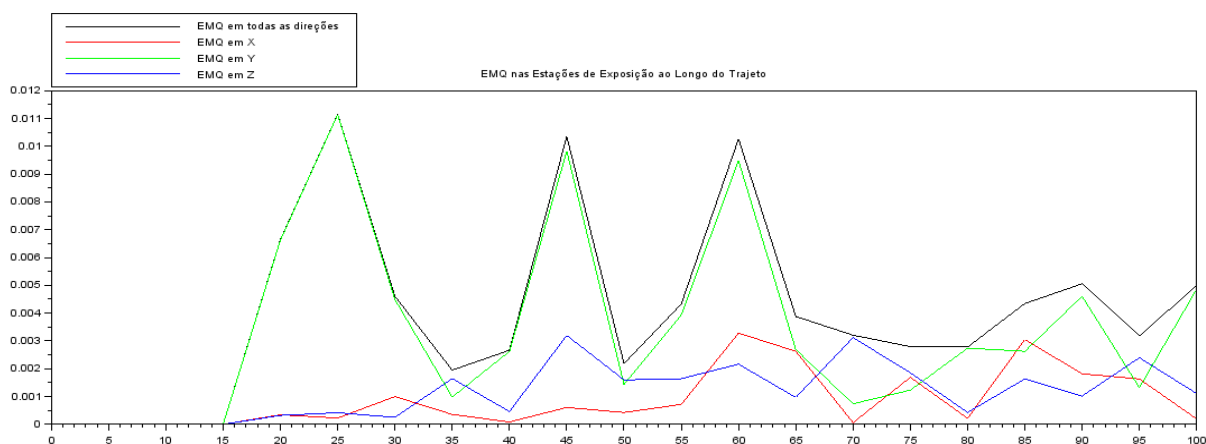


Figura 35: Processamento com arranjo triangular de câmaras – Erro médio quadrático entre as coordenadas verdadeiras e ajustadas estações de exposição ao longo do percurso.

5.9 Percurso Aleatório

Neste experimento, o arranjo de câmaras faz um percurso sinuoso, de forma que se expõe o levantamento a maiores variações de parâmetros (figura 36). Diferentemente do percurso linear, era esperada menor correlação na geometria entre blocos.

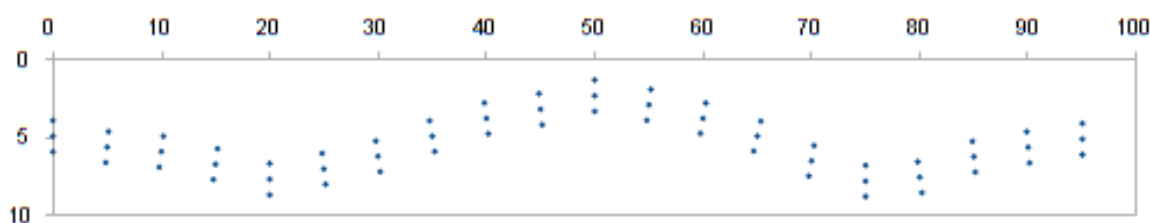


Figura 36: Posições das estações de exposição no percurso sinuoso.

Foi avaliada a eficácia da solução diante de maiores variações em geometria da rede, que é o comportamento esperado para aplicações práticas.

Conforme esperado, os erros no percurso aleatório foram maiores do que os encontrados no percurso retilíneo (tabelas 16 e 17). Mesmo assim, o arranjo triangular conseguiu ser triangulado até onde pôde-se ter pontos de enlace.

Tabela 16: EMQ das estações de exposição do experimento com percurso aleatório.

Processamento	ω [°]	φ [°]	κ [°]	X_L [m]	Y_L [m]	Z_L [m]
Retilíneo	0,011	0,008	0,022	0,003	0,011	0,004
Aleatório	0,029	0,080	0,023	0,021	0,052	0,006

Tabela 17: EMQ dos pontos de enlace do experimento com percurso aleatório.

Processamento	X [m]	Y [m]	Z [m]
Retilíneo	0,143	2,582	0,050
Aleatório	0,117	2,081	0,040

5.10 Discussão

Os resultados apresentados auxiliaram a destacar que:

- O processamento em lote pode ser menos oneroso do que o sequencial quando se tem poucas observações, mesmo tendo mais iterações;
- A controlabilidade é maior no processamento em lote, sendo que a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos de enlace é mais acurada;
- Em todos os experimentos, a determinação da orientação exterior é precisa, assim, crê-se que é possível utilizar o CF como *dead-reckoning*;
- Os erros nos pontos de enlace são bem maiores e se propagam na direção do caminhamento, tendo ligeira influência no plano horizontal do eixo ótico para as laterais do levantamento;
- Maiores janelas de processamento resultam em maior qualidade na orientação mas não afeta os pontos de enlace;
- A quantidade de avanços de base não afeta a qualidade;
- O aumento da distância focal resulta em melhora na estimativa da trajetória no sentido do caminhamento, mas reduz o ângulo de abertura, diminuindo o campo de visão;
- Uma maior distância focal melhora a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos de enlace proporcionalmente ao aumento de f ;
- Aumentando-se o espaçamento entre as câmaras do arranjo, aumenta-se a qualidade do posicionamento das câmaras no sentido do levantamento, bem como a acurácia das coordenadas dos pontos de enlace;
- Entretanto, ao aumentar o espaçamento, dificulta-se a correspondência intra-

imagens de feições próximas às câmaras;

- O distanciamento entre estações de exposição subsequentes não afeta, a princípio, a qualidade da fototriangulação, mas podem dificultar a correspondência de imagens;
- O par estereoscópico perde convergência já nas primeiras janelas de processamento;
- O arranjo triangular permitiu a detecção-localização-tratamento do erro grosseiro introduzido, de forma que a influência deste sequer foi notada;
- O percurso aleatório tende a reduzir a acurácia, mas mesmo assim, o programa conseguiu processar toda a sequência (até onde haviam observações nas imagens).

6 CONCLUSÕES

Os SMM são compostos por sensores de posicionamento e imageamento. A determinação da PVA, geralmente, cabe aos sensores de posicionamento enquanto que sensores de imageamento fazem a extração de informações do ambiente. Utilizando-se o conceito de fototriangulação, é possível que as câmaras atuem no posicionamento e no imageamento. O posicionamento sem o auxílio de outras informações pode ser feito utilizando-se um sistema arbitrário, do qual se pode extrair o deslocamento das câmaras ao longo do trajeto. Este conceito se encaixa na definição de *dead-reckoning* em que a posição de um corpo é determinada a partir do conhecimento da posição anterior do corpo, velocidade e atitude e assim sucessivamente.

O mapeamento móvel pode ser realizado sobre plataformas orbitais, aéreas, terrestres e aquáticas, dependendo apenas da aplicação. No mapeamento móvel terrestre, o mapeamento de vias urbanas, estradas e ferrovias tem grande potencial a ser explorado, encaixando-se perfeitamente o conceito de caminhamento fotogramétrico. Este é um modo especial de levantamento fotogramétrico terrestre baseado em sucessivos pares estereoscópicos, cuja base formada entre os centros perspectivos das estações de exposição é perpendicular ao eixo do levantamento. O método baseia-se em uma fototriangulação sequencial sem pontos de apoio, tendo conhecimento *a priori* de parâmetros de orientação interior e de orientação relativa e que pode ser utilizado no contexto de navegação, tanto em tempo real como pós-processado. Foi apresentada uma extensão do método, contendo uma terceira câmara, a fim de aumentar a qualidade por meio da redundância de observações e a geometria. A formação do arranjo não deve ser colinear para que se possa haver a controlabilidade das observações.

O processamento da triangulação sequencial foi implementado para poder modelar todas as características do mapeamento móvel. Ele visa diminuir a abrangência das informações processadas para poder, principalmente, reduzir o custo computacional. Dentre as vantagens pode-se destacar a facilidade em se alcançar sucesso na convergência do processo iterativo, a maior facilidade em encontrar erros grosseiros detectáveis e a possibilidade de usar um sistema local para cada bloco e determinar o PVA da plataforma que comporta a câmara (ou sistema de câmaras). Como desvantagens, podem ser apontadas principalmente o maior acúmulo de erros no sentido do caminhamento ao se processar a sequência de forma parcialmente retroalimentada e a complexidade de informações geradas

em cada processamento de bloco. Para entendimento do funcionamento do processamento sequencial, foram apresentados os conceitos de ação, evento, base, janela e avanço de base.

Foi apresentado que a qualidade de um ajustamento de observações pode ser descrita pela confiabilidade, que se traduz na capacidade do modelo possibilitar a detecção de erros. A confiabilidade pode ser dividida entre interna e externa. O desenho da rede e o modelo de ajustamento podem ser considerados a parte mais problemática ao se almejar resultados de alta acurácia. Eles dependem do ângulo formado na intersecção dos raios perspectivos, sendo que a máxima ocorre em ângulos de intersecção de 90° . Podendo a confiabilidade ser descrita a partir de números de redundância (r_i), esta característica tende a permitir com que se possa detectar, localizar e tratar um erro grosseiro cometido dependendo da quantidade de raios perspectivos e da geometria formada por eles.

A introdução da terceira câmara é sensível, sobretudo, nas observações e refletindo-se sobre os resultados estimados para a orientação exterior e coordenadas tridimensionais de pontos no terreno. Como efeito direto, aumenta-se – em teoria – a controlabilidade sobre as observações que são realizadas sobre as regiões recobertas.

No CF, utilizar câmaras com ângulos de abertura pequenos não traz tantos benefícios como os vistos em levantamentos terrestres com grande convergência de estações de exposição. A resolução angular aumenta na medida em que se aumenta a distância focal. Entretanto, como a distância de base entre as câmaras permanece a mesma, o recobrimento total da região de interesse (um paralelepípedo de largura igual à do logradouro, altura média dos objetos locais e profundidade dependente da sobreposição esperada inter-imagens) acontece em uma distância (profundidade) maior e com ângulos de intersecção mais agudos. Desta forma, a propagação de erros na direção do levantamento é aumentada em proporção relativa às direções vertical e transversal ao sentido do caminharmento.

Para analisar os conceitos apresentados foi desenvolvido um programa na linguagem C++ denominado AutoCLOSe. Ele é capaz de realizar tanto o processamento em lote como o sequencial. Foram elaborados nove experimentos que pudessem viabilizar uma análise comparativa das características que compõem o método sequencial. Foram analisados os tipos de processamento, as dimensões de janelas, os avanços de base, o tamanho da distância focal das câmaras, distanciamento entre câmaras do arranjo, distanciamento entre tomadas de fotografia subsequentes, arranjo triangular versus par estereoscópico, introdução de erros grosseiros e percurso aleatório.

Destes experimentos, foram extraídas conclusões acerca do arranjo triangular de

câmaras no CF. O processamento em lote pode ser menos oneroso do que o sequencial quando se tem poucas observações, mesmo tendo mais iterações, pois em cada sequência há uma quantidade de iterações pouco menores do que a do processamento em lote. A controlabilidade é maior no processamento em lote, sendo que a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos de enlace é mais acurada. A determinação da orientação exterior é precisa mesmo com o problema da geometria no sentido do caminhamiento, assim, crê-se que é possível utilizar o CF como *dead-reckoning*. Os erros nos pontos de enlace são bem maiores do que os encontrados na orientação das câmaras e eles se propagam na direção do caminhamiento, tendo ligeira influência no plano horizontal do eixo ótico para as laterais do levantamento. Quanto maiores as janelas de processamento, maior deverá ser a qualidade na orientação, mas isto não surte efeito algum sobre os pontos de enlace. A quantidade de avanços de base não afeta a qualidade. O aumento da distância focal resulta em melhora na estimativa da trajetória no sentido do caminhamiento, mas reduz o ângulo de abertura, diminuindo o campo de visão. Este aumento também melhora a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos de enlace proporcionalmente ao aumento de f . Ao aumentar o espaçamento entre as câmaras do arranjo, aumenta-se a qualidade do posicionamento das câmaras no sentido do levantamento e também a acurácia das coordenadas dos pontos de enlace. Entretanto, ao aumentar o espaçamento, dificulta-se a correspondência intra-imagens de feições próximas às câmaras. O distanciamento entre estações de exposição subsequentes não afeta, a princípio, a qualidade da fototriangulação, mas pode dificultar a correspondência de imagens. O par estereoscópico perdeu convergência nas primeiras janelas de processamento, o que sugere que este esteja mais vulnerável à questão da geometria e escala formadas pelos raios perspectivos neste tipo de rede fotogramétrica. O arranjo triangular permitiu a detecção-localização-tratamento do erro introduzido, de forma que a influência deste sequer foi notada. O percurso aleatório tende a reduzir a acurácia, mas mesmo assim, o programa conseguiu processar toda a sequência (até onde haviam observações nas imagens). Assim, é possível concluir que a introdução da terceira câmara formando um arranjo triangular traz benefícios diretos ao mapeamento móvel que faz uso do CF. Destaca-se que o uso mais indicado da técnica envolve a determinação da trajetória e a determinação de coordenadas de pontos próximos às câmaras. Ainda assim, a deficiência na profundidade ainda continua sendo crítica, deixando um caminho aberto a novas possibilidades de melhoria na determinação do modelo fotogramétrico. Os efeitos causados na determinação das coordenadas dos pontos de enlace indica o quão crítica é a

questão da acurácia na determinação dos POE das câmaras. Mesmo no georreferenciamento direto, o veículo em movimento torna a situação crítica e deve ser muito bem controlada, pois qualquer atraso entre as exposições que não seja devidamente tratado irá refletir em erro posicional no mapeamento. Com esta lacuna aberta, pode-se sugerir o aprofundamento desta questão da geometria buscando-se alternativas para o mapeamento móvel terrestre utilizando fotogrametria como forma de extração da informação espacial. Assim, soluções como espelhos catadióptricos podem ser estudadas a fim de poder ser alcançado maior equilíbrio na determinação do modelo de ajustamento.

7 REFERÊNCIAS

- BAARDA, W. **A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks**. Netherlands Geodetic Commission: Publications on Geodesy. Delft, v. 2, n. 5, p. 97, 1968.
- BLASECHI, V. **Estudo Sobre a Redundância de Câmaras: Casos (A) Dupla Estéreo Câmara, e (B) Arranjo Coplanar**. 2014. 13 p. Estudo Dirigido (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Presidente Prudente.
- BROWN, D. C. **Close-Range Camera Calibration**. Photogrammetric Engineering, p. 855-866, ago. 1971.
- CAMARGO, P. O. **Controle de Qualidade Aplicado ao Filtro de Kalman**. 1992. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- _____. **Ajustamento de Observações**. 2000, 227 p. Notas de aula.
- CANNON. **EOS Rebel T3i**. Cannon Brasil, 2014. Disponível em: <<http://www.canon.com.br/ProdutosCIG.aspx?s=3&cat=4&pro=171>>. Acesso em: 26 mar. 2014.
- CHANG, H.; TSAI, F. **Camera Trajectory Estimation Using Vision-Based Approach**. International Symposium on Mobile Mapping Technology. Tainan, p. 6. 2011.
- COOPER, M. A. R & ROBSON, S. **Theory of Close Range Photogrammetry**. In: ATKINSON, K. B. Close Range Photogrammetry and Machine Vision. Caithness. Whittles. 1996, p. 9-50.
- BLÁZQUEZ, M; COLOMINA, I. **Fast AT: A Simple Procedure for Quasi Direct Orientation**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Elsevier, 2012.
- DAVISON, A. J; REID, I. D.; MOLTON, N. D.; STASSE, O. **MonoSLAM: Real-Time Single Câmara SLAM**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, New York, v. 29, n. 6, p. 16, jun. 2007.
- EL-SHEIMY; SCHWARZ, K. P. **Digital mobile mapping systems – State of the Art and Future Trends**. In: TAO, C. V.; CHAPMAN, M. A.; CHAPLIN, B. A. Automated Processing of Mobile Mapping Image Sequences. London: Taylor & Francis, 2007. 193 p.
- EL-SHEIMY, N. **An Overview of Mobile Mapping Systems**. In: FIG and GSDI Conference, 2005, Cairo.
- ESTADOS UNIDOS. Departamento de Defesa. **Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard**. Washington, 2008. 4 ed. 160 p. Disponível em: <<http://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf>>. Acesso em: 31 de julho de 2014.
- FRASER, C. S. **Photogrammetric Measurement to One Part in a Million**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 58, n. 3, p. 305-310, 1992.

_____. Network Design. In: ATKINSON, K. B. **Close Range Photogrammetry and Machine Vision**. Caithness: Whittles, 1996. Cap. 9, p. 256-281.

_____, C. S.; AL-AJLOUNI, S. **Zoom-Dependent Camera Calibration in Digital Close-Range Photogrammetry**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 72, n. 9, set. 2006.

FÖRSTNER, W. **The Reliability of Block Triangulation**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. v. 51, n. 6, p. 1137-1149, 1985.

GALO, M.; CAMARGO, P. O. **Utilização do GPS no Controle de Qualidade de Cartas**. Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Florianópolis: COBRAC. 1994. p. 8.

GALO, M.; TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria digital**. Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente. 2013.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba: UFPR, 1994.

GNU. **O Sistema Operacional GNU: O Que É Software Livre?** Disponível em: <<https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.html>>. Acesso em 06 de agosto de 2014.

GPS.GOV. Official U. S. Government Informational About the Global Positioning System (GPS) and Related Topics. Disponível em <<http://www.gps.gov>>. Acesso 31 de julho de 2014.

GRIEBBACH, D.; BÖRNER, A. ERNST, I.; ZUEV, S. **Real-Time Dense Stereo Mapping for Multi-Sensor Navigation**. ISPRS Commission V Mid-Term Symposium. New Castle upon Tyne, p. 6. 2010.

GRUN, A. **Precision and Reliability Aspects in Close-Range Photogrammetry**. XIV Congress of International Society for Photogrammetry. Hamburg: ISP. 1980. p. 378-391.

HARRIS, C. G. & PIKE, J. M. **3D Positional Integration from Image Sequences**. Proceedings of Third Alvey Vision Conference. 1987. p. 233-236.

ISPRS. **ISPRS Books Series: Advances in Mobile Mapping Technology**. London: CRC Press, 2007.

KRAUS, K. **Photogrammetry: geometry from images and laser scan**. Tradução de Ian Harley e Stephen Kyle. 2. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2007.

LEMES NETO, M. C. **Orientação Semi-automática de Uma Sequência de Pares de Imagens Frontais por Fototriangulação a Partir de Fotocoordenadas Extraídas pelo SIFT**. 2014. 114 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Presidente Prudente.

LUHMANN, T. ROBSON, S.; KYLE, S.; BOEHM, J. **Close Range Photogrammetry**. New Jersey: Wiley, 2006.

LUGNANI, J. B. **Introdução à Fototriangulação**. Curitiba: UFPR, 1987. 134 p.

MIKAHIL, E. M. **Observations and Least Squares**. New York: Dun-Donnelley, 1976.

MELO, E. R. **Desenvolvimento de Um Sistema Multisensorial para Mapeamento Móvel de Baixo Custo Baseado na Plataforma Arduino**. 2012. 20p. Projeto de Pesquisa (Iniciação Científica). FAPESP, Presidente Prudente.

MONICO, J. F. G. **Pseudo Distância e Fase da Onda Portadora**. MundoGeo, 5 de maio de 2010. Disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2010/05/05/pseudodistancia-e-fase-da-onda-portadora/>>. Acesso em : 31 de julho de 2014.

MUGNIER, C. J. et al. **The Mathematics of Photogrammetry**. In: MCGLONE, J. C. **Manual of Photogrammetry**. 6. ed. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2013. Cap. 3, p. 235-358.

REMONDI, B. W. **Global Positioning System Carrier Phase: Description and Use**. National Geodetic Survey. Rockville, 1985. Disponível em: <http://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/GPSCarrierPhase.pdf> Acesso 31 de julho de 2014.

ROBUST ROBOT GROUP. **Visual Odometry For GPS-Denied Flight And Mapping Using A Kinect**. Disponível em: <<https://groups.csail.mit.edu/rrg/index.php?n=Main.VisualOdometryForGPS-DeniedFlight>> Acesso em 25/02/2016.

SILVA, J. F. C. **A Inferência Bayesiana e a Detecção e Localização de Erros Grosseiros em Fototriangulação por Feixes de Raios**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 87. 1987.

_____. **Fototriangulação no Caminhamento Fotogramétrico**. Tese (Livre Docência). Departamento de Cartografia, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, p. 85. 1997.

_____. **The Main Imaging Issues in the Realm of MMS**. Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, v. 4, n. 65, maio 2013.

TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria Básica**. Presidente Prudente: Edição do Autor, 2006.

VEERMER, M. **Advanced Adjustment Theory**. 2007. 127p. Notas de Aula.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry**. 3rd. ed. New York: McGraw-Hill, 2000. 608 p.

WOLF, P. R.; GHILANI, C. D. **Adjustment Computations: Statistics and Least Squares in Surveying and GIS**. New York: Wiley, 1996.