

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA


CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

MAURÍCIO CORREIA LEMES NETO

Orientação semi-automática de uma sequência
de pares de imagens frontais por
fototriangulação a partir de fotocordenadas
extraídas pelo SIFT



Presidente Prudente

2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

MAURÍCIO CORREIA LEMES NETO

**Orientação semi-automática de uma sequência
de pares de imagens frontais por
fototriangulação a partir de fotocoordenadas
extraídas pelo SIFT**



Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP, campus de Presidente Prudente.

Orientador: Prof. Dr. João Fernando C. da Silva
Prof. Titular do departamento de Cartografia

Presidente Prudente
2014

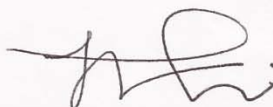
FICHA CATALOGRÁFICA

L57o Lemes Neto, Maurício Correia.
Orientação semi-automática de uma sequência de pares de imagens frontais por fototriangulação a partir de fotocoordenadas extraídas pelo SIFT / Maurício Correia Lemes Neto. - Presidente Prudente : [s.n.], 2014
114 f.

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

1. Mapeamento móvel. 2. SIFT. 3. Caminhamento fotogramétrico. 4. Orientação de imagens. 5. Sequencia de imagens. 6. Fototriangulação. I. Silva, João Fernando Custódio da. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

BANCA EXAMINADORA



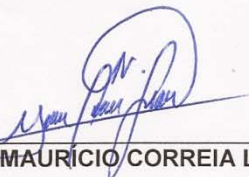
Prof. Dr. JOÃO FERNANDO CUSTODIO DA SILVA
(ORIENTADOR)



Prof. Dr. RICARDO LUÍS BARBOSA
(UNESP/SOROCABA)



Prof. Dr. JULIO KIYOSHI HASEGAWA
(UNESP/FCT)



MAURÍCIO CORREIA LEMES NETO

Presidente Prudente (SP), 23 de maio de 2014.

Resultado: Aprovado!

DEDICATÓRIA

A Deus.

*A minha família, em especial minha esposa Eliane
e meu amado filho Davi.*

Ao meu pai João Lemes e minha mãe Eunice.

As minhas irmãs.

AGRADECIMENTOS

Registro aqui o meu agradecimento primeiramente a Deus, por Ele sempre ser o meu fiel depositário, e também:

Ao professor Dr. João Fernando Custódio da Silva pelos ensinamentos dentro e fora de sala, um exemplo de compreensão e disposição para ensinar, e de amor pelo que faz.

Ao programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas e a Universidade Estadual Paulista (Unesp) de Presidente Prudente pela infraestrutura e organização que viabilizaram o desenvolvimento deste trabalho.

Aos companheiros de laboratório que me ajudaram com trabalhos manuais (levantamento) e conhecimentos, Elenice, Édico, Mariana e Victor.

Aos professores do departamento de cartografia da FCT/UNESP, em especial aos professores Milton Hirokazo Shimabukuro e Maurício Galo pela paciência na correção dos trabalhos intermediários a esta dissertação.

Aos amigos que fiz no período que frequentei as disciplinas do curso e a sala da pós.

A UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná – campus Londrina) por ajustar as minhas atividades de forma a poder realizar este mestrado.

À minha família: minha esposa e meu filho pela dedicação e compreensão nos momentos tensos.

Aos meus pais (João e Eunice), os responsáveis diretos em me mostrar os caminhos corretos.

Às minhas irmãs (Maria Lucia, Sonia Ester, Sueli, Suzelena e Elisangela), que, mesmo longe, incentivaram e proporcionaram na maioria das vezes em que estivemos juntos a alegria e amor entre irmãos.

Espero de coração, que cada um possa gozar desta vitória e, juntamente comigo, se sentir mais uma vez um vencedor.

RESUMO

Sistemas de mapeamento móvel terrestre que integram sensores de orientação (*Inertial Navigation System*), posicionamento (*Global Navigation Satellite System*), câmaras digitais e metodologia podem produzir imagens georreferenciadas e coordenadas de qualquer atributo dos objetos observáveis. Porém, problemas como a perda de sinal GPS e o acúmulo de erros pelo uso contínuo do INS podem influenciar diretamente a orientação e o posicionamento das imagens digitais obtidas pelo levantamento fotogramétrico. Com o objetivo de agregar mais recursos e amenizar os eventuais problemas ocasionados pelas limitações dos sensores este trabalho propõe uma solução semi-automática de extração de pontos homólogos em pares de imagens estereoscópicas a fim de realizar a fototriangulação com base em observações obtidas apenas das imagens e referencial local arbitrado. A técnica de extração de pontos em imagens digitais utilizada neste trabalho é o SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) e a correspondência entre eles é feita a partir de uma busca pela similaridade dos descritores de cada ponto-chave cuja métrica analisada é a menor distância euclidiana. Podendo haver falsas correspondências o método proposto por David Lowe compara a menor distância com a segunda melhor distância selecionando somente os pontos correspondentes que estejam próximos a um limiar (threshold) previamente estabelecido. O SIFT é aplicado em uma seqüência de cada vez, e cada seqüência é composta por dois pares de imagens estereoscópicas. Os pontos-chave escolhidos para a etapa de fototriangulação são somente os que têm correspondências nas quatro imagens ao mesmo tempo. As coordenadas desses pontos-chave são transformadas para fotocoordenadas e passam a ser as observações no processo de fototriangulação. A fototriangulação por feixes de raios tem a finalidade de estimar a orientação exterior das imagens. Para realização dos experimentos foram utilizadas dez bases, totalizando vinte imagens. O objetivo então de todo esse processo é realizar a estimação dos POEs (Parâmetros de Orientação Exterior) para construir um caminhamento fotogramétrico.

Palavras-chave: mapeamento móvel, SIFT, caminhamento fotogramétrico, orientação de imagens, seqüência de imagens, fototriangulação.

ABSTRACT

Systems Terrestrial mobile mapping systems integrate inertial navigation and positioning sensors such as INS (Inertial Navigation System), GNSS (Global Navigation Satellite System), digital cameras and methodology can create georeferenced images and coordinates from any attribute of observable objects. However, problems such as loss of GNSS signal and the errors accumulation's by the continuous use of the INS can directly influence the orientation and positioning of digital images obtained by photogrammetric surveying. With the goal of adding more resources and alleviate the problems caused by the limitations of the sensors this thesis proposes a semi-automatic extraction solution of homologous points in stereo image pairs to perform photo-triangulation based in observations obtained only of the images and local reference arbitrated. The technique of extracting points in digital images used in this study is the SIFT (Scale Invariant Feature Transform) and the correspondence among them is taken from a search for similarity descriptors of each key point whose metric analyzed is the smallest Euclidean distance. There may be false matches proposed by David Lowe method compares the shortest distance with the second best distance selecting only the corresponding points that are near a threshold previously established. The SIFT is applied in a sequence at a time, and each sequence is composed of two pairs of stereoscopic images. The key points chosen to step photo-triangulation are only those that have matching in the four images at once. The coordinates of these key points are transformed to photo coordinates and become observations in the photo-triangulation process. The photo-triangulation by bundle block adjustment aims to estimate the exterior orientation of images. In the experiments ten bases were used, totaling twenty images. Therefore, the goal of this process is to perform the estimation of EOPs (Exterior Orientation Parameters) to build a photogrammetric bridging.

Keyword: mobile mapping, SIFT, photogrammetric bridging, orientations images, photo-triangulations sequences of images.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Protótipo de um veículo de mapeamento móvel terrestre.....	14
Figura 2 - Observações (pontos) que aparecem nas quatro imagens.....	17
Figura 3 – Constelação de satélites GPS	23
Figura 4 – Giroscópio	24
Figura 5 – Giroscópio analítico	24
Figura 6 – Acelerômetro Elétrico	25
Figura 7 - Acelerômetro Eletrônico.....	25
Figura 8 - Distribuição gaussiana com média zero e desvio padrão (σ)	28
Figura 9 - Comportamento do filtro gaussiano.....	29
Figura 10 - Imagens após o filtro gaussiano.....	29
Figura 11 - Diferença gaussiana (DoG) da primeira oitava.....	30
Figura 12 - Diferença gaussiana entre oitavas.....	31
Figura 13 - Máximos e mínimos da diferença gaussiana	32
Figura 14 - Resultado da extração dos máximos e mínimos (DoG).....	32
Figura 15 - Histograma de orientações de um ponto-chave	35
Figura 16 - Orientação e magnitude de cada ponto-chave	35
Figura 17 - Cálculo de um Descritor	36
Figura 18 - Orientações do histograma.....	37
Figura 19 - Região e sub-regiões ao redor do ponto-chave.....	37
Figura 20 - Vetor de característica gerado pelo SIFT	37
Figura 21 - Espaço de referência e espaço de busca FONTE: Adaptado de (GALO, 2003) ...	39
Figura 22 - Imagem da diferença gaussiana (bordas).....	40
Figura 23 - Correspondência entre duas imagens. (A) imagem esquerda e (B) imagem da direita.....	42
Figura 24 - Geometria da condição de colinearidade	44
Figura 25 – Geometria da condição de colinearidade terrestre.	44
Figura 26 - Sistema de coordenadas e da imagem.....	45
Figura 27 - Par de imagens terrestres horizontais, tomadas com duas câmaras.....	48
Figura 28 – Diagrama de blocos simplificado da metodologia.....	57
Figura 29 - Foto do levantamento fotogramétrico.....	58
Figura 30 - Esquema da lateralidade das câmaras.....	59

Figura 31 - Sequência de imagens estereoscópicas sincronizadas e montadas para capturar dois pares de imagens simultaneamente a cada intervalo de tempo t_k	59
Figura 32 - Esquema das sequencias de imagens	61
Figura 33 - Correspondência lateral (tempo 1).....	62
Figura 34 - Correspondência lateral (tempo 0).....	62
Figura 35 - Correspondência avante (esquerda).....	62
Figura 36 - Correspondência avante (direita).....	62
Figura 37 - Pontos correspondidos nas quatro imagens	63
Figura 38 - Esquema de correspondências.	64
Figura 39 - Cálculo das coordenadas do ponto no terreno (XYZ)	65
Figura 40 - Sistema de câmaras.....	72
Figura 41 - Locais do levantamento	73
Figura 42 - Primeiro par de imagens estereoscópicas	74
Figura 43 – Vetores (Imagem de dimensão original).....	76
Figura 44 - Vetores (Imagem com redução de 80%).....	76
Figura 45 - Vetores (Imagem com redução de 70%).....	77
Figura 46 - Vetores (Imagem com redução de 60%).....	77
Figura 47 - Demonstrativo gráfico dos pontos-chave nas quatro imagens (Dimensão original e 0.6 SIFT).....	78
Figura 48 - Demonstrativo gráfico dos pontos-chave nas quatro imagens (60% redução e 0.6 SIFT).....	79
Figura 49 - Imagem 19 (tempo 9).....	81
Figura 50 - Imagem 20 (tempo 9).....	81
Figura 51 - Imagem 17 (tempo 8).....	81
Figura 52 - Imagem 18 (tempo 8).....	81
Figura 53 - Imagem 15 (tempo 7).....	81
Figura 54 - Imagem 16 (tempo 7).....	81
Figura 55 - Imagem 13 (tempo 6).....	82
Figura 56 - Imagem 14 (tempo 6).....	82
Figura 57 - Imagem 11 (tempo 5).....	82
Figura 58 - Imagem 12 (tempo 5).....	82
Figura 59 - Imagem 9 (tempo 4).....	82
Figura 60 - Imagem 10 (tempo 4).....	82
Figura 61 - Imagem 7 (tempo 3).....	83

Figura 62 - Imagem 8 (tempo 3).....	83
Figura 63 - Imagem 5 (tempo 2).....	83
Figura 64 - Imagem 6 (tempo 2).....	83
Figura 65 - Imagem 3 (tempo 1).....	83
Figura 66 - Imagem 4 (tempo 1).....	83
Figura 67 - Imagem 1 (tempo 0).....	84
Figura 68 - Imagem 2 (tempo 0).....	84
Figura 69 - POEs ajustados (câmara da esquerda e direita)	86
Figura 70 - POEs ajustados com recálculo da matriz peso das observações (Xcp, Ycp e Zcp) - A	89
Figura 71 - POEs ajustados com recálculo da matriz peso das observações (Xcp, Ycp e Zcp) - B	90
Figura 72 - POEs ajustados com recálculo da matriz peso das observações (Xcp, Ycp).....	90
Figura 73 - POEs ajustados com recálculo da matriz peso das observações pela distância euclidiana (Xcp, Ycp e Zcp) - A.....	94
Figura 74 - POEs ajustados com recálculo da matriz peso das observações pela distância euclidiana (Xcp, Ycp e Zcp) – B	94
Figura 75 - POEs ajustados com recálculo da matriz peso das observações pela distância euclidiana (Xcp, Ycp).....	95
Figura 76 - POEs ajustados com recálculo da matriz peso das observações por pesos iguais (Xcp, Ycp e Zcp)	98
Figura 77 - POEs ajustados com recálculo da matriz peso das observações por pesos iguais (Xcp, Ycp)	99
Figura 78 - Gráfico da evolução do sigma a posteriori em cada sequência	100
Figura 79 - Fotocoordenadas na imagem	113
Figura 80 - POEs ajustados (2D).....	114
Figura 81 - Pontos-chave por área (região)	114

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores dos parâmetros calibrados das câmaras.....	66
Quadro 2 - Tempo gasto no processamento do SIFT	74
Quadro 3 - Comparativo entre os percentuais de redução e os limiares do SIFT	75
Quadro 4 - Parâmetros de orientação exterior inicial	80
Quadro 5 - Resumo dos resultados da fototriangulação básica da primeira sequência.....	85
Quadro 6 - Resumo dos resultados da fototriangulação básica da segunda sequência	85
Quadro 7 - Resumo dos resultados da fototriangulação básica da terceira sequência	85
Quadro 8 - Resumo dos resultados da fototriangulação básica da quarta sequência	85
Quadro 9 - Resumo dos resultados da fototriangulação básica da quinta sequência	86
Quadro 10 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (primeira sequência).....	87
Quadro 11 -- Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (segunda sequência)	87
Quadro 12 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (terceira sequência)	88
Quadro 13 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (quarta sequência)	88
Quadro 14 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (quinta sequência)	88
Quadro 15 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (sexta sequência).....	88
Quadro 16 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (sétima sequência).....	89
Quadro 17 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (oitava sequência)	89
Quadro 18 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (nona sequência)	89
Quadro 19 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (primeira sequência – distância euclidiana)	91
Quadro 20 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (segunda sequência – distância euclidiana)	92

Quadro 21 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (terceira sequência – distância euclidiana).....	92
Quadro 22 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (quarta sequência – distância euclidiana).....	92
Quadro 23 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (quinta sequência – distância euclidiana).....	92
Quadro 24 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (sexta sequência – distância euclidiana)	93
Quadro 25 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (sétima sequência – distância euclidiana)	93
Quadro 26 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (oitava sequência – distância euclidiana).....	93
Quadro 27 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (nona sequência – distância euclidiana).....	93
Quadro 28 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (primeira sequência – pesos iguais)	96
Quadro 29 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (segunda sequência – pesos iguais).....	96
Quadro 30 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (terceira sequência – pesos iguais).....	96
Quadro 31 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (quarta sequência – pesos iguais).....	97
Quadro 32 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (quinta sequência – pesos iguais).....	97
Quadro 33 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (sexta sequência – pesos iguais).....	97
Quadro 34 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (sétima sequência – pesos iguais)	97
Quadro 35 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (oitava sequência – pesos iguais).....	98
Quadro 36 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (nona sequência – pesos iguais).....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- API – *Application Programming Interface*
- CCD – *Charge-Coupled Device*
- CMOS – *Complementary Metal-Oxide Semiconduto*
- CP – Centro Perspectivo
- CR2 – É a extensão usada pelo fabricante da câmara Cannon EOS T3i
- DLT – *Direct Linear Transformation*
- DoD – Diferença Gaussiana
- DoG – Diferença Gaussiana
- EOS – *Electro-Optical System*
- FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
- FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia
- GNSS – *Global Navigation Satellite Systems*
- GPS – *Global Positioning System*
- IMU – *Inertial Measurement Unit* (Unidade de Medição Inercial)
- INS – Sistema inercial
- IRU – *Inertial Reference Unit* (Unidade de referencia Inercial)
- JPEG – Extensão dos arquivos Joint Photographic Experts Group
- Matlab – *MATrix LABoratory*
- MIFL – Método de Intersecção Fotogramétrica Linear
- MMQ – Método dos Mínimos Quadrados
- MP – Matriz de Pesos
- MQ – Mínimos Quadrados
- NAVSTAR– *Navigation Satellite with Time and Ranging*
- PA – Parâmetros Ajustados
- PO – Parâmetros Originais (iniciais)
- POE – Parâmetros de Orientação Exterior
- POI – Parâmetros de Orientação Interior
- RAW – É uma denominação genérica de formatos de arquivos de imagens digitais
- SIFT – *Scale Invariant Feature Transform*
- SMMF – Sistema móvel de mapeamento fotogramétrico
- SP – São Paulo
- TLD – Transformação Linear Direta
- UNESP – Universidade Estadual Paulista
- 3D – Modelagem de três dimensões

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2	OBJETIVOS	17
1.3	MOTIVAÇÃO, JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	18
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	AUTO-ORIENTAÇÃO POR IMAGEM	21
2.2	POSICIONAMENTO POR GPS.....	23
2.3	POSICIONAMENTO POR INS.....	24
3	ALGORITMO SIFT	26
3.1	DETECÇÃO DE EXTREMOS	27
3.2	LOCALIZAÇÃO EXATA DE PONTOS-CHAVE	33
3.3	ATRIBUIÇÃO DA ORIENTAÇÃO DOS DESCRITORES	34
3.4	DESCRITOR DOS PONTOS-CHAVE.....	36
4	CORRESPONDÊNCIA : ENCONTRANDO PONTOS HOMÓLOGOS ENTRE DUAS IMAGENS	38
5	FOTOTRIANGULAÇÃO.....	43
5.1	EQUAÇÕES DE COLINEARIDADE	46
5.2	INTERSECÇÃO FOTOGRAMÉTRICA UTILIZANDO PARALAXE	48
5.3	INTERSECÇÃO FOTOGRAMÉTRICA A PARTIR DA RELAÇÃO DE ESCALA.....	50
5.4	INTERSECÇÃO FOTOGRAMÉTRICA LINEAR PELO MÉTODO DE AGRUPAMENTO DE PARÂMETROS	53
6	METODOLOGIA.....	57
7	EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	72
7.1	CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE CÂMARAS	72
7.2	PROCESSAMENTO DAS IMAGENS PELO SIFT.....	73
7.3	EXPERIMENTO COM ATRIBUIÇÃO DE PESOS PARA AS OBSERVAÇÕES (PARALAXE, DISTÂNCIA EUCLIDIANA E PESOS IGUAIS).....	80
7.3.1	<i>Resultado da fototriangulação básica (paralaxe)</i>	<i>84</i>
7.3.2	<i>Resultado da fototriangulação com reprocessamento da matriz peso (paralaxe).....</i>	<i>87</i>
7.3.3	<i>Resultado da fototriangulação com reprocessamento da matriz peso (distância euclidiana)</i>	<i>91</i>
7.3.4	<i>Resultado da fototriangulação com atribuição de pesos iguais para as observações</i>	<i>95</i>
8	CONCLUSÕES.....	101
	REFERÊNCIAS	104
	APÊNDICE A	107
	APÊNDICE B	110
	APÊNDICE C	112

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Com o surgimento dos bancos de dados geográficos também surgiu à necessidade das atualizações serem cada vez mais rápidas, eficientes e com economia de recursos de software e hardware. Por esse motivo tem crescido o interesse pela comunidade científica em pesquisar e desenvolver soluções que venham a tornar mais eficiente essas atualizações.

Um dos interesses dos pesquisadores é a construção de sistema de mapeamento móvel terrestre cuja composição é dada por diferentes sensores de navegação, de posicionamento, de mensuração e de aquisição de imagens integrados via hardware e software numa plataforma acoplada num veículo automotor (**Figura 1**), com a finalidade de produzirem imagens georreferenciadas dos locais por onde transita. Esse tipo de sistema foi desenvolvido inicialmente na década de 80 por cientistas norte-americanos como uma alternativa mais viável economicamente para construção de mapas em relação ao sistema aéreo.



Figura 1 - Protótipo de um veículo de mapeamento móvel terrestre¹

A literatura mostra que os sistemas de mapeamento móvel terrestre foram além de aplicações cartográficas para construção de mapas. Como a possibilidade de determinar as coordenadas tridimensionais de pontos no espaço objeto sem a necessidade de se conhecer pontos de apoio no terreno a partir informações sobre a orientação das câmaras dados pelos Sistema Inercial e/ou GPS, com processos de fototriangulação e interseção fotogramétrica.

Diversas ferramentas ainda continuam sendo desenvolvidas com a finalidade de determinar o posicionamento em relação a um referencial e a integração entre os sensores hoje é realizada com facilidade graças à evolução da eletrônica. Assim, podemos

¹ Fonte: Adaptado de SILVA et al. (2001).

experimental e ter acesso aos mais diversos recursos tecnológicos como GPS (*Global Positioning System*) e do INS (*Inertial Navigation System*) para tal fim.

Porém, é sabido que ambas as tecnologias com suas técnicas possuem algum tipo de limitação. No caso do GPS pode estar ligado a fatores externos que influenciam a recepção do sinal e pode ocasionar a sua perda. Os sensores inerciais podem apresentar um grande e contínuo acúmulo de erros afetando assim diretamente o desempenho do sistema.

Entretanto, nota-se que ainda não existe uma tecnologia que usada de forma isolada (sem integração) forneça uma solução única em toda e qualquer situação para problemas em fotogrametria. Por isso, é comum presenciar a integração de várias delas na intenção de proporcionar uma substituição de algum elemento do sistema por outro sem que haja perda na aquisição de dados.

Na intenção de acrescentar mais recursos ao sistema de mapeamento móvel terrestre, as câmaras digitais, como um desses sensores, estão cada vez mais sendo usadas para fornecer abundância em dados e qualidade nos resultados obtidos a partir da integração entre os sensores. Por isso, a quantidade de câmaras também tem que ser levada em consideração quanto se pretende projetar e construir uma plataforma que integre sensores do tipo GPS, INS e imagens que vão além do mapeamento. Por exemplo, para realizar o cálculo de triangulação que permitem posicionar e dimensionar os objetos contidos nas cenas são necessárias pelo menos duas câmaras.

Uma vez adicionada à plataforma de mapeamento câmaras digitais com a finalidade de automatizar alguma parte do processo de levantamento fotogramétrico é preciso lançar mão de técnicas computacionais, como a visão computacional. A visão computacional é um ramo da computação que desenvolve teorias e tecnologia para construção de sistemas artificiais que podem extrair de imagens digitais informações a cerca dos objetos contidos na cena. Exemplo de aplicações da visão computacionais são os processos que envolvem alguma autonomia, como nos robôs ou nos veículos.

A visão computacional tem inspiração na visão biológica e cujo objeto de estudo é a percepção visual dos seres humanos ou de outros animais. Os resultados desses estudos são modelos matemáticos e computacionais que visam descrever o funcionamento da visão biológica a partir de uma visão artificial implementados tanto em hardware quanto em software. Apesar de existirem diversos trabalhos sobre o assunto somente após a década de 1970 é que as pesquisas se aprofundaram em detrimento da evolução dos computadores que passaram a processar grandes quantidades de dados, como as imagens. Entretanto, até hoje

não existe uma solução única no campo da visão computacional e sim métodos bem definidos para resolver determinadas tarefas.

Dentre os inúmeros métodos computacionais disponíveis a técnica de extração de características em imagens digitais tem sido usada para resolver problemas específicos em diferentes áreas aplicadas. Como é o caso da fotogrametria, que se utiliza de dados oriundos dessas imagens para compor a base de entrada de dados em processos fotogramétricos.

O algoritmo SIFT (*Scale-invariant feature transform*) é uma dessas técnicas de visão computacional que pode extrair características importantes de pontos ou regiões de fotografias digitais. Características essas que podem ser utilizadas como informações iniciais para resolver problemas em fotogrametria.

Originalmente a técnica SIFT foi construída por Davi Lowe² com a finalidade de reconhecer objetos em fotografias digitais a partir de característica extraídas por processo automático. Assim, para qualquer objeto os pontos de interesse podem ser obtidos a partir de uma função que fornece características a respeito do mesmo. Essas características podem ser utilizadas para identificá-lo em cena com outros objetos.

Para realizar esse reconhecimento é importante que as características obtidas pela técnica SIFT sejam constantes mesmo em uma eventual presença de ruído, mudança de escala e na iluminação da cena. Os pontos com essas características, normalmente, estão localizados em regiões na imagem com alto contraste, tais como os extremos (bordas).

A posição relativa entre os objetos da cena também é uma característica importante quando se deseja realizar o reconhecimento de objetos. Pois, essa posição não deve mudar de uma imagem para outra, se isso ocorrer o reconhecimento tende a falhar. Porém, o SIFT pode extrair pontos em grande quantidade reduzindo os eventuais erros ocorridos por esse tipo de variação. Esse tipo de problema pode ocorrer num levantamento em ruas ou rodovias com os eventuais veículos em movimento. Entretanto, para este estudo não será levado em consideração tal situação.

Também, neste trabalho o uso da técnica SIFT não teve como propósito o reconhecimento de objetos e sim a extração de características comuns entre duas ou mais imagens. Para realização do processo de fototriangulação foram processadas quatro imagens de cada vez, dois pares estéreo. O SIFT foi aplicado nas imagens ditas laterais (primeiro e segundo par) e nas imagens avante (primeira e segunda imagem do lado esquerdo e do lado direito). A partir dos pontos extraídos pela técnica foi possível realizar a correspondência

² David Lowe é professor do departamento de Ciência da Computação da Universidade de British Columbia e criador da técnica SIFT.

entres as características de cada um deles. Os pontos considerados aptos a comporem o processo de fototriangulação devem estar presentes nas quatro imagens (dois pares estéreos), caso contrário o mesmo é descartado. Isso pode ser visto graficamente na **Figura 2**, onde os pontos 1, 3 e 4 são utilizados no processo de fototriangulação, já o ponto 2 que aparece em apenas duas imagens é descartado.

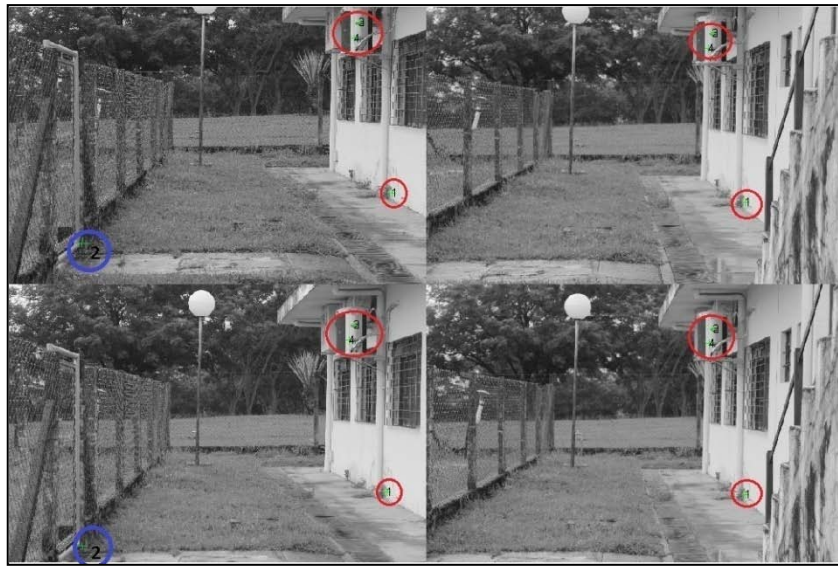


Figura 2 - Observações (pontos) que aparecem nas quatro imagens

A técnica do vizinho mais próximo utilizada pelo algoritmo SIFT para estabelecer a correspondência entre os pares foi a mesma utilizada para verificar quais os pontos aparecem nas quatro imagens ao mesmo tempo, porém, em processos separados. Isto é, primeiro estabeleceu a correspondência entre os pares de imagens laterais e avante, em seguida verificou-se quais pontos extraídos e correspondidos em pares aparecem nas quatro imagens.

A partir dos pontos que aparecem nas quatro imagens simultaneamente é possível realizar a fototriangulação pelo método dos feixes perspectivos a fim de estimar a orientação exterior, realizando assim, uma auto-orientação de imagem sem apoio de sensores externos, somente com observações oriundas das imagens.

1.2 Objetivos

Considerando um sistema móvel de mapeamento fotogramétrico (SMMF) se deslocando ao longo de uma via urbana e capturando imagens contínuas com o apoio de equipamentos (sensores) do tipo GNSS, INS e câmaras digitais, objetiva-se implementar uma solução semi-automática para estimar os POE (parâmetros de orientação exterior) com base

exclusivamente em processo fotogramétrico, particularmente a fototriangulação por feixes de raios a partir das fotocoordenadas extraídas pelo algoritmo SIFT.

Como objetivos específicos, têm-se:

- avaliar a técnica de visual computacional desenvolvido por David Lowe (SIFT) para verificar quais parâmetros de entrada e saída e suas estruturas.
- verificar se os resultados fornecidos pelo SIFT permitem dar seguimento ao processo de fototriangulação.
- implementar a correspondência entre os pontos-chave extraídos nos dois pares de imagens (4 imagens) pertencentes a uma sequência.
- implementar a fototriangulação por feixes de raios e o ajustamento das observações sob o critério do mínimo quadrado.
- analisar os POEs estimados para cada sequência de processamento e o seu comportamento ao longo do caminhamento fotogramétrico.

1.3 Motivação, justificativa e relevância

A proposta deste projeto está em estudar, aplicar e desenvolver os algoritmos necessários para realizar inicialmente a extração de fotocoordenadas pelo algoritmo SIFT e a fototriangulação a fim de orientar automaticamente uma sequência de pares de imagens frontais obtidas por câmaras de vídeo digital.

O interesse e a motivação para desenvolver esse projeto deu-se primeiramente pela aplicabilidade do conhecimento do autor em computação (programação) em outra área diferente de sua formação, tornando isso um grande desafio

Porém, o maior desafio levantado foi à possibilidade de utilizar técnicas de visão computacional integradas ao processo de fototriangulação, na tentativa de obter um processo totalmente automático (sem a intervenção do operador) desde a obtenção das observações até a fototriangulação para realizar a orientação das imagens.

Além da motivação pessoal, esta dissertação se justifica pela sua relevância na integração da técnica e a ciência. Ainda mais no momento em que é verificado uma abundância de técnicas e tecnologias em suas diversas empregabilidade. Por isso, acreditamos que estudos e pesquisas sobre a aplicação dessas técnicas e tecnologias envolvidas no mapeamento móvel terrestre podem fornecer dados e informações para auxiliar empresas e a

própria academia em tomadas de decisão na construção de sistemas integrados de mapeamento.

Ainda, com foco acadêmico, este trabalho investiga outra técnica computacional integrada ao processo de fototriangulação utilizada em um SMMF desenvolvidos em projetos anteriores, tais como: (BARBOSA, 2006; OLIVEIRA, 2003; SILVA et al., 2001). Os dados obtidos aqui servem como informações a cerca da potencialidade da técnica SIFT na extração e correspondência de pontos entre imagens estereoscópicas aplicadas a fotogrametria.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação aqui apresentada está organizada em oito capítulos, conforme a descrição a seguir:

No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica pertinente ao assunto, com ênfase na auto-orientação por imagem e dois sensores que compõem um sistema de mapeamento móvel terrestre.

No capítulo três são expostos os fundamentos da técnica SIFT criada por Davi Lowe. Técnica desenvolvida para reconhecimento de objetos e que usa princípios da visão computacional. Aqui a mesma é utilizada para extração de características entre imagens que compõem um levantamento fotogramétrico de uma via urbana.

No quarto capítulo é tratada de fundamentos de algumas técnicas de correspondência entre imagens digitais. Dando ênfase na correspondência a partir da características extraídas pelo algoritmo SIFT entre pares de imagens estereoscópicas.

Já no capítulo cinco são abordados itens necessários para realizar a fototriangulação neste trabalho, tal como a adaptação da equação de colinearidade para problema aqui levantado, interseção fotogramétrica via paralaxe, por relação de escala e pelo método de agrupamento de parâmetros. Itens fundamentais para formalizar as etapas para atingir o objetivo, que é a orientação de imagens.

No sexto capítulo é apresentado o detalhamento dos procedimentos metodológicos empregados para a realização da aquisição das imagens, extração dos pontos, correspondência entre eles em pares de imagens estereoscópicas, a fototriangulação e por fim a estimação da orientação exterior para cada câmara em cada tomada de fotos a fim de orientar as imagens obtidas a partir de um levantamento fotogramétrico.

O sétimo capítulo trata dos experimentos, resultados e a discussões pertinentes as informações obtidas pela execução dos procedimentos estabelecidos anteriormente e formalizados pela metodologia.

Por fim, o último capítulo intitulado de conclusão visa apresentar pareceres sobre esta dissertação e recomendações sobre futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Auto-orientação por imagem

O termo auto-orientação de imagem pode ser aplicado desde funções de uma máquina fotográfica digital³ até sensores acoplados em satélites de monitoramento e mapeamento⁴. Entretanto, esse termo é utilizado neste trabalho para dizer que uma auto-orientação por imagem é a capacidade do processo de fototriangulação tem em estimar os POEs a partir de informações oriundas apenas das imagens levantadas, isto é, sem o apoio durante o processo de sensores externos como o GPS e/ou INS.

Uma imagem digital de perspectiva central é uma projeção de objetos tridimensionais, que se encontram em qualquer ambiente, em uma cena bidimensional. Os feixes de raios ópticos oriundos dos pontos da cena adentram a câmara passando pelo centro perspectivo (CP). Esses raios são a interação da luz que ao atingir o objeto reflete parte da luz que é em seguida capturada pelo dispositivo sensor. Esses dispositivos resultam da conjunção das tecnologias óptica, eletrônica e digital, e podem ser classificados em CMOS (*Complimentary Metal Oxide Semiconductor*) e CCD (*Charge-Coupled Device*).

As imagens obtidas por câmaras digitais podem ser uma alternativa a mais de se obter informações do ambiente quando integradas a sistemas híbridos do tipo GNSS/INS para fins de mapeamento móvel de diversos ambientes, tais como: vias urbanas ou rurais.

Os sensores GNSS e INS quando utilizados em conjunto fornecem informações sobre a posição e orientação do sistema físico que fazem parte. Porém, esses dois sistemas por si só não estão imunes a falhas no recebimento de sinal GPS e nem de interferências externas ao INS que podem afetar significativamente o seu desempenho. Problema de ordem interna também pode ocorrer com o INS, quando o mesmo é utilizado por um grande período de tempo contínuo os erros tendem a ser acumulados ocasionando uma divergência nos dados recebidos.

Por isso, técnicas de posicionamento e orientação que utilizam imagens digitais oriundas de sistemas fotogramétricos podem apresentar uma alternativa aditiva ao sistema

³ Função da câmara digital da Sony que pode ser obtida em http://www.playshopnet.com/ecommerce_site/produto_1599_12119_Camera-Digital-3D-Sony-Cyber-shot-DSC-WX7-L-162MP-5x-Zoom-Optico-Filma-Full-HD-Foto-Panoramica

⁴ Satélites de auto-orientação que pode ser visto em <http://agricoprecisao.weebly.com/1/post/2012/11/auto-orientao-de-satlites.html>

híbrido (GNSS/INS) de mapeamento móvel. Com o objetivo de amenizar os problemas citados acima.

É fato que atualmente tem tido um crescimento das pesquisas com o intuito de construir um método de posicionamento exclusivamente por imagens. Li e Sclaroff (2007) publicaram uma solução que usa duas câmaras em montagem estéreo, fluxo óptico e correspondência para estimar apenas pelas imagens obtidas por essas câmaras o campo de movimento tridimensional para pontos dos objetos nas cenas.

Silva et al. (2007) e Barbosa (2006) desenvolveram uma solução para orientar as imagens com base somente no processamento de imagem e técnicas fotogramétricas sem quaisquer sensores externos. Essa solução baseou-se na estimativa da velocidade do veículo que foi obtida pelo fluxo óptico denso calculado.

Randeniya et al. (2008) apresentaram uma solução de calibração de um sistema inercial integrado com um sistema visual. Tal integração é uma técnica passiva apropriada a ambientes internos (*indoor environment*). Os autores adaptaram-na para ambiente externo com apenas os dados do sistema visual e obtiveram resultados estimulantes na estimativa da orientação da câmara (*pose estimation*) sendo aceitável mesmo na ausência de sinais do GPS.

Veth (2011) sintetizou em um dos seus trabalhos as técnicas e os avanços na navegação usando apenas imagens. As técnicas que ele destacou são classificadas em duas classes de métodos, a primeira é baseada em fluxo óptico (*optical flow*), a segunda baseia-se no rastreamento de feições (*feature tracking*) usando a técnica SIFT. Ambos os métodos mencionados por ele usam o movimento aparente de partes da imagem entre quadros (*frames*) para determinar o movimento relativo da câmara.

Entretanto, resumidamente, toda e qualquer técnica de posicionamento apoiada em imagens requer três operações básicas: encontrar locais na imagem adequados para rastrear, corresponder estes locais em uma imagem subsequente e estimar a posição.

Estas operações são denominadas, respectivamente, de problemas de seleção de áreas de interesse, de correspondência e de estimação da posição, no campo da visão computacional. Em fotogrametria, essas operações são denominadas de selecionar pontos ou feições, correspondê-los usando alguma métrica de correlação e, por fim, estimar os parâmetros de orientação exterior. Neste trabalho os pontos e/ou feições foram extraídos pela técnica SIFT e correspondidos com base num grau de correlação entre os vizinhos mais próximos, a partir desses dados foi realizada a fototriangulação com ajustamento das observações para a estimativa dos POEs. Essas observações foram oriundas exclusivamente da imagem e obtidas de forma automática pelo algoritmo SIFT, sem a intervenção humana no processo.

2.2 Posicionamento por GPS

O Departamento de Defesa dos Estados Unidos – DoD (*Department of Defense*) desenvolveu um sistema de radionavegação nominado de NAVSTAR-GPS, comumente conhecido como GPS cujo objetivo principal era prover para as forças armadas um sistema confiável de posicionamento global.

O GPS (*Global Positioning System*) oferece um posicionamento de alta acurácia que influenciou diretamente o interesse dos mais variados tipos de usuários e segmentos da comunidade civil que viram nessa tecnologia aplicações em navegação, posicionamento geodésico e outros (Monico, 2008).

Segundo Monico (2008), o princípio básico de posicionamento por GPS é definido pela medição das distâncias entre o usuário e no mínimo quatro satélites (Figura 3). Uma vez conhecida às coordenadas dos satélites em seu sistema de referência é possível computar as coordenadas da antena do equipamento receptor do sinal GNSS (*Global Navigation Sateellite Systems*). Entretanto, bastariam apenas três satélites para calcular as coordenadas da antena já que, do ponto de vista geométrico, três distâncias seriam suficientes, desde que não pertençam ao mesmo plano. O quarto satélite é necessário por causa do não sincronismo entre os relógios dos satélites e o equipamento receptor.

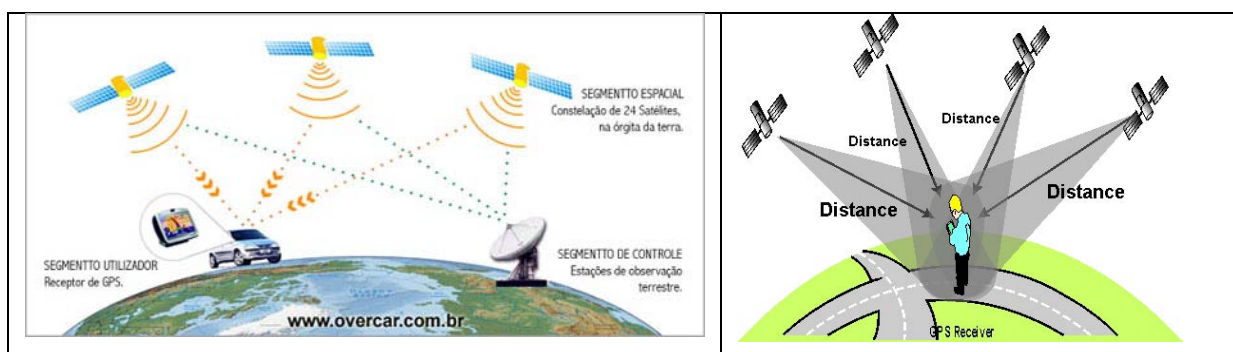


Figura 3 – Constelação de satélites GPS⁵

Apesar de um sistema GPS, atualmente, ter uma alta precisão, com uma constelação de satélites estável e disposta em uma órbita elevada fornecendo uma cobertura mundial por 24 horas em qualquer condição de tempo, ainda existem algumas limitações no seu funcionamento. O GPS pode sofrer alterações em seu desempenho quando utilizado em certos ambientes com condições não favoráveis para o um bom recebimento do sinal, tal como zonas muito arborizadas e/ou edificadas. Por isso, para um bom recebimento do sinal GPS é

⁵ Fonte: Imagens obtidas do Google em <https://www.google.com.br/imghp?hl=en&tab=wi>

necessário ter algumas condições mínimas, como não estar em locais fechados, visibilidade de pelo menos 4 satélites e a inexistência de tempestades solares.

O GPS, hoje, é uma ferramenta importante para obter o posicionamento (coordenadas) de qualquer objeto na superfície terrestre.

2.3 Posicionamento por INS

Segundo Grewal et al. (2007), um sistema inercial, ou plataforma inercial tem a finalidade de adquirir de informações sobre a posição, velocidade e atitude de um veículo em relação a um determinado referencial. Essas informações são fornecidas por dois sensores: acelerômetros e giroscópios, ver figuras 4, 5, 6 e 7 respectivamente. A partir da combinação dos dois sensores e um plano de referência estabilizado o sistema é capaz de identificar pequenas alterações de movimento nos três eixos baseados na primeira e segunda lei de Newton que descreve o comportamento de corpos em movimento.

“Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que seja forçado a mudar aquele estado por forças aplicadas sobre ele.”⁶

“A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção de linha reta na qual aquela força é imprimida.”⁷

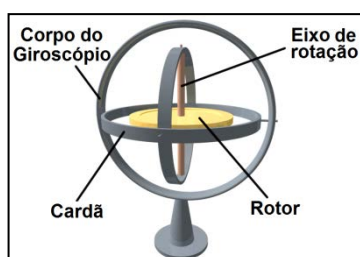


Figura 4 – Giroscópio⁸



Figura 5 – Giroscópio analítico⁹

⁶ Isaac Newton, *The Principia*, A new translation by I.B. Cohen and A. Whitman, University of California press, Berkeley 1999.

⁷ Newton's Three Laws of Motion.

⁸ Modelo explicativo das partes de um giroscópio. Adaptado de <http://www.teknologeeek.com/2010/08/23/giroscopios-antes-y-ahora/>

⁹ Fonte: <https://www.google.com.br/imghp?hl=pt-BR&tab=wi>

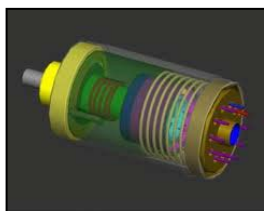


Figura 6 – Acelerômetro Elétrico¹⁰

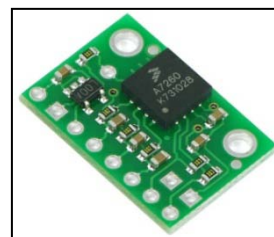


Figura 7 - Acelerômetro Eletrônico¹¹

Um sistema inercial consiste de duas plataformas (Grewal et al. (2007):

- IMU (*Inertial Measurement Unit*), unidade de medida inercial ou a IRU (*Inertial Reference Unit*) unidade de referência inercial que são compostas por um conjunto de sensores: dois ou mais acelerômetros, três ou mais giroscópios que são montados numa base fixa e comum para manter a mesma orientação relativa.
- Um ou mais computadores de navegação cuja tarefa é o cálculo da aceleração gravitacional para manter uma estimativa da posição do veículo onde a plataforma está instalada.

Segundo Grewal et al (2007), o sistema é composto por giroscópios e acelerômetros que combinados em uma plataforma inercial auxiliada por um computador é possível calcular a aceleração espacial e determinar a posição (coordenadas) em relação a um ponto inicial.

Para que esse sistema calcule com precisão a posição, velocidade e atitude a partir de um ponto inicial é preciso conhecer primeiro as coordenadas desse ponto. Essas coordenadas iniciais servem de informações preliminares (estado inicial) e podem ser obtidas por um receptor GPS. Para determinar as novas posições o sistema inercial não precisa mais de informações externas (emissão ou recepção de sinais), diferente do GPS.

Segundo Silva (2011) e Tao (2001), é comum sistemas de mapeamento móvel serem compostos e integrados por receptores GPS, câmaras de vídeo analógica ou digital e sistema inercial de navegação (INS), onde o último sensor serve basicamente para recalcular a posição do veículo quando o sinal do GPS é perdido.

¹⁰ Fonte: <http://www.tecmundo.com.br/curiosidade/2652-o-que-e-um-acelerometro-.htm>

¹¹ Fonte: <http://multilogica-shop.com/Placa-com-Aceler%C3%B4metro-tri-axial-MMA7260Q-Pololu>

3 ALGORITMO SIFT

A técnica SIFT, desenvolvida por David G. Lowe, foi apresentada à comunidade científica através do artigo *Distinctive Image Feature from Scale-Invariant Keypoints* no *International Journal of Computer Vision*, em 2004 e teve grande repercussão e aceitação (Lowe, 2004).

A estratégia inicial adotada pelo algoritmo SIFT é filtrar sucessivamente a imagem a fim de obter um processo rápido na extração de pontos-chave e em seguida a eliminação daqueles que não se enquadram em critérios previamente definidos. Todo esse processo procura garantir a invariância das características locais e de escala.

Esse algoritmo foi desenvolvido inicialmente para reconhecimento de objetos, porém, hoje, é possível encontrar aplicações dele em diversas áreas, como a navegação de robôs, modelagem 3D, o reconhecimento de gesto e detecção de objetos em imagem de vídeo. Um dos motivos de tantas aplicações é que a técnica utilizada pelo SIFT tem o objetivo de transformar os pontos-chave obtidos de uma imagem numa grande quantidade de vetores que representam alguma característica. Lowe (2004) acredita que a vantagem dessa técnica está justamente no fato de que esses vetores de características são invariantes a translação, escala, rotação, mudança de iluminação, ruído na imagem e pequenas mudanças de perspectiva.

Rachid et al. (2009) destaca que o algoritmo SIFT tem a capacidade de analisar uma imagem e descrevê-la a partir de assinaturas ligadas a pontos-chave e que estão relacionadas às posições relativas de cada pixel e sua intensidade de níveis de cinza.

Segundo Lowe (2004), o reconhecimento através de imagens é uma área que envolve problemas de visão computacional e que tem o objetivo de extrair objetos, identificar cenas e rastrear movimentos através de pontos-chave nas imagens que não variam em relação à escala, nem à mudança de ponto de vista, rotação ou mesmo a iluminação.

Esse algoritmo é considerado robusto pelo fato de realizar uma série de procedimentos com a imagem que se deseja estudar. Estes procedimentos devem seguir uma metodologia para que a extração de pontos-chave seja bem sucedida. No total, os procedimentos foram agrupados em quatro etapas.

A primeira etapa, *detecção de extremos*, é composta por processos de extração de bordas por diferença de filtros gaussianos. O resultado dessa etapa é a identificação dos pontos de interesse, isto é, as bordas.

A segunda etapa, *localização de pontos-chave*, define a localização dos pontos-chave e também pode descartar os pontos considerados instáveis. Todos os pontos detectados na etapa

anterior são candidatos a tornarem-se pontos-chave. Por isso, nesta etapa objetiva-se calcular a localização exata destes pontos-chave e a escala gaussiana destes pontos a partir de um modelo. Esses pontos-chave são identificados através dos valores máximo e mínimo que são obtidos a partir da comparação entre os pixels vizinhos das imagens obtidas pela diferença gaussiana. Assim, esses pontos-chave são selecionados baseados em medidas de estabilidade entre os pixels.

A terceira etapa, *definição de orientação*, atribui para cada ponto-chave uma orientação baseada em características locais da imagem. Isso é feito calculando para cada amostragem da imagem em uma determinada escala uma magnitude e uma orientação do gradiente usando as diferenças entre pixels vizinhos ao ponto-chave analisado.

Na quarta etapa, *descritores dos pontos chaves*, são construídos descritores a partir da medição dos gradientes locais em uma região vizinha a cada ponto de interesse. As medidas encontradas nesta etapa são normalizadas a fim de obter um nível significativo de distorção e mudança na iluminação de cada ponto.

Segundo Gonzáles (2010), descritores são vetores que contém característica de uma imagem ou regiões da mesma. Normalmente, descritores são utilizados para comparar a mesma região em diferentes imagens podendo ser locais ou globais.

Em Nunes et al. (2009) é mencionado que o descritor mais simples é um vetor com as intensidades dos pixels de uma determinada imagem e que, também, pode ser a distribuição de intensidades de uma região representada por seu histograma.

3.1 Detecção de extremos

Para detectar os extremos de uma imagem, a técnica SIFT utiliza-se dos máximos e dos mínimos em uma pirâmide¹² de imagens convoluídas com a função *Diferença de Gaussiana*. Assim, os pontos-chave são descritos como extremos em diferentes escalas gaussianas. A detecção dos extremos é dada pela aplicação de um filtro gaussiano com um comportamento similar ao filtro passa-baixa que tem o propósito de atenuar as altas frequências resultando numa suavização da imagem original.

Filtros gaussianos são compostos por matrizes de dimensões ímpares (máscaras) de ordem 3x3, 5x5, 7x7 e outras, juntamente com um fator de suavização denominado de desvio

¹² Pirâmide de imagem é uma sequência de imagens submetidas a uma suavização, repetidamente, até atingir um limiar pré-estabelecido. Após isso, a resolução da imagem é reduzida para essa sequência e em seguida reinicia processo novamente de suavização até que se atinja o número de níveis desejado.

padrão máximo sigma (σ), cuja distribuição tem média igual a zero conforme pode ser visto na Figura 8.

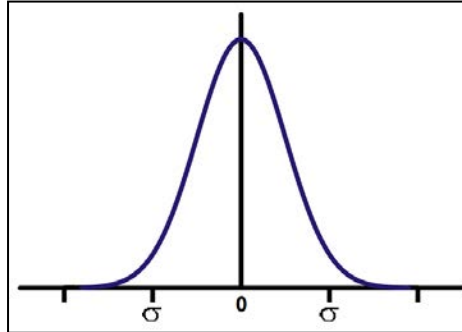


Figura 8 - Distribuição gaussiana com média zero e desvio padrão (σ)

A suavização de uma imagem está diretamente ligada ao valor do sigma, quanto maior o valor maior será a suavização. Já o tamanho da janela não influencia significativamente no resultado final do processo.

Segundo Gonzalez e Woods (2008) o aumento do desvio padrão sigma proporciona também um aumento no número de pixels com valores diferentes de zero. Isso acarreta que os pixels vizinhos a cada ponto contribuirão mais para suavização da imagem.

O processo de suavização de uma imagem é dado pela convolução da imagem por um filtro. O filtro aqui utilizado é composto por uma função denominada de gaussiana que possui três argumentos, um deles é conhecido como o valor de suavização gaussiana (σ). Esse fator também pode ser referenciado como o coeficiente de suavização ou escala gaussiana. A convolução de uma imagem $I(x, y)$ pela função $G(x, y, \sigma)$ é dado por:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (1)$$

A função gaussiana $G(x, y, \sigma)$ na forma isotrópica (i.e. circularmente simétrica) é definida pela equação abaixo:

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (2)$$

Onde: σ é a variável que define o desvio padrão, ou coeficiente de suavização (Figura 9).

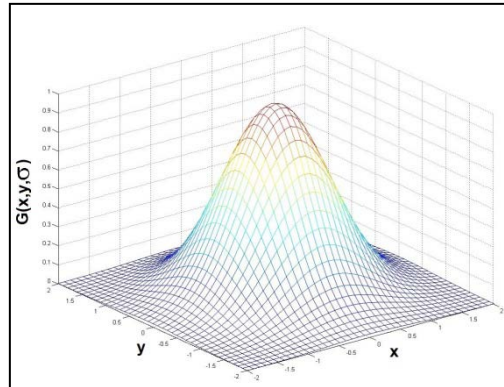


Figura 9 - Comportamento do filtro gaussiano¹³

O resultado da aplicação do filtro gaussiano com diferentes sigmas pode ser visto na Figura 10.

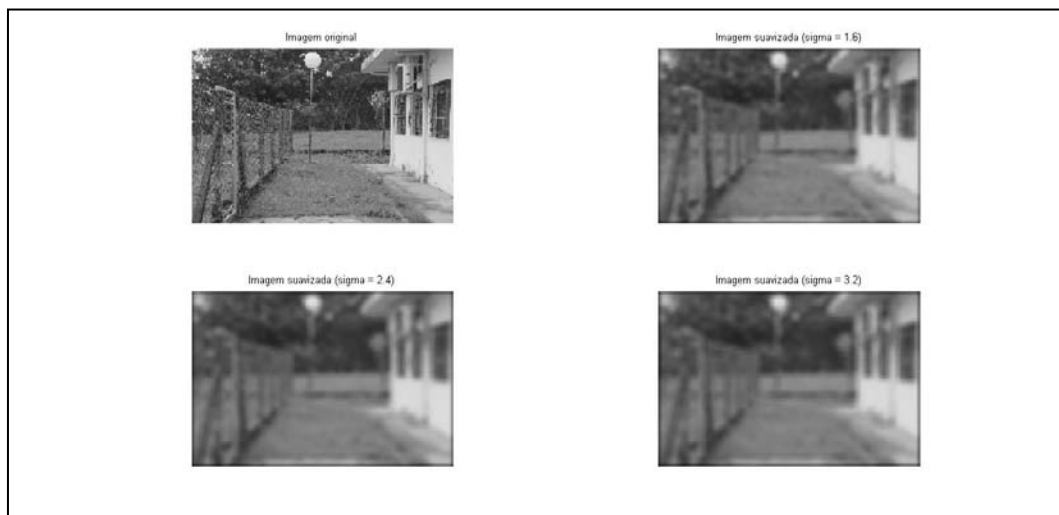


Figura 10 - Imagens após o filtro gaussiano

Já a função de *Diferença de Gaussiana (DoG)* é obtida a partir da subtração das imagens filtradas por (G) com a mesma escala (σ), porém, separadas por uma constante k . Uma das características da função DoG quando utilizada em imagens digitais é realçar as bordas, pois as bordas tendem a ter uma alta frequência. A função DoG é dada pela equação abaixo:

$$DoG = G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma) \quad (3)$$

¹³ O código em Matlab que gera este gráfico pode ser encontrado no Apêndice A.

Com base nas equações definidas acima, o resultado de uma convolução de uma determinada imagem envolvendo um filtro do tipo *DoG* pode ser expresso da seguinte forma:

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (4)$$

Este filtro permite a detecção das variações de intensidade existente em uma imagem digital. Dentre essas variações podemos destacar o contorno demonstrado nas imagens que compõem a Figura 11.

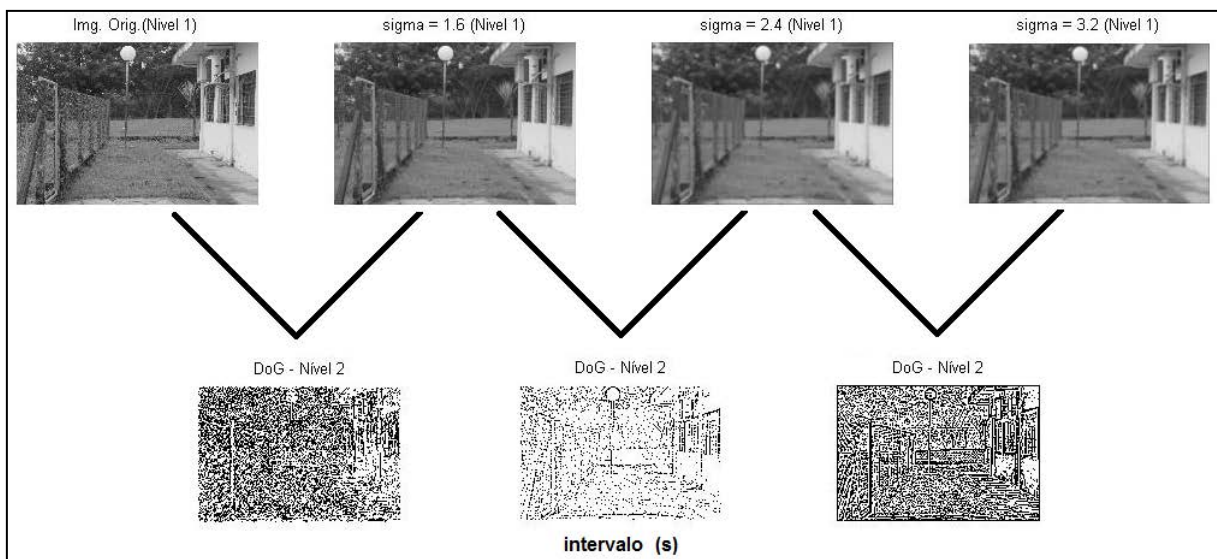


Figura 11 - Diferença gaussiana (DoG) da primeira oitava.

A função gaussiana tem como objetivo a obtenção de amostras da imagem onde detalhes indesejados como os ruídos são eliminados ressaltando características fortes e interessantes para o problema, como as bordas. Isso é feito variando a escala gaussiana (σ) a fim de encontrar tais características em diferentes escalas como pode ser visto graficamente na Figura 12 que mostra duas oitavas.

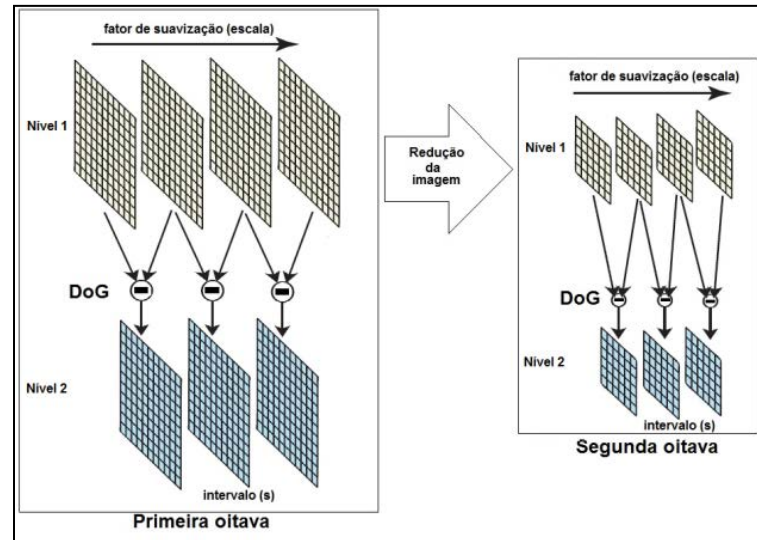


Figura 12 - Diferença gaussiana entre oitavas¹⁴

Lowe (2004) sugere quatro passos para criação das oitavas usando a diferença gaussiana vistas na Figura 12.

1) Na primeira oitava, a imagem original que se encontra a esquerda no nível 1 é convoluída por um filtro gaussiano gerando imagens separadas por um fator escalar k no espaço da escala gaussiana.

2) É recomendado fazer a convolução da imagem até 2σ para que os descritores construídos pelo processo sejam invariantes a escala. Por isso, para gerar s intervalos o fator escala k é definido por $k = 2^{1/s}$, que produz $s+3$ imagens na respectiva oitava. Assim, garante que a detecção de extremos cubra toda oitava. Na Figura 12 é possível verificar que $s = 1$ e para que isso ocorra é necessário apenas 4 imagens no nível 1.

3) As imagens adjacentes obtidas pelo filtro gaussiano no nível 1 são subtraídas a fim de produzirem novas imagens do DoG no nível 2.

4) Após o processamento da oitava, a imagem central no nível 1 da primeira oitava é reduzida (*downsample*¹⁵) de escala no espaço. Essa imagem será a primeira da oitava seguinte, e os processos 1 até o 4 são repetidos novamente.

A fim de detectar os máximos e mínimos locais da imagem $D(x, y, \sigma)$ cada ponto da amostra (s) resultante da diferença gaussiana no nível 2 é analisado comparando a intensidade do ponto (X) com a intensidade de seus oito vizinhos com os nove encontrados na imagem de escala acima e abaixo (O) conforme demonstrado na Figura 13. Ele será selecionado somente

¹⁴ Adaptado de Lowe (2004).

¹⁵ Downsample: reduz a imagem, isto é, altera a frequência da amostra por um fator de dois.

se for maior ou menor do que todos os seus vizinhos. A Figura 14 mostra o resultado dessa comparação em uma imagem real.

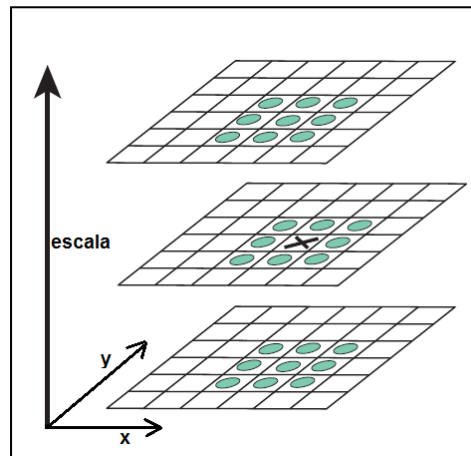


Figura 13 - Máximos e mínimos da diferença gaussiana¹⁶



Figura 14 - Resultado da extração dos máximos e mínimos (DoG)¹⁷

Após a detecção dos extremos no espaço escala, a próxima etapa define a localização exata dos pontos-chave e o descarte dos que são instáveis.

¹⁶ Fonte: Adaptado de Lowe (2004).

¹⁷ O código fonte pode ser visto no Apêndice A.

3.2 Localização exata de pontos-chave

Esta etapa do processo tem a finalidade de localizar pontos-chave e descartar aqueles que são instáveis. As bordas destacadas no procedimento anterior contêm possíveis pontos-chave que necessitam serem calculadas suas localizações exatas no espaço escala gaussiana.

Os pontos-chave selecionados nesta etapa são baseados em medidas de estabilidade, isto é, são definidos os melhores pontos-chave para o sistema de mapeamento por meio de medidas dos gradientes.

Brown e Lowe (2002) desenvolveram um método que extrai os pontos-chaves com base nos extremos locais (picos) no espaço escala gaussiana. Numericamente, os extremos locais são elementos obtidos pela comparação de sua intensidade de nível de cinza com o seus vizinhos. Ele é selecionado se somente se o valor avaliado é menor ou maior do que todos os seus vizinhos. Esse processo pode ser visto na Figura 13.

Em seguida, os extremos locais são interpolados por uma função quadrática cuja finalidade é determinar a localização exata pela interpolação do máximo. Essa interpolação é realizada pela expansão de Taylor da função Diferença de Gaussiano aplicado à imagem $D(x, y, \sigma)$, assim, o valor extremos em relação a sua vizinhança passam a se os novos valores de localização e escala do ponto-chave analisado no momento. Esse processo garante que o ponto-chave é invariante a escala. O modelo matemático que expressa essa expansão é dado pela equação (5):

$$D(X) = D + \frac{\partial D^T}{\partial X} X + \frac{1}{2} X^T \frac{\partial^2 D}{\partial X^2} X \quad (5)$$

Onde, a primeira e segunda derivada do valor de $D = D(x, y, \sigma)$ são calculados no ponto de amostragem. Já $X = (x, y, \sigma)^T$ representa o deslocamento deste ponto.

É possível computar a localização em sub-pixel do ponto analisado através do extremo da equação (5), a localização do extremo \hat{X} é determinado pela derivada da função gaussiana em relação a posição x da seguinte forma:

$$\hat{X} = - \frac{\partial^2 D^{-1}}{\partial X^2} \frac{\partial D}{\partial X} \quad (6)$$

$$D(\hat{X}) = D + \frac{1}{2} \frac{\partial D^T}{\partial X} \hat{X} \quad (7)$$

Segundo Gonzáles (2010), o valor obtido pela função $D(\hat{X})$ pode ser útil para rejeitar extremos instáveis com baixo contraste. Pois, segundo Gonzalez e Woods (2008), extremos com baixo contraste são sensíveis a ruídos.

Segundo Lowe (2002) pontos-chave com valores de $|D(\hat{X})|$ menores que um determinado limiar devem ser descartados. O autor sugere um limiar de 0.03 desde que os tons de cinza dos pixels da imagem analisada estejam normalizados com valores entre 0 e 1.

3.3 Atribuição da orientação dos descritores

Segundo Badolato (2011), os pontos-chave que foram localizados e considerados estáveis pela etapa anterior estão aptos a receberem uma orientação. Essa orientação é baseada na magnitude dos gradientes de seus vizinhos na imagem analisada, isto é, com no seu respectivo σ .

Por isso, quando se atribui uma orientação a esses pontos-chave, os descritores formados possuem uma invariância quanto à rotação.

O método utilizado em Gonzáles (2010) calcula os gradientes para cada ponto de cada imagem $L(x, y, \sigma)$, cuja magnitude de $m(x, y)$ e a orientação $\theta(x, y)$ são dados por:

$$m(x, y) = \sqrt{\begin{matrix} (L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 \\ + \\ (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2 \end{matrix}} \quad (8)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)} \right) \quad (9)$$

Segundo Sasdelli (2010), com base nos valores dos gradientes e suas orientações é possível construir um histograma de orientações da região ao redor de cada ponto. Analisando o histograma da Figura 15 é possível verificar que o valor mais alto (pico) corresponde ao valor de interesse, valor esse que condiz com a direção da orientação em relação ao ponto-chave.

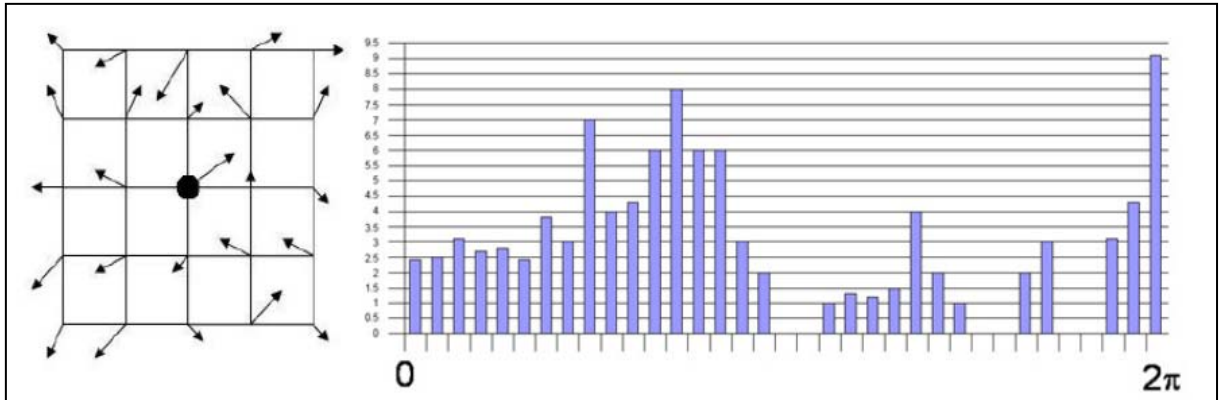


Figura 15 - Histograma de orientações de um ponto-chave¹⁸

É possível que haja múltiplos picos, assim, o ponto-chave receberá múltiplas orientações tornando-o mais estável. Porém, ao final, uma parábola é usada para interpolar os valores mais próximos ao pico, neste caso 3 valores. Esse procedimento é realizado para se obter uma orientação mais precisa. A Figura 16 apresenta os pontos-chave extraídos e suas respectivas magnitudes e orientações através de vetores.

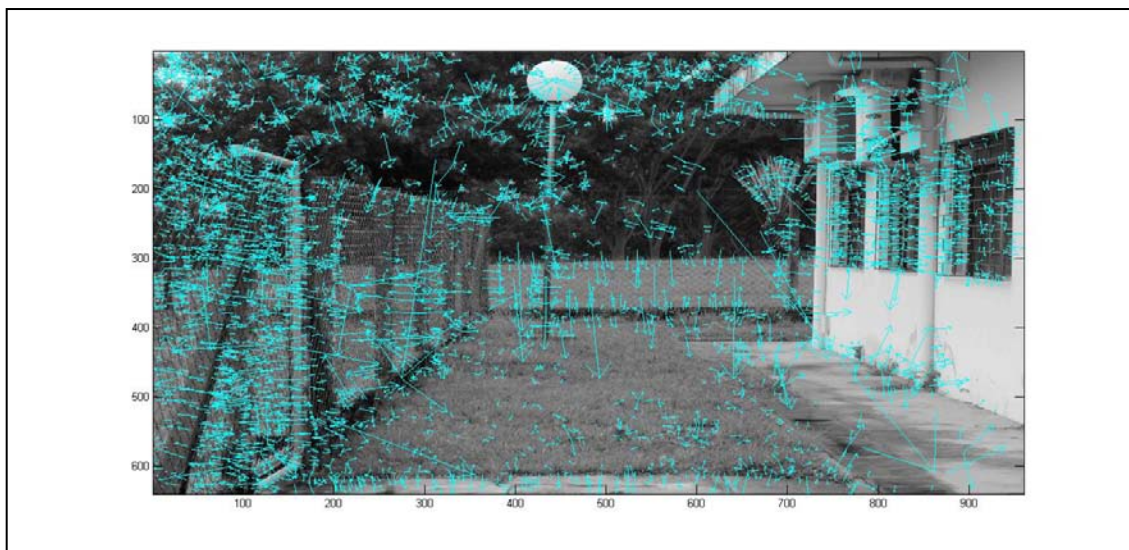


Figura 16 - Orientação e magnitude de cada ponto-chave

Assim, ao final desta etapa cada ponto-chave terá quatro atributos:

- Coordenada x;
- Coordenada y;
- Magnitude;
- Orientação.

¹⁸ Fonte (Lowe, 2004).

3.4 Descritor dos pontos-chave

Nesta etapa é construído um descritor local atribuindo aos pontos-chave descritores invariantes a iluminação. Esse processo permite tornar cada ponto-chave bem distinguível do outro. Essas informações adicionadas (descritores) são suficientes para caracterizar um ponto-chave com sendo invariante a escala e rotação.

Sasdelli (2010) buscou a inspiração no funcionamento da visão biológica para se obter invariância a transformações afins estudando a retina dos primatas que são constituídas de mecanismos cujos receptores luminosos permitem que o gradiente de cada ponto de uma imagem se movimente em qualquer direção. O exemplo que ele utilizou computou os gradientes de uma região próxima ao ponto de interesse criando em seguida os histogramas para cada região que circundava o ponto de interesse, conforme pode ser visto na Figura 17 que mostra os vetores e a direção para cada uma dessas regiões.

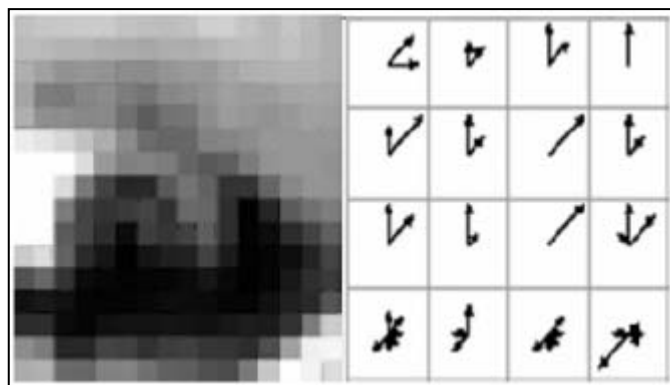


Figura 17 - Cálculo de um Descritor¹⁹

O descritor para um determinado ponto-chave é criado calculando as magnitudes e orientações dos gradientes amostradas ao seu redor. Uma função Gaussiana é aplicada com o propósito de atribuir um peso à magnitude do gradiente em cada ponto que se encontra na vizinhança. A janela de suavização Gaussiana com escala σ igual à metade da largura da janela do descritor evita mudanças significativas do descritor quando pequenas mudanças na posição da janela são aplicadas.

Após a suavização dos gradientes o descritor é composto por um vetor cujo conteúdo são os valores do histograma que tem 8 valores de orientação (**Figura 18**), cada um criado ao

¹⁹ Fonte: Sasdelli (2010).

longo de uma janela de apoio de 4x4 pixels (**Figura 19**). O vetor de característica é constituído por 128 elementos com uma janela de 16x16 pixels (**Figura 20**).

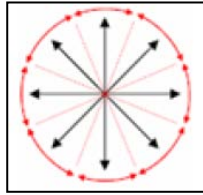


Figura 18 - Orientações do histograma

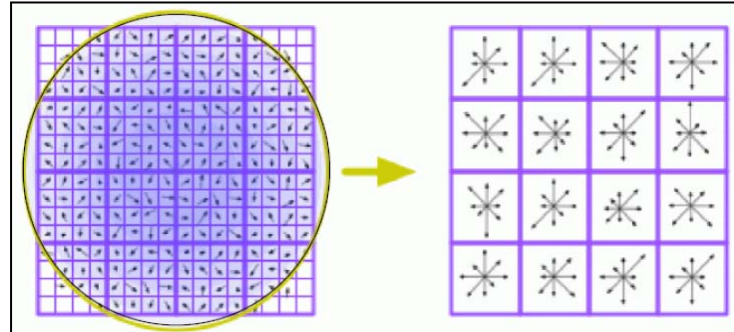


Figura 19 - Região e sub-regiões ao redor do ponto-chave

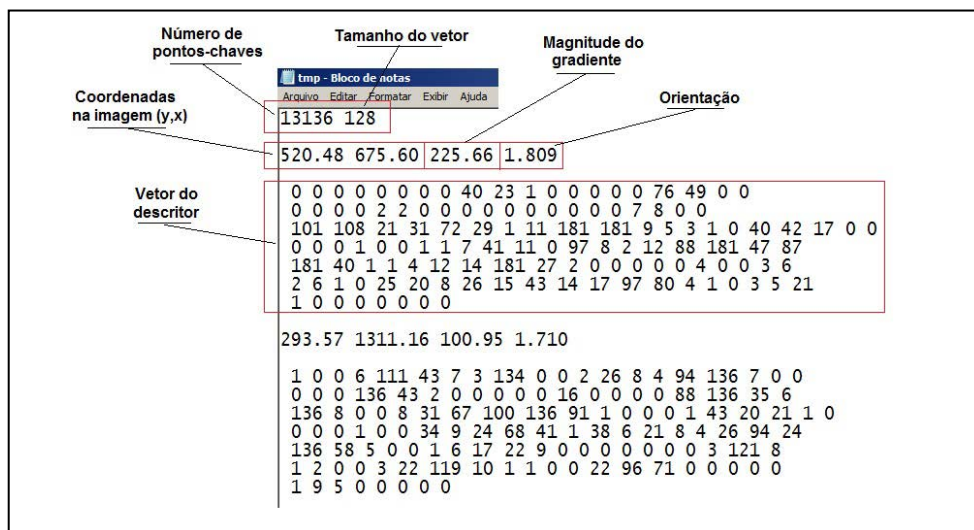


Figura 20 - Vetor de característica gerado pelo SIFT

O resultado final esperado de todo o processo do SIFT até aqui visto é a extração dos pontos-chave e suas coordenadas. Uma vez obtidos os pontos-chave que são invariantes a escala e orientação pode-se no passo seguinte estabelecer as correspondências entre as imagens laterais e avante.

4 CORRESPONDÊNCIA : ENCONTRANDO PONTOS HOMÓLOGOS ENTRE DUAS IMAGENS

Segundo Schenk (1999), a visão computacional tem inspiração na visão biológica dos seres vivos, e partir dos conhecimentos adquiridos na biologia o autor acredita que para um sistema de visão biológica identificar características em um ambiente é preciso de pelo menos três etapas: analisar, interpretar e entender os estímulos visuais causados pela interação da luz, objeto e sistema visual. Por isso, ele entendeu também que em um sistema artificial de reconhecimento de objetos como um robô ou um veículo autônomo essas etapas devem ser levadas em consideração.

Uma das técnicas mais tradicionais de reconhecimento de objeto é a procura de uma correspondência entre modelos de objetos e dados sensoriais obtidos por algum processamento em uma imagem digital. O fator mais crítico neste esforço é encontrar representações adequadas tanto para os objetos analisados quanto para os dados obtidos (SCHENK, 1999).

Schenk (1999) expõe em seu trabalho diversas técnicas de correspondência. Segundo ele muitos sistemas de reconhecimento descrevem objetos e dados como geométricos organizados em estruturas relacionais. Em uma estrutura geométrica a solução mais comum é parametrizar os objetos e os dados organizando-os em vetores. Assim, neste caso, correspondência é uma tentativa de encontrar o melhor ajuste entre duas representações paramétricas. Por isso, ele classifica a correspondência em três categorias principais: os métodos baseados em áreas, os métodos baseados em feições e os métodos baseados em descrições simbólicas das entidades que estão sendo analisadas.

O método de correspondência baseado em área analisa os níveis de cinza dos pixels distribuídos em uma subimagem. Essas subimagens são consideradas janelas que servem como referência ou como um espaço de busca. O espaço de busca também é conhecido como a janela de pesquisa.

Assim, com base numa janela de referência que contém características de interesse que foram extraídas independentemente da técnica, procura-se em cada janela de busca características iguais ou próximas a partir de uma comparação de similaridade. A utilização de subimagens e a redução do espaço de busca podem garantir agilidade no processamento computacional e, também, evitar ambiguidades em casos que haja características semelhantes em várias partes da imagem. (GALO, 2003).

A **Figura 21** mostra um exemplo com duas imagens. A imagem da esquerda indica a janela de referência com as características de interesse e a segunda imagem mostra o espaço de busca em que é realizada a análise a fim de estabelecer a correspondência.

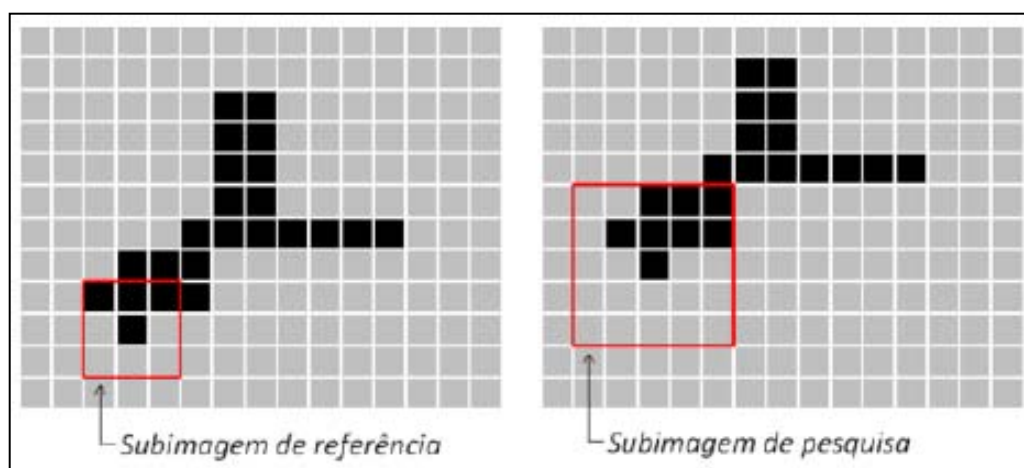


Figura 21 - Espaço de referência e espaço de busca²⁰

O processo de correspondência é realizado a partir de uma área (janela) da imagem de referência e comparando os valores dos níveis de cinza com os da janela de busca. Medindo-se assim uma similaridade a partir de uma função que quantifique as semelhanças entre esses níveis. Existem diversas funções ou métricas que podem ser utilizadas para obter a similaridade, tais como: função de erro, função erro quadrático, função correlação cruzada normalizada e função quociente medem o grau de correlação entre as características analisadas. Tais funções podem ser vistas em Galo (2003).

Os métodos baseados em feições são compostos por pelo menos três passos. Primeiro os pontos de interesse são detectados nas imagens, esses pontos de interesse são associados a bordas (SCHENK, 1999), vértices e/ou curvas. O segundo passo é calcular os descritores dessas feições que são compostos por valores de um conjunto de atributos levantados para cada ponto de interesse. Na terceira etapa estabelece a correspondência com base numa similaridade entre os descritores. A **Figura 22** mostra o resultado da extração de bordas pelo método da diferença gaussiana. As bordas destacadas representam as feições que podem conter os pontos de interesse.

²⁰ FONTE: Adaptado de (GALO, 2003)

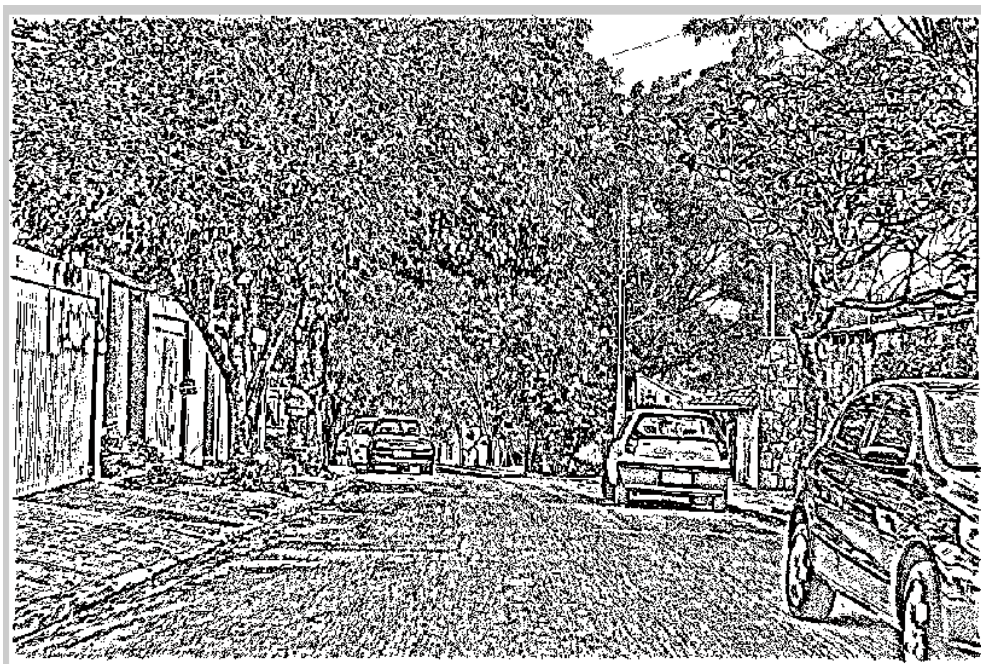


Figura 22 - Imagem da diferença gaussiana (bordas)

Gonzales e Woods (2008) mencionam que técnicas de reconhecimento com base em correspondência costumam representar as classes de padrões por vetores que são submetidos a um teste de proximidade em termos de uma métrica predefinida. A idéia mais simples é classificar esses vetores pela menor distância computando em seguida a distância entre eles, a fim de escolher os que estão mais próximos.

Outra abordagem de Gonzales e Woods (2008) é a correspondência baseada em correlação que é formulada diretamente nos termos da imagem (característica espacial), segundo eles, essa aproximação é considerada muito intuitiva.

Uma correlação indica a medida da relação entre duas variáveis aleatórias. Em fotogrametria utiliza-se da correspondência entre duas imagens (fotografias) para determinar o nível de correlação existente entre elas, isso é feito através da detecção em áreas ou por vetores de características análogos. Essas características podem estar relacionadas, por exemplo, a magnitude do gradiente circundante a um determinado ponto.

A correspondência entre imagens podem ter aplicações em diversas áreas. Em cartografia, por exemplo, o termo é amplamente utilizado. Em alguns casos a mesma refere-se à transferência de objetos na superfície curva da esfera terrestre para um plano da carta com o objetivo a partir de modelos matemáticos manterem a correspondência entre eles. Entretanto, neste trabalho a correspondência tem como meta estabelecer a partir de um grau correlação

entre os pontos extraídos pela técnica SIFT a construção de uma nuvem de pontos que aparecem concomitantemente nas imagens que compõem uma seqüência.

Por isso, a etapa de correspondência entre imagens digitais é considerada primordial e relevante para se obter resultados confiáveis em processos fotogramétricos, tal como a fototriangulação. Andrade (1998), destaca que a correspondência entre duas imagens é dada pela comparação entre elas fazendo percorrer um matriz de amostra da primeira imagem em uma janela (matriz de busca) na imagem correspondente a fim de calcular um valor de comparação para cada posição da matriz de amostra.

Outro método de estabelecer correlação entre pontos homólogos é através da comparação de vetores de características. Esses vetores contêm informações acerca da imagem e a correspondência entre eles pode ser estabelecida sob uma medida de similaridade. Essa medida pode ser obtida por métodos como a distância euclidiana, vizinho mais próximo ou a menor distância comparada com a segunda melhor distância considerando um limiar.

A idéia, segundo Lowe (2004), de estabelecer uma correspondência inicia pela extração dos pontos-chave de duas imagens a partir da técnica SIFT e em seguida estabelece a correspondência através de uma comparação entre os pontos extraídos em duas imagens a fim de obter as similaridades entre os descritores locais. A similaridade neste caso é obtida pelo cálculo da menor distância com a segunda melhor distância a partir dos vetores de características (descritores). A correspondência é estabelecida se eles são similares com base num limiar previamente estabelecido.

Schenk (1999) considera que a construção de uma solução robusta na busca de pontos correspondentes pode ser considerada como um elemento primordial na automação das tarefas fotogramétricas. Por isso, organizar os dados em vetores pode ajudar nessa construção. Já que os pontos de interesse extraídos pelo SIFT são representados por descritores e os descritores são vetores que podem ser comparados usando alguma técnica de correspondência. Na **Figura 23** é mostrada linhas que representam a ligação entre os pontos correspondidos entre duas imagens estereoscópicas.

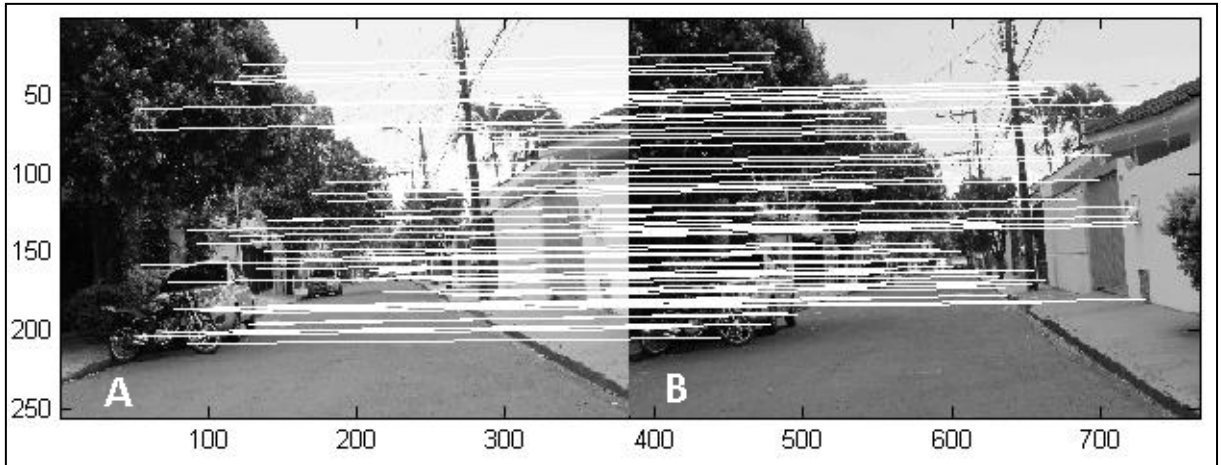


Figura 23 - Correspondência entre duas imagens. (A) imagem esquerda e (B) imagem da direita

5 FOTOTRIANGULAÇÃO

Segundo Kraus (1993), a fototriangulação por feixes de raios (*bundle block adjustment*) é um método que relaciona os pontos-objetos no terreno, o centro perspectivo das imagens e os pontos-imagem das fotos sob a condição de colinearidade, e soluciona simultaneamente a determinação das coordenadas cartesianas (X,Y,Z) dos pontos-objetos (terreno), a estimação dos parâmetros de orientação exterior da imagem (foto) e a distribuição dos erros aleatórios (resíduos) das fotocoordenadas (x,y).

Lugnani (1987) define a fototriangulação como um método fotogramétrico que determina coordenadas de pontos do espaço objeto através de relações geométricas de fotos convizinhas tomadas com um esparso controle de campo e um conjunto de parâmetros com valores aproximados. Todavia, Andrade (1998) define de forma resumida que fototriangulação é uma técnica fotogramétrica que cujo objetivo é determinar coordenadas de pontos de terreno com base num referencial.

Segundo Mikhail et al. (2001), a fototriangulação é a realização em um único procedimento da ressecção e intersecção espacial. A ressecção espacial é o processo pelo qual pode-se obter as coordenadas do centro de perspectiva e os ângulos de atitude (parâmetros de orientação exterior) do sensor no momento da aquisição da imagem. A intersecção espacial permite extrair as coordenadas tridimensionais de um ponto qualquer pertencente ao espaço objeto (mundo real, terreno, etc) através das coordenadas bidimensionais correspondentes no espaço imagem existentes em duas ou mais imagens. Portanto, a fototriangulação possibilita calcular os parâmetros de orientação exterior e as coordenadas dos pontos no terreno simultaneamente.

O método de feixes perspectivos permite que a fototriangulação seja executada em um único processo envolvendo todas as imagens que compõem o espaço imagem e todos os pontos fotogramétricos contidos nestas imagens. O modelo matemático utilizado para realizar esse processo é conhecido como colinearidade que faz a relação entre os pontos existentes no espaço imagem (P), centro perspectivo (C) do sensor e o ponto no espaço objeto (p). Ver Figura 24. (LUGNANI, 1987).

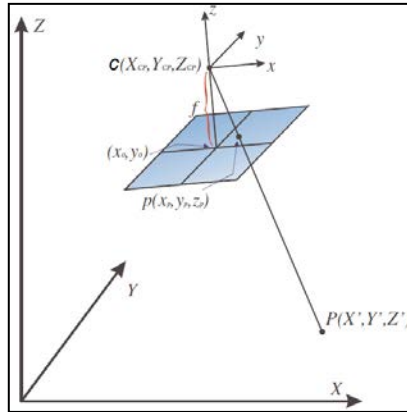


Figura 24 - Geometria da condição de colinearidade²¹

Um caso particular de fototriangulação é o terrestre, que comumente é utilizada em sistema de mapeamento móvel terrestre. Essa técnica se diferencia da abordagem área principalmente pela disposição dos eixos do espaço objeto e da imagem. A Figura 25 mostra como é essa disposição (WOLF, 1983).

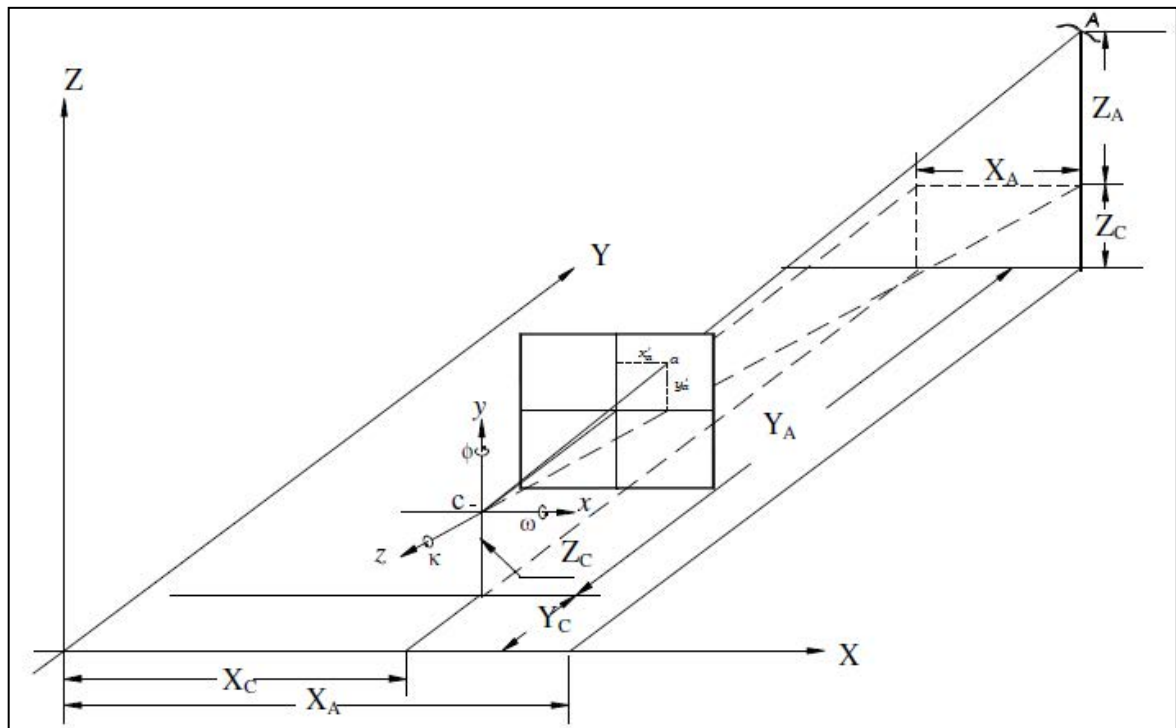


Figura 25 – Geometria da condição de colinearidade terrestre.²²

Para utilizar a equação de colinearidade num levantamento terrestre ou aéreo com o intuito de realizar uma fototriangulação é necessário utilizar fotocoordenadas dos pontos em

²¹ Fonte: adaptado de Lugnani (1987).

²² Fonte: Adaptado de Wolf (1983).

feições de interesse em pelo menos duas imagens. Por isso, é preciso realizar uma transformação geométrica linear entre o sistema de coordenadas, que normalmente é dada em pixels e identificada por (x_p, y_p) , para um sistema de fotocoordenadas (x_f, y_f) de uma imagem digita, conforme o esquema de nomenclatura adotada e demonstrada na Figura 26.

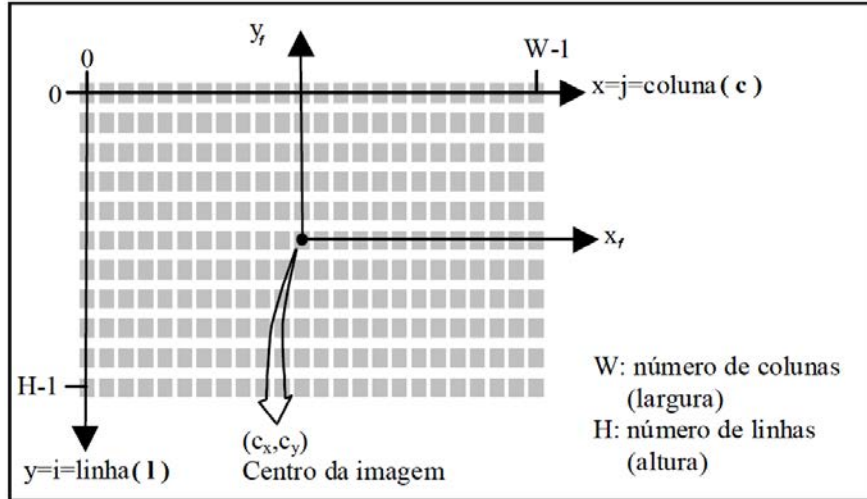


Figura 26 - Sistema de coordenadas e da imagem²³

É possível verificar graficamente, com base na Figura 26, que o eixo x_f do sistema de coordenadas de uma imagem digital é paralelo ao eixo x_p do sistema de fotocoordenadas, já o eixo y_f está refletido em relação ao eixo y_p . Considerando que o sistema de fotocoordenadas de uma imagem digital é dado em milímetros, pode-se determinar transformação a partir da seguinte relação matricial (PITERI e RODRIGUES, 2011):

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0 & S_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l - \frac{W-1}{2} \\ c - \frac{H-1}{2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Onde S_x e S_y são o tamanho do pixel na horizontal e na vertical, respectivamente. Essa informação é fornecida pelo fabricante do sensor eletrônico de imagem, seja CCD ou CMO. Já as coordenadas $\frac{W-1}{2}$ e $\frac{H-1}{2}$ referem-se ao centro da imagem em coordenadas pixel, onde W é a dimensão em pixels da imagem na horizontal e H na vertical.

²³ Fonte: adaptado de Barbosa (2006).

5.1 Equações de colinearidade

Segundo Mikhail (2001), a característica fundamental de uma fotografia é que o centro perspectivo (C), o ponto imagem (a) e o Ponto objeto correspondente (A) são ligados por uma única linha no espaço, como demonstrado na Figura 25.

Essa linha pode ser expressa como um vetor componente das coordenadas no espaço imagem ou como o vetor componente das coordenadas no espaço objeto. As coordenadas do espaço imagem e do espaço objeto são compostas por três parâmetros de posição e três parâmetros de orientação. Os parâmetros de orientação são formados por três ângulos (atitude) de rotação dos eixos (ω , φ , κ), juntamente com as coordenadas do centro de perspectiva (X_0 , Y_0 , Z_0) (Mikhail, 2001), conforme podem ser vistas na Figura 24 e Figura 25.

A matriz de rotação é dada por:

$$R = R_{\omega} R_{\varphi} R_{\kappa} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Onde:

$$R_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}$$

$$R_{\varphi} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$R_{\kappa} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A construção da matriz de rotação $R_{\omega} R_{\varphi} R_{\kappa}$ final é dado por:

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) * \cos(\kappa) & -\cos \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (13)$$

Segundo Wolf (1983) e Mikhail (2001), a função de colinearidade é dada por:

$$\begin{aligned}x &= x_0 - f \frac{N_x}{D} \\y &= y_0 - f \frac{N_y}{D}\end{aligned}\tag{14}$$

Onde:

(x, y) são as fotocoordenadas em milímetros.

$$N_x = r_{11}(X - X_c) + r_{12}(Z - Z_c) + r_{13}(Y - Y_c)$$

$$N_y = r_{21}(X - X_c) + r_{22}(Z - Z_c) + r_{23}(Y - Y_c)$$

$$D = r_{31}(X - X_c) + r_{32}(Z - Z_c) + r_{33}(Y - Y_c)$$

(X, Y, Z) são as coordenadas dos pontos no espaço objeto em metros.

(X_c, Y_c, Z_c) são as coordenadas do centro perspectivo em metros.

Para fazer uso da equação de colinearidade com a intenção de estimar a orientação exterior é preciso que valores para alguns parâmetros, tais como as coordenadas tridimensionais dos pontos no terreno e as observações já estejam estimadas. Partindo do pressuposto que o objeto de estudo é a imagem e os dados iniciais (observações) são oriundas dela é preciso calcular primeiro os valores das coordenadas de terreno de cada ponto obtido pelo processamento aplicado na imagem.

Nas próximas seções serão expostos três métodos de intersecção fotogramétrica que servem para calcular as coordenadas tridimensionais do terreno referente a cada ponto extraído na imagem.

5.2 Intersecção fotogramétrica utilizando paralaxe

A Figura 27 ilustra um par de fotografias horizontais adquiridas por duas câmaras cujos eixos ópticos encontram-se em paralelos e pertencem às estações E' e E'' . Essas estações estão na mesma altitude. O sistema de referência aqui adotado é arbitrário e local com sua origem na estação E' . O sistema local tem as seguintes características: o eixo (Y) é horizontal e coincide com o eixo óptico da fotografia da esquerda. O eixo X também é horizontal e coincide com a linha de base (B) e (Z) é perpendicular a X e Y apontando para cima.

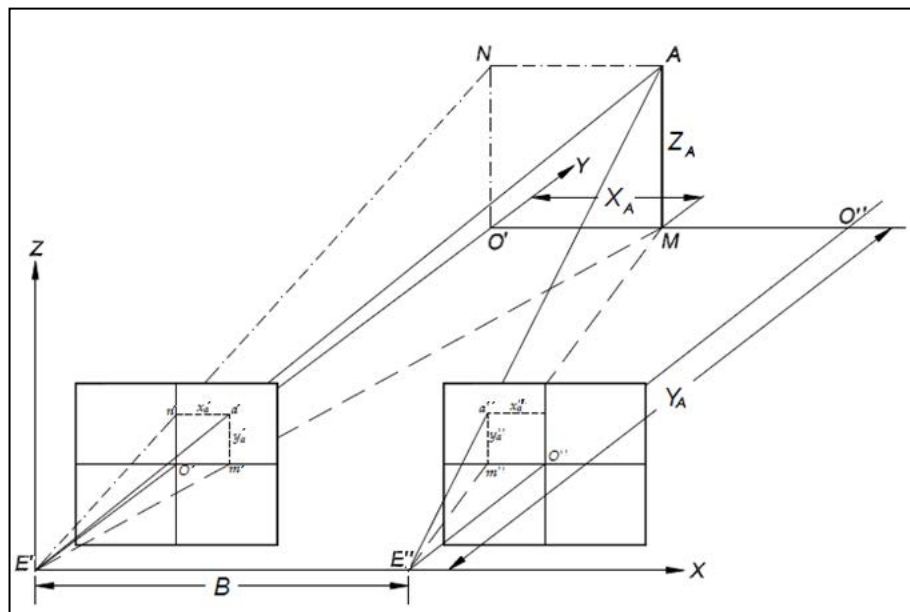


Figura 27 - Par de imagens terrestres horizontais, tomadas com duas câmaras²⁴.

O desenvolvimento deste método é baseado em Oliveira (2003) onde é mencionado que o ponto A é visto tanto na imagem da direita quanto na esquerda, isto é, ele pertence à área sobreposta do par estéreo. As coordenadas medidas com relação ao sistema de eixos fiduciais são identificadas como: x'_a e y'_a na fotografia esquerda e x''_a e y''_a na fotografia da direita.

Usando a semelhança de triângulo é possível desenvolver as equações de paralaxe para calcular as coordenadas tridimensionais no terreno (X_A , Y_A , Z_A) que se encontram no espaço objeto. Assim, usando a semelhança de triângulos entre $E' o' m'$ e $E' O' M$, tem-se:

$$\frac{X_A}{Y_A} = \frac{x'_a}{f} \quad \rightarrow \quad X_A = \frac{x'_a}{f} Y_A \quad (15)$$

²⁴ Adaptado de Wolf (1983)

Executando os mesmos passos para $E'' o'' m''$ e $E'' O'' M$, temos que:

$$\frac{B - X_A}{Y_A} = \frac{-x''_a}{f} \quad \rightarrow \quad X_A = B + \frac{x''_a}{f} Y_A \quad (16)$$

Igualando os resultados das equações (15) e (16) temos o seguinte desenvolvimento:

$$\begin{aligned} \frac{x'_a}{f} Y_A = B + \frac{x''_a}{f} Y_A &\quad \rightarrow \quad \frac{x'_a}{f} Y_A - \frac{x''_a}{f} Y_A = B \quad \rightarrow \quad Y_A \left(\frac{x'_a}{f} - \frac{x''_a}{f} \right) = B \quad \rightarrow \\ &\quad (17) \\ Y_A \left(\frac{x'_a - x''_a}{f} \right) = B &\quad \rightarrow \quad Y_A = \frac{Bf}{x'_a - x''_a} \end{aligned}$$

Substituindo $x'_a - x''_a$ por p_a (paralaxe) podemos reescrever o resultado da equação (17) da seguinte forma:

$$Y_A = \frac{Bf}{p_a} \quad (18)$$

Substituindo Y_A da equação (18) na equação (16) temos o seguinte desenvolvimento:

$$X_A = B + \frac{x''_a}{f} \left(\frac{Bf}{x'_a - x''_a} \right) \quad \rightarrow \quad X_A \left(\frac{x'_a - x''_a}{x'_a} \right) = B \quad \rightarrow \quad X_A = \frac{Bx'_a}{x'_a - x''_a} \quad (19)$$

Substituindo $x'_a - x''_a$ por p_a (paralaxe) podemos reescrever o resultado da equação (17) da seguinte forma:

$$X_A = \frac{Bx'_a}{p_a} \quad (20)$$

Procedendo da mesma forma por semelhança dos triângulos formados por $E'' o'' m''$ e $E'' O'' M$, tem-se:

$$\frac{Z_A}{Y_A} = \frac{y'_a}{f} \quad \rightarrow \quad Z_A = \frac{y'_a}{f} Y_A \quad (21)$$

Substituindo a equação (18) em (21) tem-se:

$$Z_A = \frac{y'_a}{f} \left(\frac{Bf}{p_a} \right) \rightarrow Z_A = \frac{By'_a}{p_a} \quad (22)$$

Levando em consideração que as fotografias são horizontais, as câmaras da esquerda e da direita têm altitudes iguais e os eixos ópticos de ambas são perpendiculares à linha de base, as equações (18), (20) e (21) podem ser usadas para calcularem as coordenadas tridimensionais de um ponto no espaço objeto com base num referencial local.

5.3 Intersecção fotogramétrica a partir da relação de escala

Silva (2011) determina que a intersecção fotogramétrica a partir da escala é usada para calcular posições espaciais de pontos em áreas sobrepostas de um par estéreo de fotografias tiradas por duas câmaras com eixos ópticos paralelos e cujos parâmetros de orientação interior e exterior são conhecidos.

Foram adotadas as seguintes convenções para o desenvolvimento deste modelo:

- $X'_c, Y'_c, Z'_c, \omega', \varphi', \kappa'$ são os parâmetros de orientação exterior da fotografia da câmara da esquerda.

- $X''_c, Y''_c, Z''_c, \omega'', \varphi'', \kappa''$ são os parâmetros de orientação exterior da fotografia da câmara da direita.

- X_A, Y_A e Z_A são as coordenadas tridimensionais do ponto A no espaço objeto, isto é, no terreno. Essas coordenadas podem ser determinadas pelas equações de colinearidade da imagem da esquerda (equação (23)) e da direita (24).

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \lambda' R' \begin{bmatrix} (x' - x'_0) \\ (y' - y'_0) \\ -f'_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X'_c \\ Y'_c \\ Z'_c \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \lambda'' R'' \begin{bmatrix} (x'' - x''_0) \\ (y'' - y''_0) \\ -f''_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X''_c \\ Y''_c \\ Z''_c \end{bmatrix} \quad (24)$$

Onde:

- λ é o fator de escala correspondente à imagem do ponto A.
- x e y são as fotocoordenadas do ponto-imagem na fotografia.
- x_0 e y_0 são as coordenadas do ponto principal da imagem.
- R é a matriz de rotação, equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

- ' é referente a imagem da esquerda.
- '' é referente a imagem da direita.

Desenvolvendo as equações (23) e (24) multiplicando as matrizes de rotação com os vetores das observações da imagem da esquerda e da direita, tem-se:

$$\begin{aligned}
 u' &= r'_{11}(x' - x'_0) + r'_{21}(y' - y'_0) - r'_{31} f'_c \\
 v' &= r'_{12}(x' - x'_0) + r'_{22}(y' - y'_0) - r'_{32} f'_c \\
 w' &= r'_{13}(x' - x'_0) + r'_{23}(y' - y'_0) - r'_{33} f'_c
 \end{aligned} \tag{25}$$

$$\begin{aligned}
 u'' &= r''_{11}(x'' - x''_0) + r''_{21}(y'' - y''_0) - r''_{31} f''_c \\
 v'' &= r''_{12}(x'' - x''_0) + r''_{22}(y'' - y''_0) - r''_{32} f''_c \\
 w'' &= r''_{13}(x'' - x''_0) + r''_{23}(y'' - y''_0) - r''_{33} f''_c
 \end{aligned} \tag{26}$$

Onde: r_{ij} são elementos das matrizes de rotação das fotografias, definido na equação (11).

No caso em questão a variável de interesse é o fator de escala da fotografia da esquerda e da direita (λ). Substituindo as equações (25) e (26) nas equações (23) e (24), respectivamente, e em seguida igualando-as, temos que:

$$\begin{aligned}
 \lambda' u' + X'_c &= \lambda'' u'' + X''_c \\
 \lambda' v' + Y'_c &= \lambda'' v'' + Y''_c \\
 \lambda' w' + Z'_c &= \lambda'' w'' + Z''_c
 \end{aligned} \tag{27}$$

Reescrevendo a equação (27) em função das componentes de base, isto é, das coordenadas dos centros perspectivos das câmaras da direita e da esquerda, temos o seguinte resultado:

$$\begin{aligned}
 B_X &= X''_c - X'_c = \lambda' u' - \lambda'' u'' \\
 B_Y &= Y''_c - Y'_c = \lambda' v' - \lambda'' v'' \\
 B_Z &= Z''_c - Z'_c = \lambda' w' - \lambda'' w''
 \end{aligned} \tag{28}$$

A partir deste ponto é possível utilizar o método paramétrico de ajustamento por MMQ para calcular as coordenadas tridimensionais no terreno baseadas no fator de escala usando as equações deduzidas em (28). Essas equações formam um sistema linear de três equações e duas incógnitas (os fatores de escala da fotografia da esquerda e da direita) e podem ser escrito na forma matricial e cujo vetor solução é dado por:

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (29)$$

A matriz A composta pelas derivadas parciais em relação aos fatores de escala é dada por:

$$A = \begin{bmatrix} u' & -u'' \\ v' & -v'' \\ w' & -w'' \end{bmatrix} \quad (30)$$

O vetor das observações L é dado por:

$$L = \begin{bmatrix} B_X \\ B_Y \\ B_Z \end{bmatrix} \quad (31)$$

Assumindo que a matriz peso P é igual à identidade (I), tem-se o seguinte resultado da equação (37).

$$X = \begin{bmatrix} \lambda' \\ \lambda'' \end{bmatrix} \quad (32)$$

Uma vez obtido os valores dos fatores de escala é possível calcular as coordenadas tridimensionais no terreno da foto da esquerda da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \lambda' \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X'_c \\ Y'_c \\ Z'_c \end{bmatrix} \quad (33)$$

E para foto da direita:

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \lambda'' \begin{bmatrix} u'' \\ v'' \\ w'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_c'' \\ Y_c'' \\ Z_c'' \end{bmatrix} \quad (34)$$

As coordenadas estimadas do ponto no terreno podem ser calculadas pela média dos resultados encontrados nas equações (33) e (34).

5.4 Intersecção fotogramétrica Linear pelo método de agrupamento de parâmetros

Oliveira et al (2003), Silva (2001) apresentam um método de intersecção fotogramétrica linear (MIFL) para estimar valores para as coordenadas dos pontos objeto a partir de manipulações algébricas no modelo de colinearidade. Esse método, segundo os autores, pode ser interpretado como uma passagem pela Transformação Linear Direta (em tradução de direct linear transformation, DLT, na sigla em inglês como conhecida internacionalmente), cujas equações, por sua vez, também têm coeficientes incógnitos que são obtidos por meio de um agrupamento de parâmetros das equações de colinearidade. O MIFL, contudo, não usa explicitamente o conceito TLD, ou DLT, porque este foi originalmente desenvolvido em 1971, na Universidade de Illinois, por ABDEL-AZIZ e KARARA (1971), para tratar os pontos de apoio como entidades fixas (absolutas).

Neste trabalho adotou-se esse método por ele estimar valores aproximados para o terno de coordenadas (XYZ) de um ponto objeto para ser usado como valor inicial na fototriangulação, que por sua vez requer iterações. A solução proposta aqui continua a manipular algebricamente as variáveis das equações de colinearidade (parâmetros e observações), chegando-se a um modelo paramétrico linear de ajustamento das “pseudo-observações” em função dos parâmetros (o terno de coordenadas de um ponto objeto).

Essa manipulação lineariza o modelo matemático e evita a necessidade de um método linearizado de ajustamento rigoroso, eliminando-se, portanto, o recurso às iterações.

Assim, reescrevendo a equação (14) (colinearidade) para o caso geral sem levar em consideração o lado, tem-se:

$$x - x_0 = -f \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z - (r_{11}X_c + r_{12}Y_c + r_{13}Z_c)}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z - (r_{31}X_c + r_{32}Y_c + r_{33}Z_c)} \quad (35)$$

$$y - y_0 = -f \frac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z - (r_{21}X_c + r_{22}Y_c + r_{23}Z_c)}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z - (r_{31}X_c + r_{32}Y_c + r_{33}Z_c)}$$

Reorganizando parte da equação (35) com base na seguinte agrupamento:

$$\begin{aligned} I &= (r_{11}X_c + r_{12}Y_c + r_{13}Z_c) \\ J &= (r_{21}X_c + r_{22}Y_c + r_{23}Z_c) \\ K &= (r_{31}X_c + r_{32}Y_c + r_{33}Z_c) \end{aligned} \quad (36)$$

tem-se:

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -f \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z - I}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z - K} \\ y - y_0 &= -f \frac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z - J}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z - K} \end{aligned} \quad (37)$$

Multiplicando os membros da equação (37) por seus denominadores e em seguida agrupando os termos semelhantes, obtemos o seguinte resultado:

$$\begin{aligned} (x - x_0)(r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z - K) &= -f(r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z - I) \\ (y - y_0)(r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z - K) &= -f(r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z - J) \end{aligned} \quad (38)$$

que pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} (x - x_0)(r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z) + f(r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z) &= (x - x_0)K + fI \\ (y - y_0)(r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z) + f(r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z) &= (y - y_0)K + fJ \end{aligned} \quad (39)$$

Daí, agrupando os termos semelhantes, tem-se o seguinte resultado:

$$\begin{aligned} [(x - x_0)r_{31} + f r_{11}]X + [(x - x_0)r_{32} + f r_{12}]Y + [(x - x_0)r_{33} + f r_{13}]Z &= (x - x_0)K + fI \\ [(y - y_0)r_{31} + f r_{21}]X + [(y - y_0)r_{32} + f r_{22}]Y + [(y - y_0)r_{33} + f r_{23}]Z &= (y - y_0)K + fJ \end{aligned} \quad (40)$$

Levando em consideração o arranjo formado acima, X, Y e Z (coordenadas no terreno) são considerados incógnitas. Já X_c, Y_c e Z_c , tanto para câmara da esquerda quanto para a

direita, são constantes. $(x - x_0)K + f I$ e $(y - y_0)K + f J$ são pseudo-observações, pois misturam observações com medidas angulares. Para resolver o sistema linear de quatro equações e três incógnitas para cada ponto-objeto utiliza-se o método paramétrico sem iterações. Para isso, as equações acima foram organizadas na forma matricial com uma matriz de peso igual a sua identidade, $P = I$.

As formulações acima não levaram em conta a lateralidade das câmaras. Porém, para construir as matrizes é preciso identificar quais parâmetros são da câmara da direita e da esquerda, por isso, os parâmetros da câmara da esquerda são associados com (') e para câmara da direita (``) conforme o esquema apresentado na Figura 27.

Assim, a construção da matriz A é dada da seguinte forma:

$$A = \begin{bmatrix} (x - x_0)' r_{31}' + f' r_{11}' & (x - x_0)' r_{32}' + f' r_{12}' & (x - x_0)' r_{33}' + f' r_{13}' \\ (y - y_0)' r_{31}' + f' r_{21}' & (y - y_0)' r_{32}' + f' r_{22}' & (y - y_0)' r_{33}' + f' r_{23}' \\ (x - x_0)'' r_{31}'' + f'' r_{11}'' & (x - x_0)'' r_{32}'' + f'' r_{12}'' & (x - x_0)'' r_{33}'' + f'' r_{13}'' \\ (y - y_0)'' r_{31}'' + f'' r_{21}'' & (y - y_0)'' r_{32}'' + f'' r_{22}'' & (y - y_0)'' r_{33}'' + f'' r_{23}'' \end{bmatrix} \quad (41)$$

Onde o vetor das observações é:

$$L_b = \begin{bmatrix} (x - x_0)' K' + f' I' \\ (y - y_0)' K' + f' J' \\ (x - x_0)'' K'' + f'' I'' \\ (y - y_0)'' K'' + f'' J'' \end{bmatrix} \quad (42)$$

Assim, aplicando o método paramétrico sem iteração para resolver o sistema obtemos o vetor dos parâmetros ajustados com base no modelo abaixo:

$$Xs = (A^T A)^{-1} (A^T L_b) \quad (43)$$

Onde, o vetor solução (Xs) é composto pelas coordenadas do terreno: $Xs = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$

Neste trabalho será utilizado o método de agrupamento de parâmetros a partir do modelo de colinearidade para computar as coordenadas no terreno correspondente aos pontos

(fotocoordenadas) extraídos do primeiro par de imagens (câmara da esquerda e da direita) pelo algoritmo SIFT, a fim de obter valores aproximados para as coordenadas tridimensionais no terreno.

6 METODOLOGIA

A sequência da metodologia proposta neste trabalho pode ser visualizada no diagrama da **Figura 28**. Algumas etapas não estão descritas como passos metodológicos por antecederem a aquisição das imagens, como a montagem, calibração do conjunto estéreo-vídeo-câmaras e o levantamento fotogramétrico do trecho a ser estudado. Por isso, para realização dos experimentos partiu-se do pressuposto que o sistema já estava em operação.

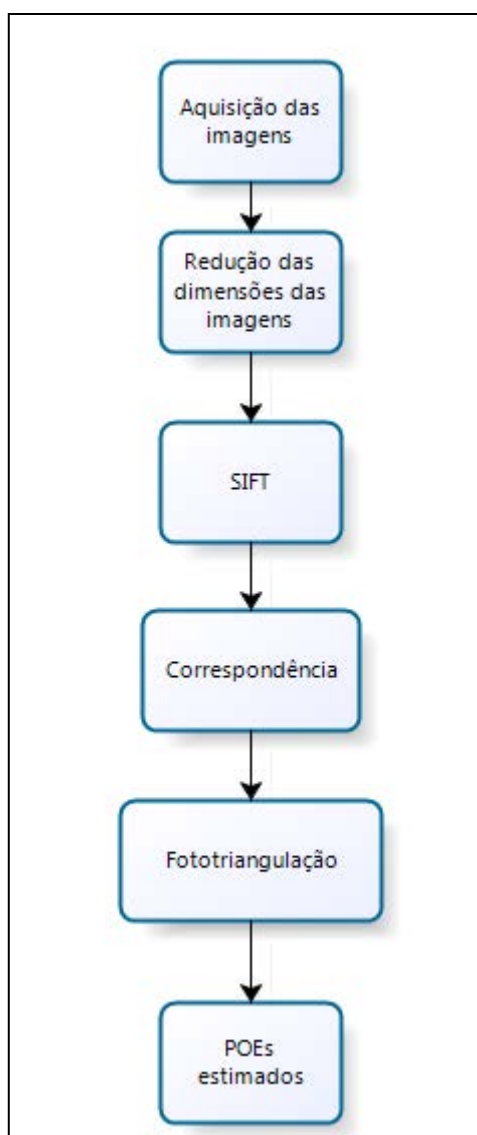


Figura 28 – Diagrama de blocos simplificado da metodologia

Os arquivos de imagens contínuas (vídeo) gerados pelo levantamento fotogramétrico de um determinado trecho urbano foram armazenados em disco rígido e identificados conforme a

lateralidade, isto é, o símbolo “E” para o arquivo com imagens da câmara da esquerda e “D” para o arquivo contendo as imagens da câmara da direita.

Após o armazenamento e a identificação de cada arquivo foi necessário realizar um processamento a fim de transformar cada quadro (frame) do vídeo em uma “imagem fotográfica” (*still image ou still frame*), denominada aqui de “foto” para simplificar.

Entretanto, para os experimentos realizados neste trabalho o sistema de câmaras estereoscópicas para tomadas das fotografias não foi acoplado em um veículo móvel, e sim portado manualmente conforme mostrado na **Figura 29**.



Figura 29 - Foto do levantamento fotogramétrico

Faixas foram marcadas no chão com a distância entre elas de 1 metro. Essas marcas serviram como informações sobre a distância entre as tomadas dos pares de imagens ao longo do caminhar.

Cada tomada de foto foi capturada por um sistema de estéro-câmara devidamente calibrado. As fotografias (imagens) importadas para pastas foram identificadas conforme sua lateralidade. Isto é, imagens da câmara da esquerda foram gravadas em pastas identificadas com a palavra “ESQUERDA”, no caso das imagens da câmara da direita com a palavra “DIREITA”. A convenção da lateralidade das câmaras leva em consideração o sentido do levantamento, conforme descrito graficamente na **Figura 30**.

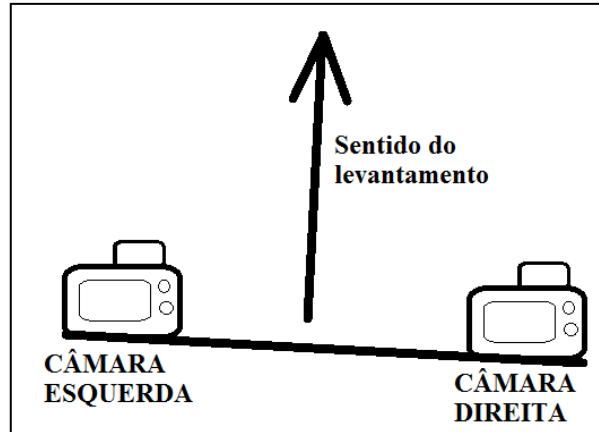


Figura 30 - Esquema da lateralidade das câmaras

Além da identificação das pastas foi necessário nominar as imagens de forma a respeitar a ordem que foi obtida. Conforme ilustrado na Figura 31 as imagens da esquerda receberam um identificador “E” seguido de um número inteiro seqüencial e crescente, a começar de 0001. Por exemplo: E001, é a foto 1 da câmara da esquerda; E002, é a foto dois da câmara da esquerda; E004, é a foto quatro da câmara da esquerda e assim por diante.

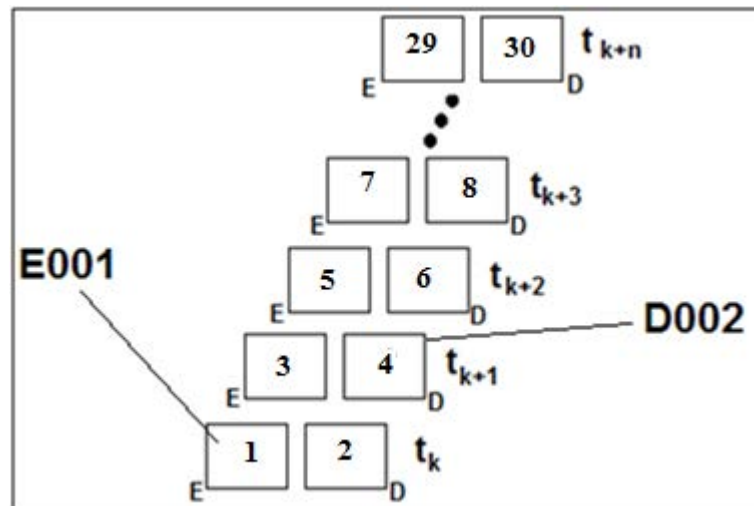


Figura 31 - Sequência de imagens estereoscópicas sincronizadas e montadas para capturar dois pares de imagens simultaneamente a cada intervalo de tempo t_k

A ferramenta de desenvolvimento Matlab (versão 7.0) foi utilizada para desenvolver/implementar a solução computacional. Essa solução é composta genericamente pelos programas do SIFT, correspondência, intersecção e fototriangulação, além, das bibliotecas já existentes para construção e visualização das imagens e dos gráficos.

Portanto, o início do processo deu-se pela importação das imagens adquiridas pelo levantamento fotogramétrico até o seu final.

As fotos utilizadas no início do processo foram os pares (foto da esquerda e da direita) no tempo T_k e T_{k+1} , porém, dependendo do interesse, podem-se utilizar imagens nos tempos T_k e T_{k+5} , ou mesmo de outros intervalos se o motivo for obter pares de imagens com distância entre as tomadas maiores do que 1 metro.

Depois da importação das fotografias aplicou-se a redução das imagens, novas amostras. Essa etapa de redução das dimensões teve como meta reduzir a quantidade de pixel na horizontal e na vertical. A intenção principal desta etapa é a diminuição no tempo de processamento do SIFT e a correspondência dos pontos-chave extraídos nas imagens. Houve uma preocupação na escolha de qual percentual de redução deveria ser sem que houvesse perda significativa da quantidade, qualidade e da distribuição dos pontos-chave obtidos pela técnica.

Diversos métodos são utilizados para reduzir uma imagem, os mais comuns são: interpolação pelo vizinho mais próximo que é um método determinista no qual o novo valor calculado é sempre igual à sua amostra mais próxima não considerando qualquer outra; a interpolação bilinear é uma extensão da interpolação linear para funções de duas variáveis diferenciando do vizinho mais próximo por usar somente 4 valores dos pixels mais próximos que estão localizados diagonalmente ao pixel que está sendo avaliado; e a interpolação bicúbica que é o processo mais utilizado para redimensionamento de imagens digitais já que o nível de cinza a ser atribuído ao pixel na imagem destino é determinado a partir operações sobre uma matriz de 16 pixels da vizinhança, resultando em uma imagem com maior qualidade em relação aos outros dois métodos mencionados. Por isso, este último método foi o escolhido para a etapa de redução das dimensões das imagens.

Na **Figura 32** é demonstrado graficamente o esquema da terceira etapa da metodologia que envolve a aplicação da técnica SIFT em uma sequência de imagem de cada vez. O termo sequência utilizado neste trabalho é definido a partir do número de 4 imagens utilizadas para o processamento de cada vez.

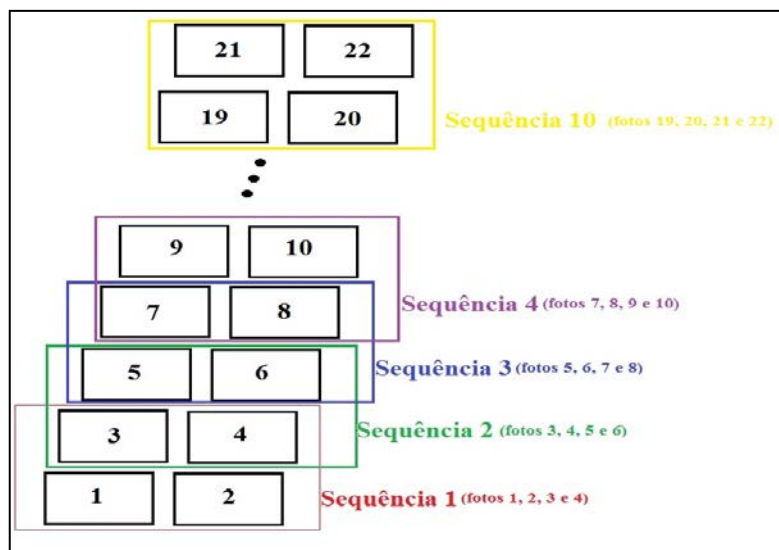


Figura 32 - Esquema das seqüências de imagens

Ao aplicar o algoritmo SIFT nas fotos da primeira seqüência (imagens 1, 2, 3 e 4) obtiveram-se os pontos-chave de cada imagem e seus respectivos descritores. O processo de extração de característica foi repetido para todas as imagens que fizeram parte do levantamento.

Uma vez obtido os pontos-chave e seus descritores foi na quarta etapa da metodologia que se realizou a correspondência entre as imagens. O procedimento seguiu os seguintes passos:

- Primeiro procurou-se os pontos homólogos entre as imagens laterais 1 e 2, 3 e 4.
- Segundo procurou-se os pontos homólogos entre as imagens avante 1 e 3, 2 e 4.
- No terceiro passo, já com todas as correspondências estabelecidas, apenas os pontos-chave (coordenadas) que apareceram nas quatro imagens ao mesmo tempo foram gravados, os restantes foram descartados.

O método utilizado para estabelecer a correspondência usado neste trabalho foi pela menor distância com a segunda melhor distância entre os pontos analisados (técnica já implementada no SFIT). A Figura 33 e a Figura 34 mostram linhas que representam graficamente as correspondências estabelecidas entre os pontos nas imagens laterais (tempo 0 e tempo 1), já as **Figura 35** e **Figura 36** mostram as linhas das correspondências entre as imagens avante (esquerda e direita). A Figura 37 mostra apenas os pontos-chave que aparecem nas quatro imagens, isto é, pontos que tem correspondência simultânea nas quatro imagens. Esses resultados são apenas demonstrativos, pois, os números de pontos-chave com correspondência nas quatro imagens pertencentes à seqüência que está sendo analisada no

momento dependem diretamente da dimensão da imagem (pixels) e o limiar previamente estabelecido do SIFT.

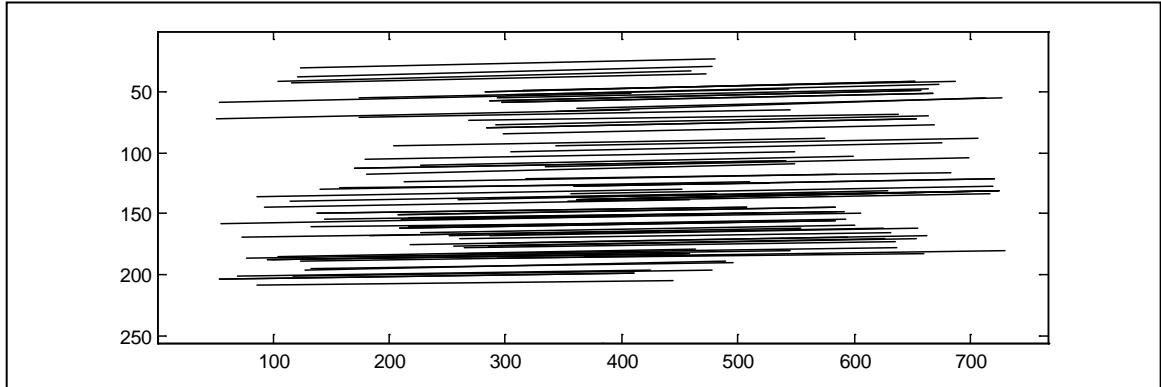


Figura 33 - Correspondência lateral (tempo 1)

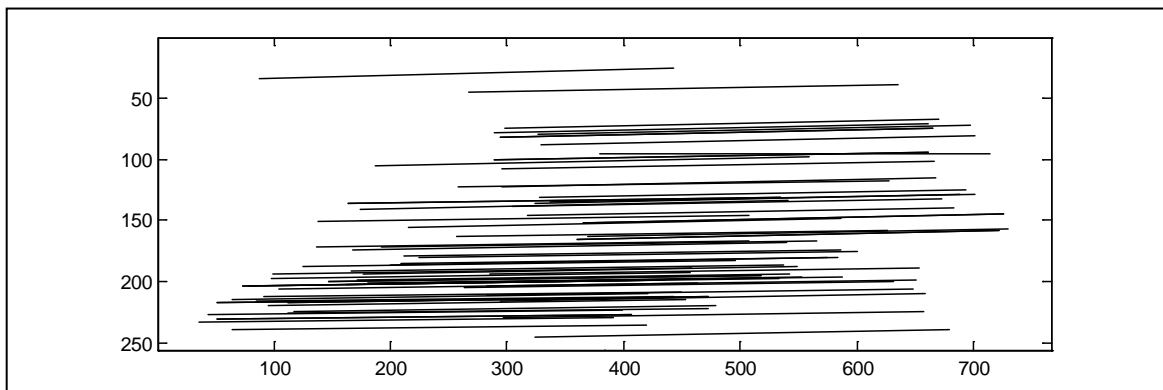


Figura 34 - Correspondência lateral (tempo 0)

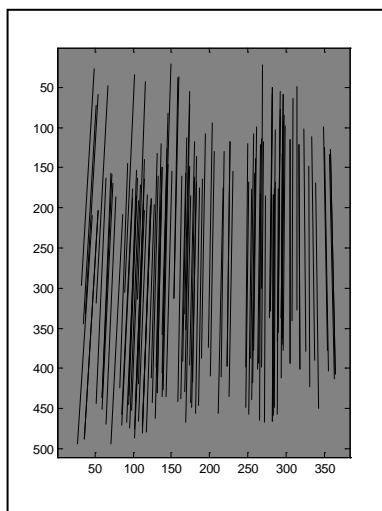


Figura 35 - Correspondência avante (esquerda)

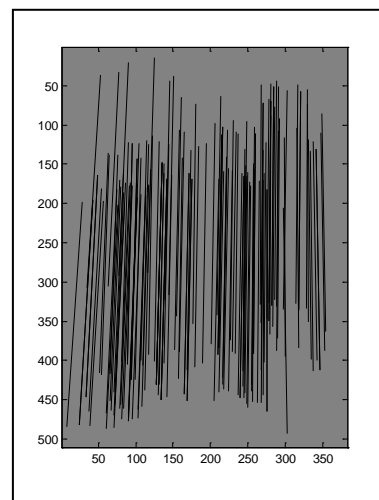


Figura 36 - Correspondência avante (direita)

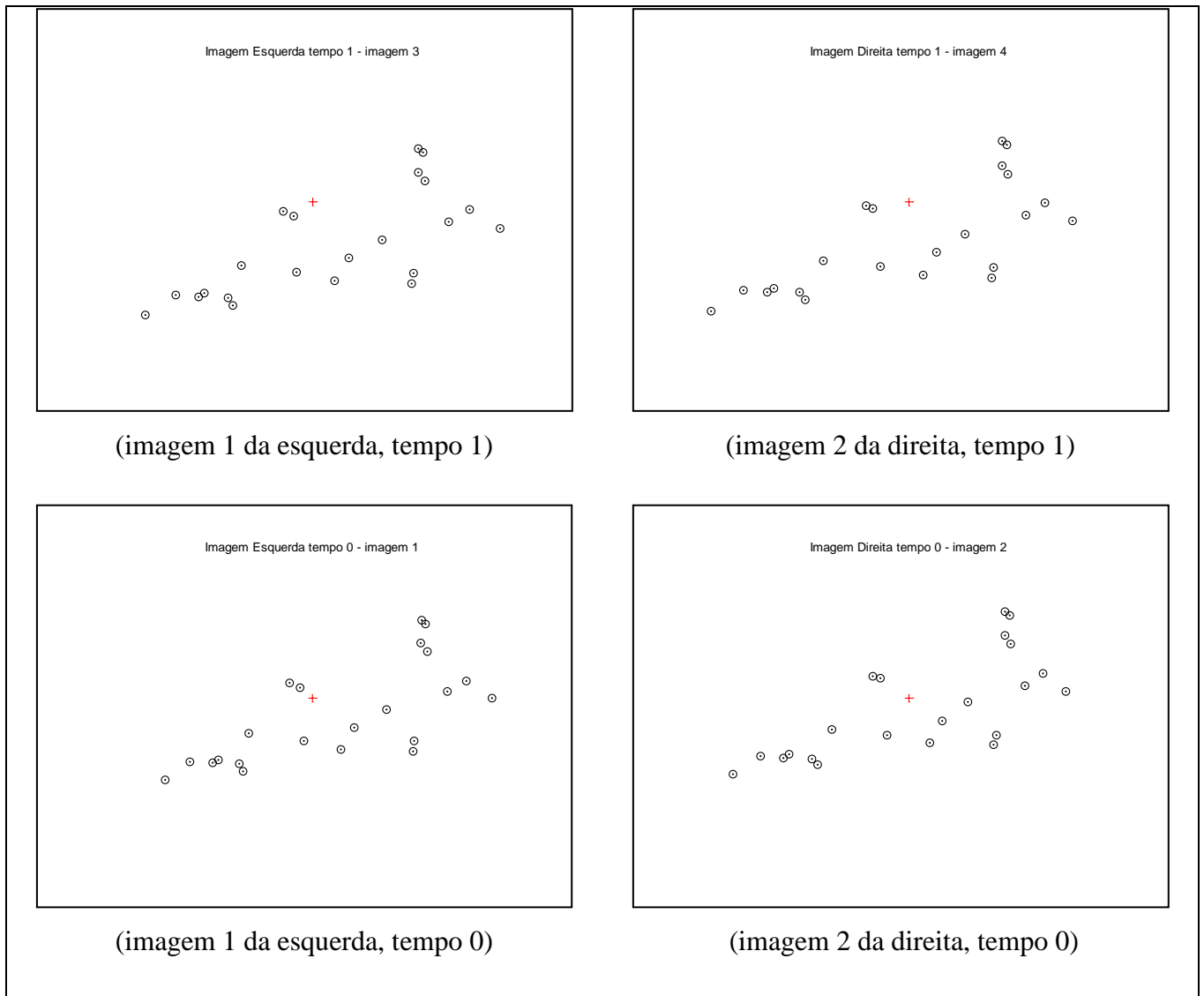


Figura 37 - Pontos homólogos nas quatro imagens

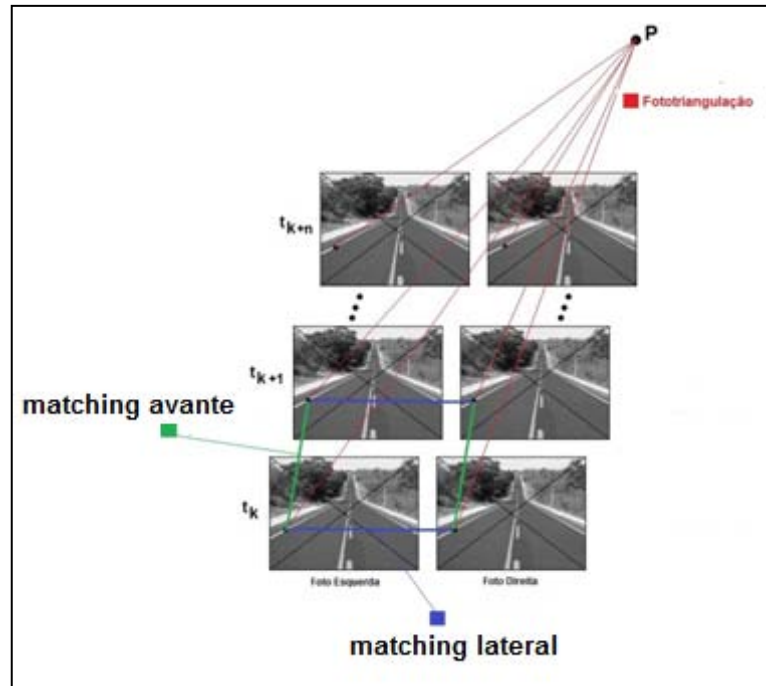


Figura 38 - Esquema de correspondências.

O próximo passo é realizar uma transformação geométrica linear entre o sistema de coordenadas da imagem que é dado em (linha, coluna) em um sistema de fotocoordenadas de uma imagem digital com base na equação (10).

Uma vez transformadas as coordenadas dos pontos-chave em fotocoordenadas o passo seguinte foi computar as coordenadas tridimensionais no terreno dessas fotocoordenadas inicialmente obtidas pelo algoritmo SIFT. O método utilizado neste trabalho foi o “**Método de agrupamento de parâmetros**” visto na seção 5.4 por uma intersecção fotogramétrica linear. Para esta transformação foram utilizadas as duas primeiras imagens, isto é, o primeiro par de cada sequência. Essas coordenadas serviram inicialmente como valores aproximados para o terno (XYZ) de cada ponto objeto para ser utilizado como valor inicial no processo de fototriangulação. A Figura 39 mostra apenas os pontos homólogos entre duas imagens, onde as fotocoordenadas são utilizadas para o cálculo do terno.

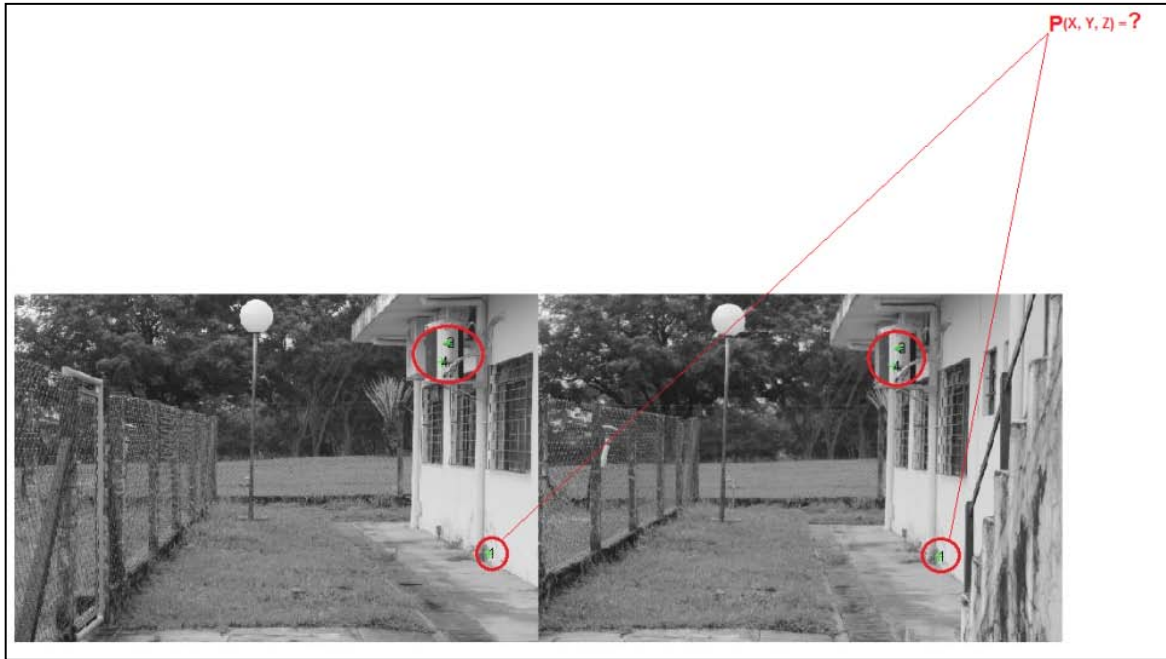


Figura 39 - Cálculo das coordenadas do ponto no terreno (XYZ)

A etapa de calibração dos sensores (câmaras) foi desenvolvida pelo aluno de iniciação científica Edico Ramon de Melo e bolsista da FAPESP do curso de Engenharia Cartográfica da UNESP/FCT de Presidente Prudente – SP²⁵. O objetivo dessa etapa foi à obtenção dos parâmetros de orientação interior (distância focal, posição do ponto principal e distorções das lentes) e a calibração do magnetômetro. O quadro 1 apresenta os valores estimados para os parâmetros de calibração das duas câmaras Cannon T3i usada neste trabalho. Esses valores foram obtidos através do software científico denominado de “cc” eu foi desenvolvido na FCT/Unesp pelo Prof. Dr. Maurício Galo. As câmaras estão identificadas como câmera D (direita) e câmera E (esquerda) em relação à posição relativa dos eixos ópticos durante a tomada das fotografias.

²⁵ Relatório da FAPESP intitulado de “Desenvolvimento de um sistema multissensorial para mapeamento móvel de baixo custo baseado na plataforma ARDUINO”, processo 2012/15102-0.

Parâmetros de Calibração		Câmera E	Câmera D
Distância Focal (Calibrada)	f:	34,6041mm	35,1727mm
Ponto principal	x0:	0,4171 mm	0,2309 mm
Ponto principal	y0:	-0,3096 mm	-0,1701 mm
Distorção Radial	k1:	-3,3147E-05 mm	-3,7141E-05 mm
Distorção Radial	k2:	1,30582E-07 mm	1,77645E-07 mm
Distorção Descentrada	P1:	9,086E-05 mm	7,00283E-05 mm
Distorção Descentrada	P2:	-7,7278E-05 mm	-1,4916E-05 mm

Quadro 1 – Valores dos parâmetros calibrados das câmaras

O sistema referencial adotado neste trabalho é composto por três eixos ortogonais e tem como objetivo estabelecer uma relação espacial do movimento (mapeamento) entre os objetos contidos na cena e os fenômenos de interesse. O referencial inicial foi obtido por um levantamento topográfico e uma ressecção espacial com a finalidade de se obter os POEs iniciais. A partir dos valores dos parâmetros exteriores foi arbitrado para ser o referencial inicial. Os valores estimados encontram-se na seção 7.3. O referencial escolhido está em concordância do padrão estabelecido para o caso terrestre desenvolvido por (Wolf, 1983) que pode ser visto graficamente na Figura 25.

Além de alguns parâmetros da orientação exterior serem tomados como inunção, foi usada também a distância de base como função de inunção segundo a equação (44).

$$B = \sqrt{(X'_{cp} - X''_{cp})^2 + (Y'_{cp} - Y''_{cp})^2 + (Z'_{cp} - Z''_{cp})^2} \quad (44)$$

onde, $X'_{cp}, Y'_{cp}, Z'_{cp}$ referem-se as coordenadas tridimensionais do centro perspectivo da câmara da esquerda. E, $X''_{cp}, Y''_{cp}, Z''_{cp}$, referem-se as coordenadas tridimensionais do centro perspectivo da câmara da direita.

Na quinta e sexta etapa do processo realizou-se a fototriangulação esperando como resultado a estimação dos parâmetros de orientação exterior. Para isso, foi utilizada a fototriangulação baseada nas equações de colinearidade que relacionaram as variáveis do problema: fotocoordenadas (observações), parâmetros de orientação exterior, parâmetros de orientação interior e as coordenadas do espaço objeto (pontos no terreno).

Neste trabalho foi utilizado o modelo de ajustamento (de observações) com o objetivo de estimar uma solução única e paramétrica sob a condição dos Mínimos Quadrados (MQ). Também, um conjunto de injunções relativas aos parâmetros (elementos de orientação exterior, orientação interior e o comprimento da base) foi estimado.

O modelo utilizado é constituído pelas equações de colinearidade e não é linear, por isso a linearização por Série de Taylor foi aplicada.

A solução do modelo matemático funcional sob o método dos mínimos quadrados, com uso de pesos e injunção da distância da base resulta na seguinte solução:

$$X = -(A^t P A + P_x + C^t P^c C)^{-1} (A^t P L + P_x L_x + C^t P_x^c L_x^c) \quad (45)$$

onde, P é o peso relativo às observações e P_x é o peso relativo às injunções. C é a matriz com as derivadas parciais em relação aos parâmetros X_{cp} , Y_{cp} e Z_{cp} da câmara da esquerda e da direita. P^c é a matriz peso e P_x^c a matriz peso injuncionada. ($L_x^c = L_0^c - L_b^c$) é o vetor das observações ajustados a cada iteração, L_0^c é o vetor das observações iniciais e L_b^c é o ajustado.

A variância a posteriori serviu para medir a qualidade global do ajustamento. A formulação da equação é dada por:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V + V_x^T P_x V_x}{n + n_x - u} \quad (46)$$

onde, n é o número de equações de observações; n_x é o número de equações de injunções e u é o total de parâmetros. Todas essas informações podem ser calculadas seguinte forma:

$$n = 2 * tF * nPT \quad (47)$$

$$n_x = 7(\text{POEs}) + 16(\text{POIs}) + 2(\text{Base}) \quad (48)$$

$$u = 10 * tF + n_x \quad (49)$$

onde, tF é o total de fotos e nPT é o número total de pontos no terreno.

Para determinar os valores da matriz peso das observações (P) utilizou-se de uma estratégia que consiste em atribuir pesos para as observações (fotocoordenadas) baseados na distância euclidiana entre as fotocoordenadas (x, y) e o ponto principal da imagem (x_0, y_0) .

Essa estratégia garante que quanto maior a distância do ponto ao centro da imagem maior será o seu peso. Deduzindo assim, que o ponto com maior peso mais próximo às câmaras ele se encontra, isto é, o objeto pode ser melhor observado. Desta forma a construção da matriz peso é dada por:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x' - x_0')^2 + (y' - y_0')^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{(x' - x_0')^2 + (y' - y_0')^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{(x'' - x_0'')^2 + (y'' - y_0'')^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{(x'' - x_0'')^2 + (y'' - y_0'')^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{(x''' - x_0''')^2 + (y''' - y_0''')^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{(x''' - x_0''')^2 + (y''' - y_0''')^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{(x'''' - x_0'''')^2 + (y'''' - y_0'''')^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{(x'''' - x_0'''')^2 + (y'''' - y_0'''')^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{(x'''' - x_0'''')^2 + (y'''' - y_0'''')^2} \end{bmatrix} \quad (50)$$

Onde (x', y') e (x''', y''') são referente às fotocoordenadas da fotografia da esquerda e (x'', y'') e (x''', y''') as da direita.

Duas outras estratégias foram aplicadas no processo de construção da matriz peso das observações, a paralaxe e a atribuição de pesos iguais para todas as observações. Estratégia escolhida na hora do processamento do algoritmo SIFT. A paralaxe foi adotada como padrão para os valores dos pesos.

Paralaxe é o descolamento aparente de um referencial, esse deslocamento em fotografias aéreas apresenta-se paralelo a linha de vôo e são conhecidos como paralaxe estereoscópica.

No caso terrestre, objeto de estudo deste trabalho, a paralaxe é obtida pelo deslocamento de um determinado ponto existente na imagem da esquerda e que também aparece na imagem da direita, obtidas pelo sistema de câmaras estereoscópicas.

No caso da paralaxe em fotografias terrestre ele pode fornecer a informação da distância do ponto analisado em relação ao referencial (centro perspectivo das câmaras), dizendo se um objeto está longe ou perto.

Para atribuição de pesos às observações levou-se em consideração a relação da proximidade dos objetos com as câmaras. Por isso, quanto mais perto o objeto estiver da câmara maior será o seu peso deduzindo, assim, que os objetos poderão ser melhores definidos.

Levando em consideração que as observações não são relacionadas (independentes) entre si, a matriz peso se reduz a uma matriz diagonal. Assim, os pesos das observações

recebem então uma definição simples, e podem ser calculados a partir das expressões relacionadas a seguir.

Levando em consideração de que no ajustamento por mínimos quadrados a definição de peso é dada por:

$$\text{Peso de } x = P_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2} \quad (51)$$

onde, σ_0^2 é conhecido como um fator de variância a priori, definido inicialmente de forma arbitrária. σ_i^2 é a variância da observação.

As observações, bem como os resultados do ajustamento são comumente analisadas a partir da precisão e exatidão (acurácia). Como a precisão expressa o grau de proximidade da observação com sua média, é considerado aqui um objeto (observação) ser mais preciso do que outro quando o mesmo está mais próximo a câmara. Por isso, o uso de paralaxe para cálculo do peso foi adotada a partir do seu desvio-padrão.

$$P_i = \sigma_i \quad (52)$$

Elevando a equação (52) de ambos os lados ao quadrado, obteremos o peso ao quadrado de cada observação em função de sua variância.

$$P_i^2 = \sigma_i^2 \quad (53)$$

Combinando as equações (51) e (53), assumindo que o σ_0^2 é 1, tem-se:

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{P_i^2} \quad (54)$$

A paralaxe foi calculada nas coordenadas x e y das observações (fotocoordenadas). Porém, o que é interessante neste trabalho é a paralaxe em x , pois a paralaxe em y equivale a altura dos objetos e o propósito é avaliar os efeitos ao longo do caminhamento, no mesmo sentido do eixo óptico. Por isso, adotou-se que quanto maior a paralaxe em y menor será o seu peso. Então, por definição temos que o peso da coordenada x é diretamente proporcional a sua paralaxe, e o peso da coordenada y é inversamente proporcional a sua paralaxe, conforme as seguintes equações:

$$P_x^2 = \sigma_x^2 \quad (55)$$

Sabendo que a paralaxe em x (pa_x) é diretamente proporcional ao seu peso, tem-se:

$$pa_x = P_x \quad (56)$$

Elevando o resultado da equação (56) ao quadrado, tem-se:

$$P_x^2 = pa_x^2 \quad (57)$$

Combinando as equações (54) e (57), tem-se:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{pa_x^2} \quad (58)$$

Desenvolvendo o mesmo raciocínio para a coordenada y , temos que a paralaxe em y é inversamente proporcional ao seu peso, tem-se:

$$pa_y = \frac{1}{P_y} \quad (59)$$

Elevando ao quadrado os dois membros da equação (59), tem-se:

$$pa_y^2 = \frac{1}{P_y^2} \quad (60)$$

Combinando as equações (54) e (60), tem-se:

$$\sigma_y^2 = pa_y^2 \quad (61)$$

O design da matriz peso das observações é dado por:

$$MP = \sigma_0^2 * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{\sigma_x^2} & \\ 0 & \frac{1}{\sigma_y^2} \end{bmatrix} \quad (62)$$

Peso x = $\frac{1}{\sigma_x^2}$, em função da paralaxe, temos que o peso x = $\frac{1}{pa_x^2}$, portanto: peso x = pa_x^2 .

Peso y = $\frac{1}{\sigma_y^2}$, em função da paralaxe, temos que o peso y = pa_y^2 , portanto: peso y = $\frac{1}{pa_y^2}$.

Ao final das etapas da metodologia espera-se que os parâmetros de orientação exterior estejam estimados para todas as seqüências até o final do levantamento. Podendo com os resultados analisar quais distorções ocorrem quando se utilizam na fototriangulação observações oriundas apenas das imagens.

7 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo está organizado em quatro partes: a primeira parte mostra a configuração adotada do sistema de câmaras estereoscópicas seguidas dos valores dos parâmetros exteriores e interiores. A segunda parte descreve o processamento das imagens usando a técnica SIFT com diversas dimensões e limiares com o objetivo de definir quais melhores parâmetros para dar seguimento ao processo de fototriangulação. A terceira parte estima a orientação exterior a partir de diferentes pesos atribuídos as observações (paralaxe, distância euclidiana, pesos iguais). A quarta e última parte expõe uma discussão dos resultados obtidos na etapa anterior

7.1 Configuração do sistema de câmaras

As imagens levantadas foram adquiridas de um sistema com duas câmaras do modelo Cannon EOS T3i (600D). As câmaras foram acopladas em uma barra com uma distância de base de 0,40m com um sistema eletrônico de sincronizo de disparo fornecido pelo próprio fabricante das câmaras e compatível com ambas. A **Figura 40** mostra a disposição das câmaras e o sistema eletrônico ao centro.



Figura 40 - Sistema de câmaras

O referencial adotado é local centrado na câmara da esquerda cujos valores dos parâmetros de orientação interior de ambas as câmaras são dados pelo **Quadro 1**.

Os trechos levantados encontram-se nas proximidades da Universidade Estadual Paulista de Presidente Prudente (UNESP). A **Figura 41** mostra os trechos do levantamento realizado.

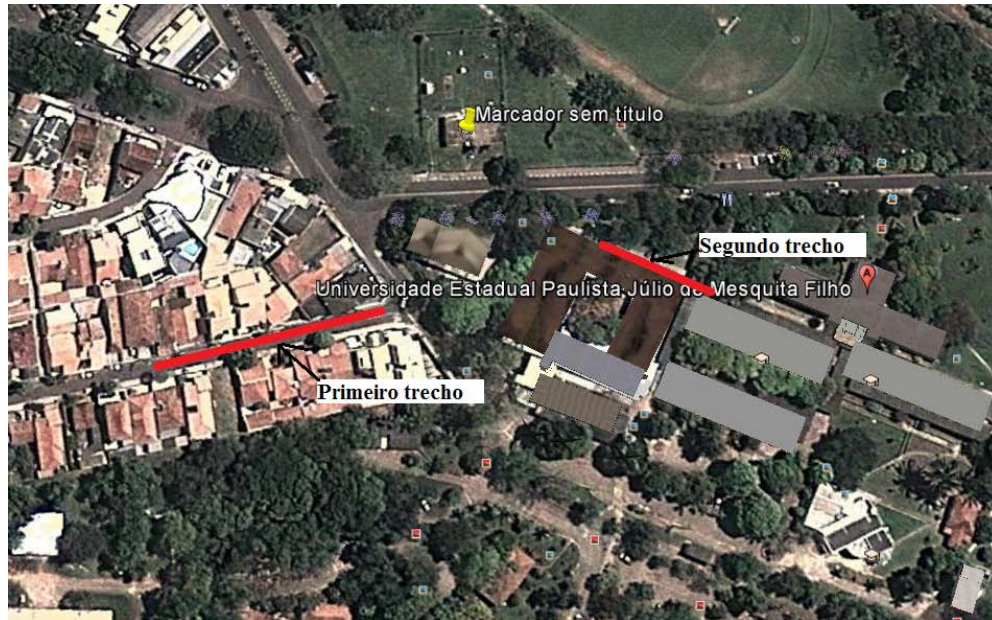


Figura 41 - Locais do levantamento

7.2 Processamento das imagens pelo SIFT

As imagens foram adquiridas em dois formatos padrões das câmaras aqui utilizadas (JPG²⁶ e CR2²⁷). Porém, para utilizá-las diretamente como entrada de dados no programa SIFT o formato JPG foi o mais adequado por não necessitar de converter a imagem para usá-la como é necessário com uma imagem RAW. A **Figura 42** mostra os dois primeiros pares de imagens obtidas pelo sistema de câmaras estereoscópicas. O levantamento foi ao longo da via apresentado nas imagens.

²⁶ JPEG é um formato de compressão de imagens digitais e a sigla significa em inglês “Joint Photographic Experts Group”

²⁷ É a extensão usada pelo fabricante da câmara Cannon EOS T3i para identificar o formato cru (RAW) dos dados da imagem .



Figura 42 - Primeiro par de imagens estereoscópicas

O quadro 2 mostra um comparativo com o tempo de processamento do SIFT com imagens de diversas resoluções. Lembrando que a imagem original tem dimensão de 1920 x 1280 pixels. Esse processamento foi obtido apenas para o primeiro par de imagens. Por esse resultado já foi possível obter dados suficientes para a decisão de qual a dimensão mais interessante para realizar os processamentos do SIFT e da fototriangulação. O valor do limiar do SIFT também interfere no resultado do tempo de processamento. Isso foi constatado através de testes que avaliaram diferentes limiares com a mesma dimensão.

Percentual de redução	Dimensão reduzida (Pixels)	Tempo aproximado
0%	1920 x 1280	10 min
40%	1152 x 768	3 min 50 seg
50%	960 x 640	1 min 50 seg
60%	768 x 512	58 seg
80%	384 x 256	50 seg

Quadro 2 - Tempo gasto no processamento do SIFT

Pela análise do quadro 2 e por até limitação do próprio SIFT (memória)²⁸ em processar imagens de grandes dimensões adotou-se a redução da imagens a partir de 50%. Essa escolha está diretamente ligada ao tempo de processamento. Por isso, uma imagem com um valor de redução de 60% terá uma dimensão equivalente a 40% da imagem original a ser processada pelo SIFT. Isso reduz significativamente o tempo de processamento sem afetar a quantidade de pontos-chave necessária para a etapa de fototriangulação. Como poderá ser visto na seção dos experimentos.

Limiar SIFT	Perc. Redução	Dimensão Reduzida (Pixels)	Imagens (pontos-chaves)				Correspondências				
			1	2	3	4	1 e 2	3 e 4	1 e 3	2 e 4	1, 2, 3 e 4
0.3	0%	1920 x 1280	12282	14912	14604	12282	374	641	1057	1083	89
	40%	1152 x 768	4728	5755	5476	4728	62	93	167	178	11
	50%	960 x 640	3292	3714	3737	3292	90	153	270	256	16
	60%	768 x 512	2258	2468	2471	2258	41	64	107	112	5
	80%	384 x 256	667	707	698	667	falhou				
0.5	0%	1920 x 1280	12282	14912	14604	12282	1832	2280	3548	3231	684
	40%	1152 x 768	4728	5755	5476	4728	436	538	757	740	110
	50%	960 x 640	3292	3714	3737	3292	463	618	859	785	161
	60%	768 x 512	2258	2468	2471	2258	261	279	402	447	75
	80%	384 x 256	667	707	698	667	91	75	113	140	22
0.6	0%	1920 x 1280	12282	14912	14604	12282	2622	3104	4580	4075	1101
	40%	1152 x 768	4728	5755	5476	4728	708	825	1129	1079	213
	50%	960 x 640	3292	3714	3737	3292	681	847	1131	1028	273
	60%	768 x 512	2258	2468	2471	2258	389	403	566	611	130
	80%	384 x 256	667	707	698	667	132	108	157	191	36
0.8	0%	1920 x 1280	12282	14912	14604	12282	4095	4584	6109	5473	1862
	40%	1152 x 768	4728	5755	5476	4728	1300	1473	1853	1691	486
	50%	960 x 640	3292	3714	3737	3292	1106	1211	1586	1408	487
	60%	768 x 512	2258	2468	2471	2258	668	699	895	900	261
	80%	384 x 256	667	707	698	667	205	199	241	263	68

Quadro 3 - Comparativo entre os percentuais de redução e os limiares do SIFT

O **Quadro 3** descreve o resultado do processamento do SIFT com diferentes limiares e percentuais de redução. Nota-se que a quantidade extraída de pontos-chave independe do limiar previamente estabelecido como pode ser observado nos valores do quadro 3 onde as quantidades de pontos-chave obtidos pelo processamento do SIFT são iguais entre os diferentes limiares para o mesmo percentual de redução. Por exemplo: a quantidade de pontos-chave obtidos nas imagens (1, 2, 3 e 4) são as mesmas no percentual de redução de 40% e limiar 0.3, 0.5, 0.6 e 0.8. O limiar está diretamente ligado a número de

²⁸ Essa limitação se refere ao software demo disponibilizado pelo construtor do algoritmo David Lowe e disponibilizado na internet no seguinte endereço: (<http://www.cs.ubc.ca/~lowe/keypoints/>).

correspondências estabelecidas entre os pontos-chave, quanto maior o limiar maior será o número de correspondências entre os pontos-chave em diferentes imagens, porém, isso pode ocasionar problemas de falsas correspondências quando o limiar usado for maior do que o recomendado por Davi Lowe²⁹, que é de 0.6.

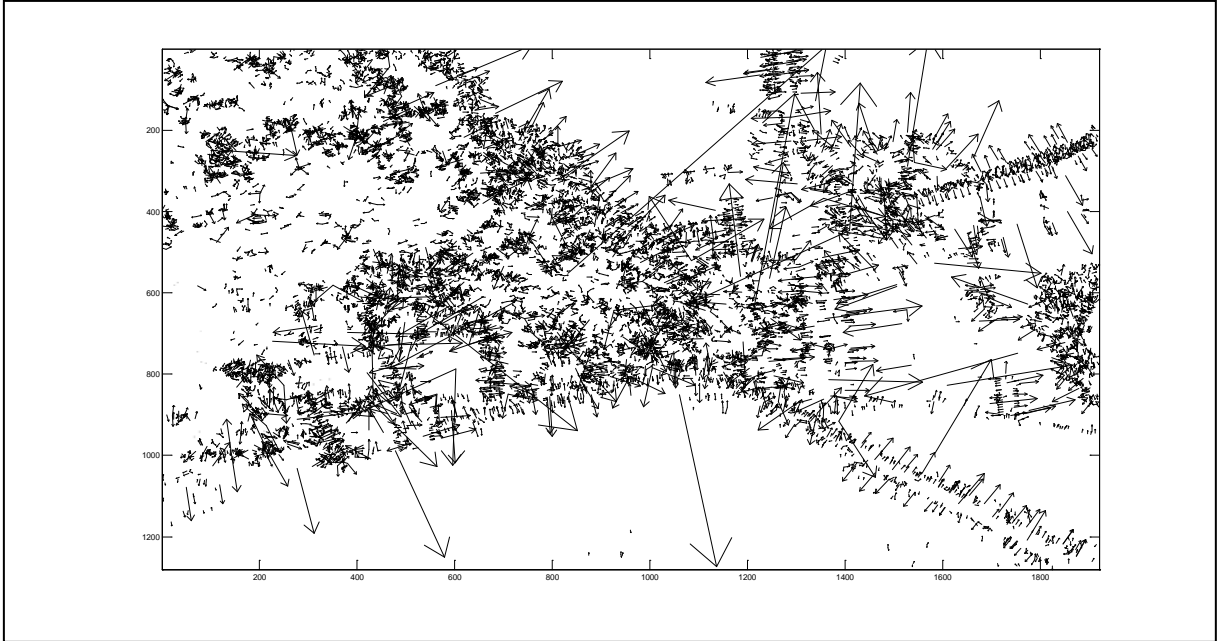


Figura 43 – Vetores (Imagem de dimensão original)

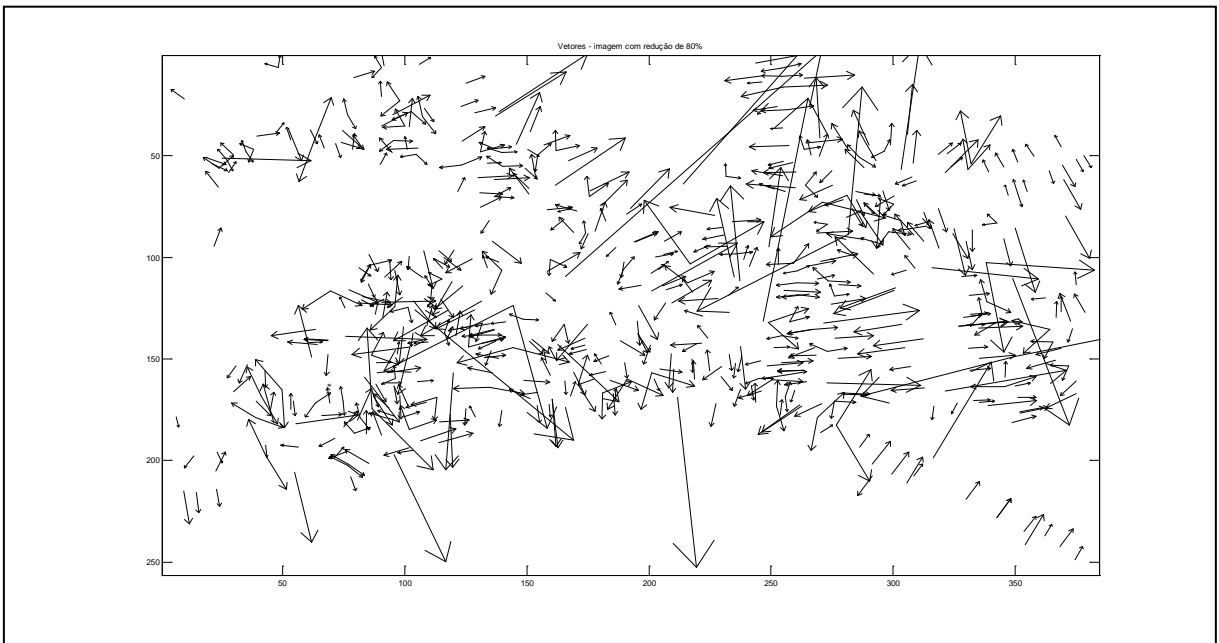


Figura 44 - Vetores (Imagem com redução de 80%)

²⁹ O artigo completo que estabelece esse limiar pode ser visto em Lowe (2004).

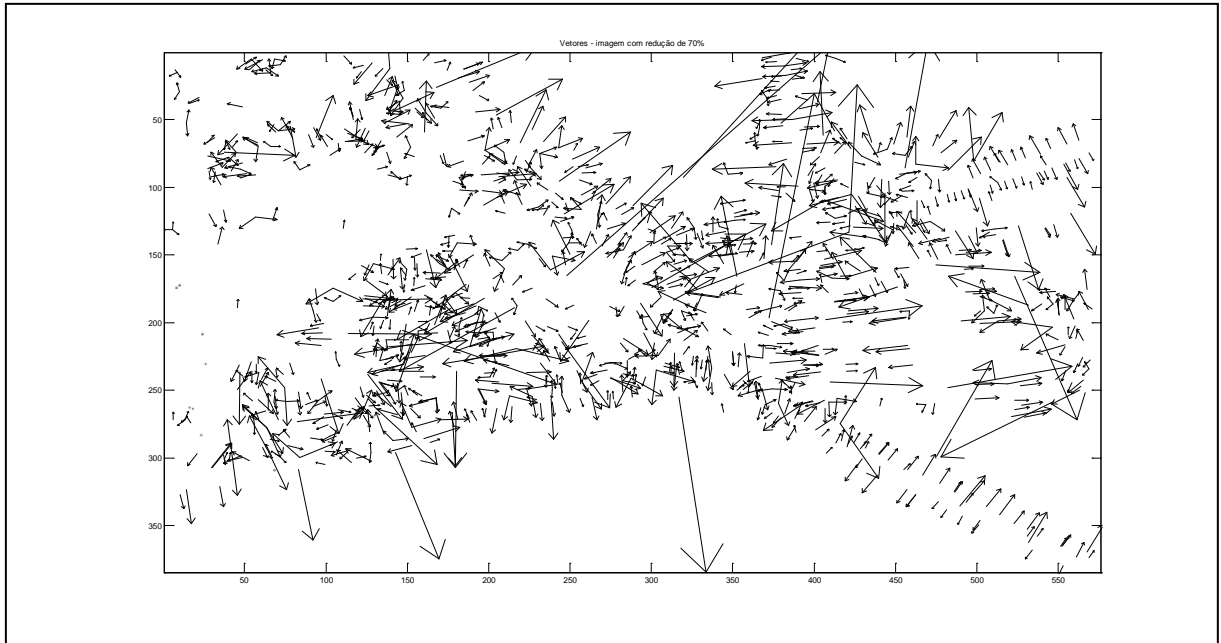


Figura 45 - Vetores (Imagem com redução de 70%)

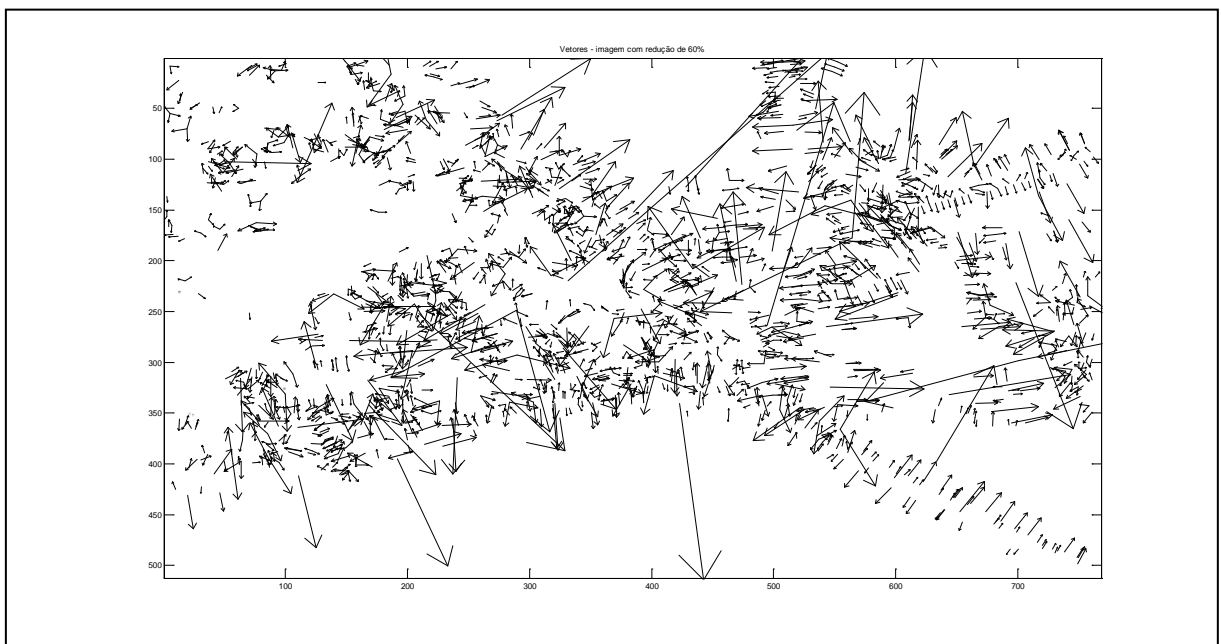


Figura 46 - Vetores (Imagem com redução de 60%)

A **Figura 43** mostra os vetores referentes aos pontos-chave obtidos pelo SIFT na primeira imagem com a dimensão original, já a **Figura 44**, **Figura 45** e **Figura 46** tiveram redução de 80%, 70% e 60% respectivamente. A partir disso é possível verificar graficamente a quantidade de pontos-chave extraídos em relação às dimensões das imagens, isto é, quanto maior for a dimensão da imagem maior será o número de pontos-chave. Esses vetores são compostos pela magnitude e a direção que são usados para estabelecer a correlação entre os vetores das imagens, com o objetivo de estabelecer a correspondência entre os pontos-chave.

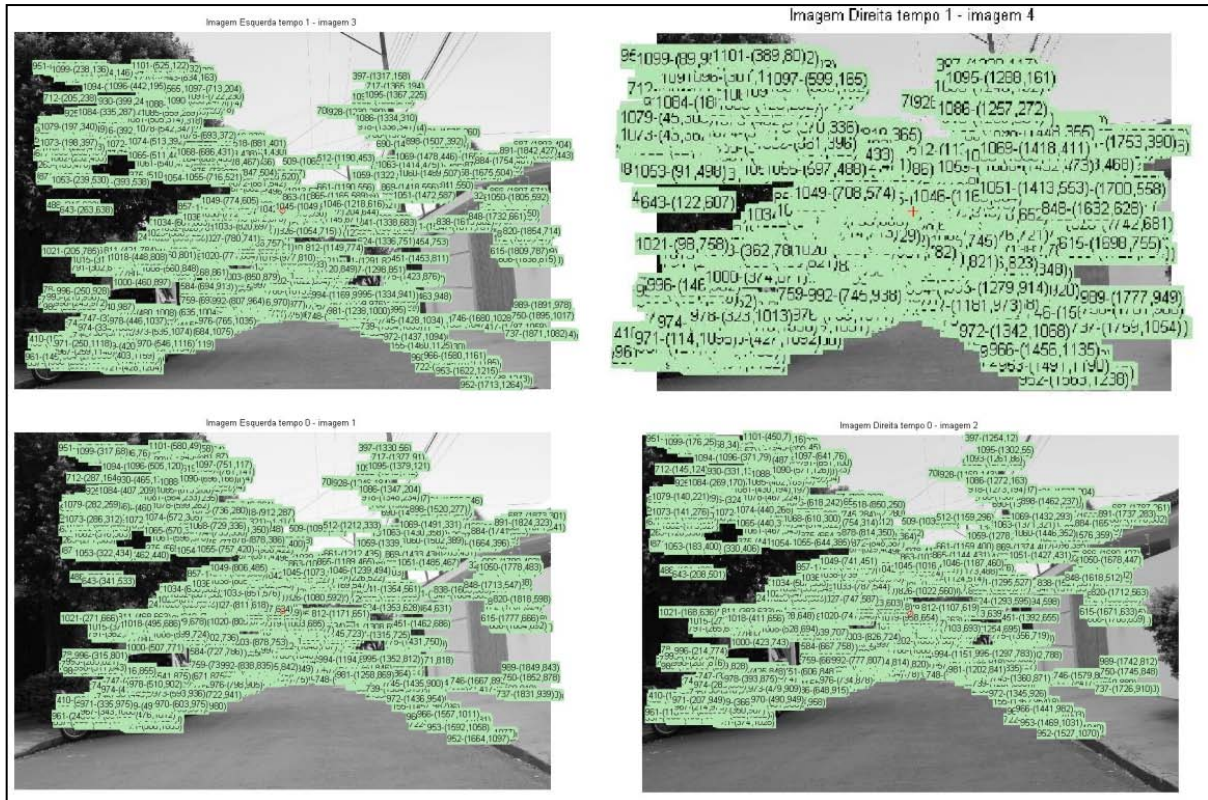


Figura 47 - Demonstrativo gráfico dos pontos-chave nas quatro imagens (Dimensão original e 0.6 SIFT)

Na **Figura 47** é possível visualizar os pontos-chave correspondidos e sua distribuição nas quatro imagens da primeira seqüência após o processamento do SIFT com um limiar de 0.6 a partir da dimensão original, isto é, sem aplicar nenhuma redução. Conforme os dados descritos no **Quadro 3** foram obtidos para este caso 1101 pontos-chave que existe correspondência entre as quatro imagens. Entretanto, outros números são importante serem analisados, tal como o número de correspondências entre as imagens 1 e 2 (lateral), total de 2622. Entre as imagens 3 e 4 (lateral), total de 3104 correspondências. Imagens 1 e 3 (avante) um total de 4580 e nas imagens 2 e 4 (avante) 4075 pontos-chave.

A partir desses dados (ver **Quadro 3**) é possível constatar que para um mesmo limiar a quantidade de correspondência é maior quando a técnicas (SIFT e Correspondência) é aplicada nas imagens que tem diferença de escala, que são os casos das (1 e 3; 2 e 4). Esse resultado reforça a proposta e comprova a eficácia da técnica desenvolvida por Davi Lowe que a descreve como invariante a translação, escala e rotação (LOWE, 2004).



Figura 48 - Demonstrativo gráfico dos pontos-chave nas quatro imagens (60% redução e 0.6 SIFT)

A **Figura 48** mostra os pontos-chave com correspondência nas quatro primeiras imagens do levantamento. Nota-se que mesmo com um percentual de redução de 60% e um limiar 0.6 (recomendado por David Lowe) tem-se um grande número de observações e as mesmas encontram-se espalhados na cena. Esse espalhamento é de grande importância para garantir um ajuste geométrico das observações, podendo assim garantir um melhor processo de fototriangulação.

Por esse motivo é que para os experimentos foi usado um percentual de redução de 70% e um limiar de 0.4 para realizar a fototriangulação com ajuste das observações, pois, percebeu que com essa combinação tem-se um número suficiente de observações e uma distribuição geométrica adequada.

7.3 Experimento com atribuição de pesos para as observações (paralaxe, distância euclidiana e pesos iguais)

As imagens foram importadas para o ambiente de desenvolvimento do Matlab e em seguida convertidas para uma escala de cinza usando rotinas da própria ferramenta, rotinas essas conhecidas como APIs³⁰. Para os experimentos utilizou-se de uma redução de 70% e um limiar de 0.4. Apesar do limiar recomendado por David Lowe ser de 0.6 aqui foi utilizado o valor de 0.4 para garantir uma melhor qualidade nos pontos-chave com correspondência nas quatro imagens. Um limiar menor caracteriza que os valores comparados dos descritores tendem estar mais próximos um do outro, influenciando diretamente o grau de correlação entre eles.

Após alguns testes com diferentes combinações (dimensão e limiar) verificou-se a existência de um número suficiente de observações e uma distribuição aceitável por toda a cena para o levantamento aqui realizado.

Os valores iniciais dos parâmetros de orientação exterior foram obtidos por um levantamento topográfico de alguns pontos analisados nas imagens do primeiro par de fotografias e em seguida realizou-se uma ressecção espacial para estimá-los. Esses valores foram adotados como o referencial local e suas respectivas variâncias arbitradas como podem ser vistos no **Quadro 4**.

Foto	Parâmetros de orientação exterior						Variâncias					
	ω	φ	κ	Xcp	Ycp	Zcp	V. ω	V. φ	V. κ	V. Xcp	V. Ycp	V. Zcp
1	2,2561	5,2397	-4,0543	005,6418	81,4716	01,1856	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001
2	1,8846	5,0261	-4,1671	006,0690	81,5234	01,1501	0	0	0	0,000001	0	0
3	2,2561	5,2397	-4,0543	005,6418	82,4716	01,1856	0	0	0	0	0	0
4	1,8846	5,0261	-4,1671	006,0690	82,5234	01,1501	0	0	0	0	0	0
ω, φ e κ estão em graus												
Xcp, Ycp e Zcp estão em metros												

Quadro 4 - Parâmetros de orientação exterior inicial

³⁰ API é a acrônimo de Application Programming Interface. O equivalente ao português é uma Interface de Programação de Aplicativos.

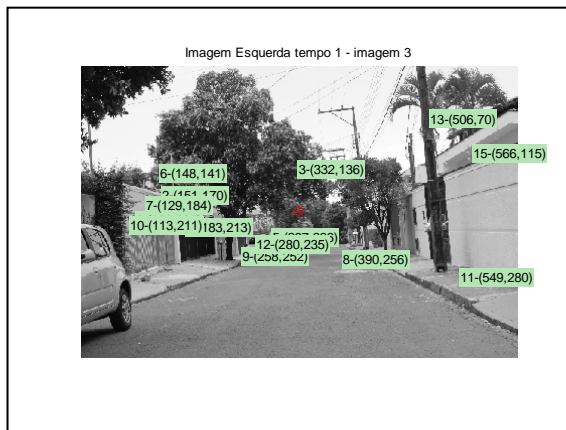


Figura 49 - Imagem 19 (tempo 9)

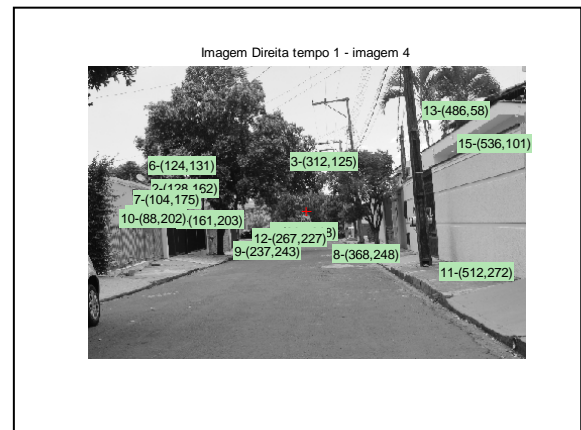


Figura 50 - Imagem 20 (tempo 9)

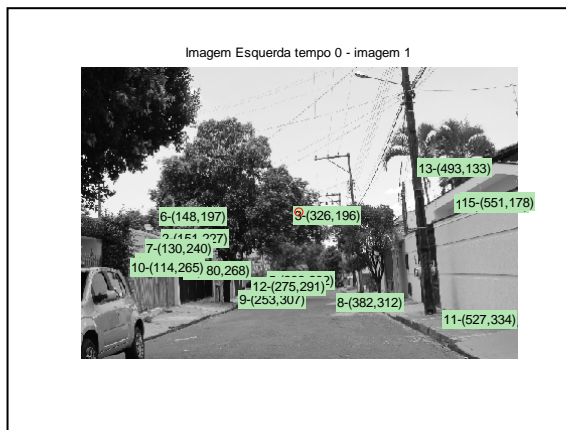


Figura 51 - Imagem 17 (tempo 8)

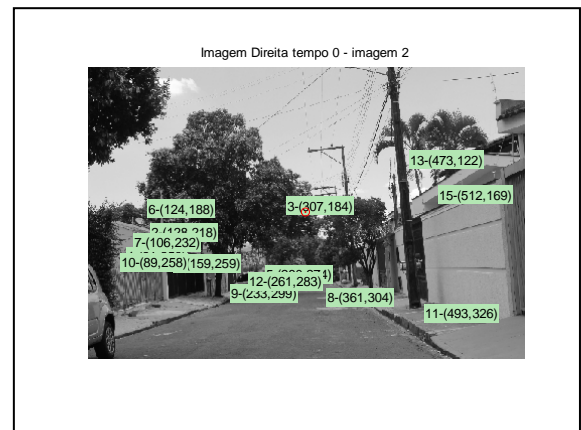


Figura 52 - Imagem 18 (tempo 8)

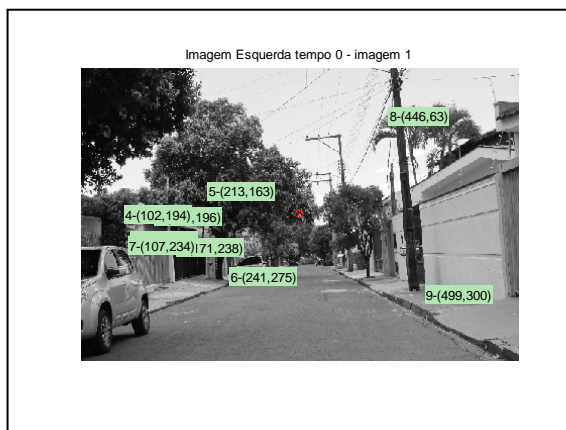


Figura 53 - Imagem 15 (tempo 7)

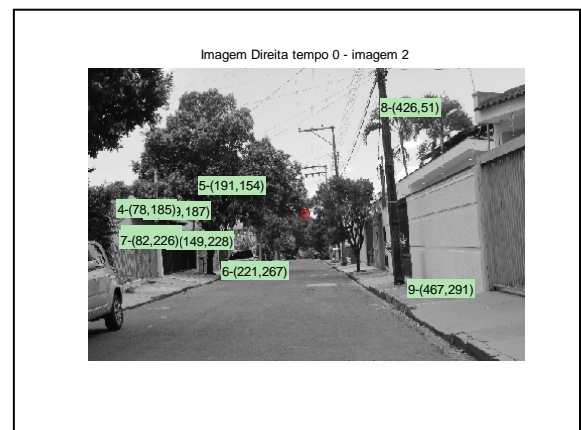


Figura 54 - Imagem 16 (tempo 7)

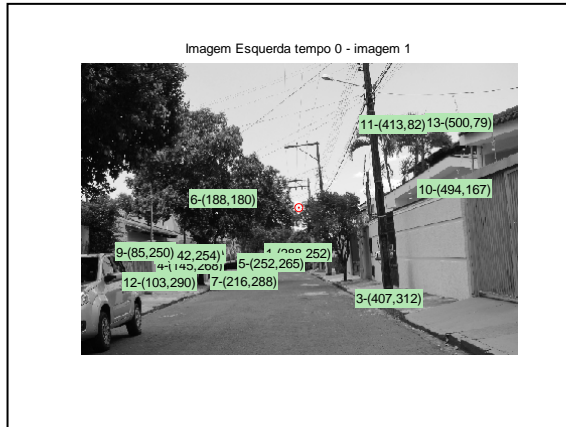


Figura 55 - Imagem 13 (tempo 6)

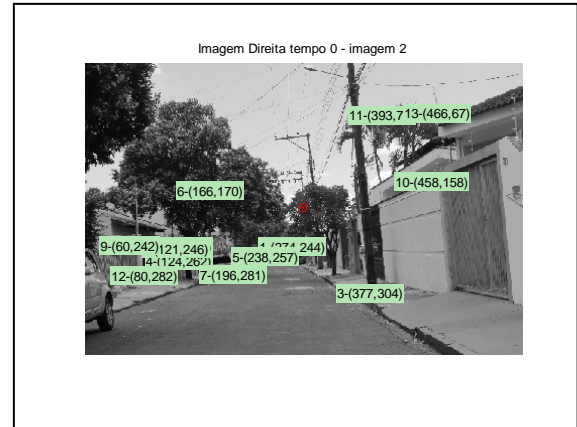


Figura 56 - Imagem 14 (tempo 6)

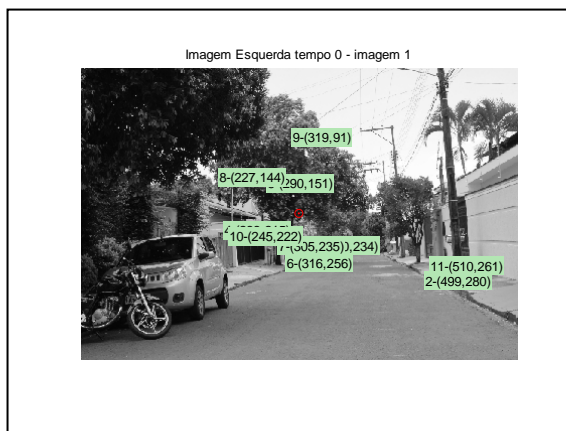


Figura 57 - Imagem 11 (tempo 5)

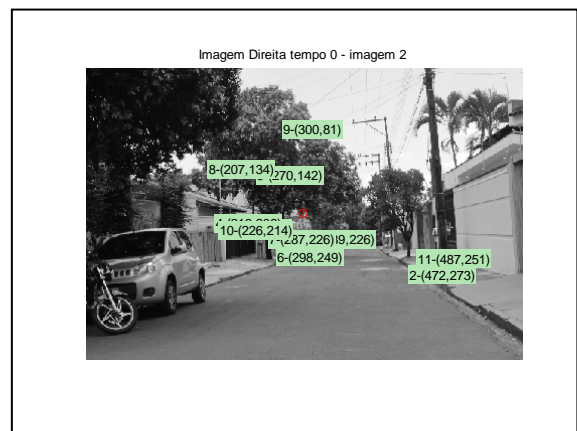


Figura 58 - Imagem 12 (tempo 5)

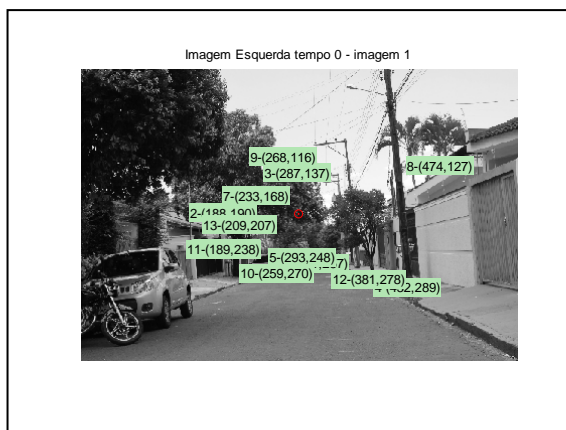


Figura 59 - Imagem 9 (tempo 4)

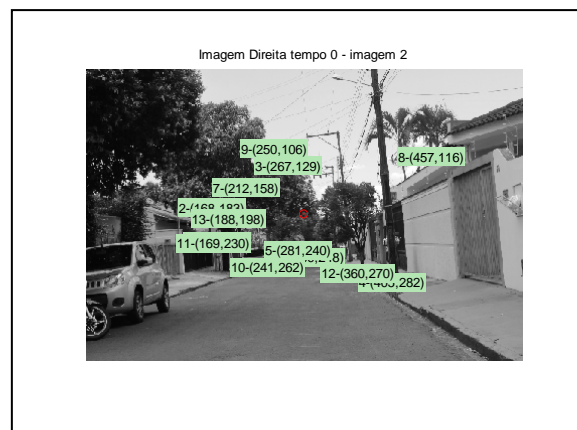


Figura 60 - Imagem 10 (tempo 4)

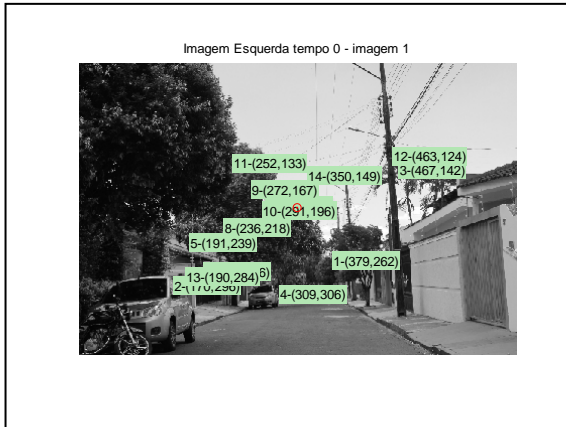


Figura 61 - Imagem 7 (tempo 3)



Figura 62 - Imagem 8 (tempo 3)

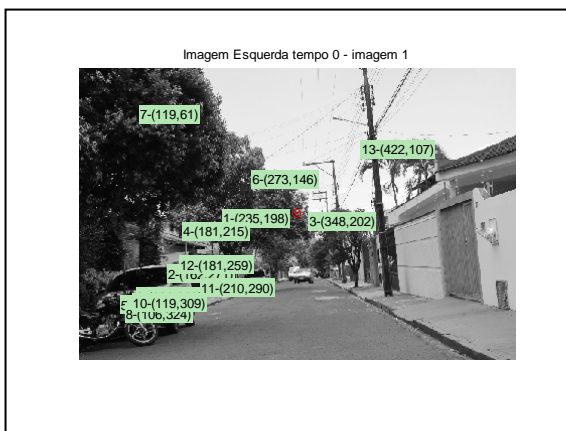


Figura 63 - Imagem 5 (tempo 2)

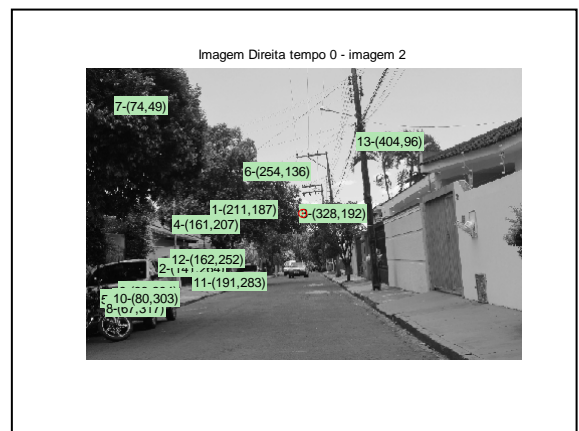


Figura 64 - Imagem 6 (tempo 2)

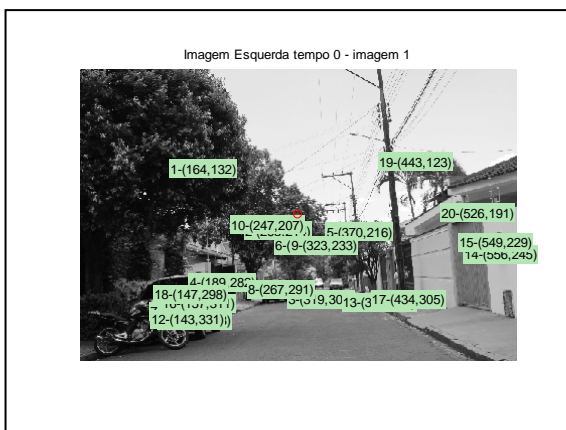


Figura 65 - Imagem 3 (tempo 1)



Figura 66 - Imagem 4 (tempo 1)

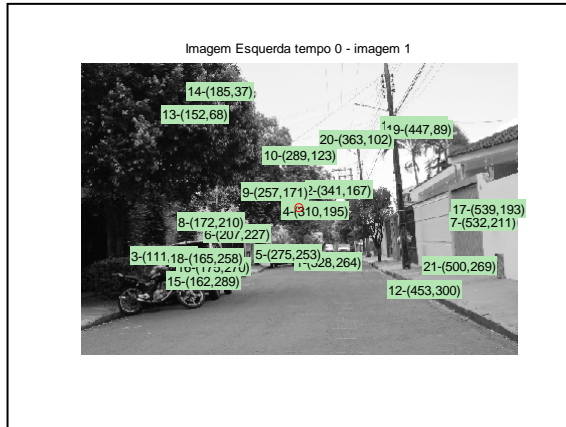


Figura 67 - Imagem 1 (tempo 0)

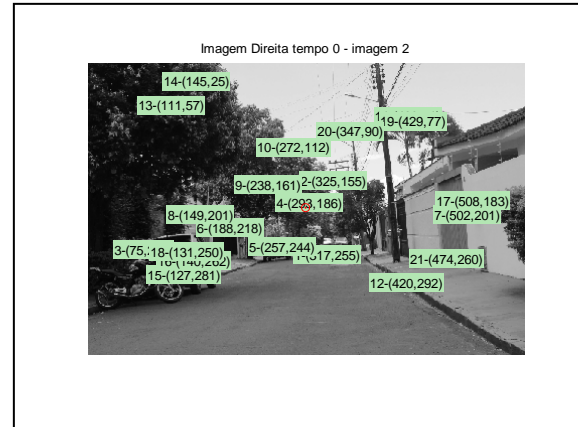


Figura 68 - Imagem 2 (tempo 0)

Da **Figura 49** a **Figura 68** é possível verificar as imagens resultantes do processamento do SIFT e a correspondência entre todos os pares de imagens da sequência levantada. Ao todos foram 20 imagens tomadas em 9 tempos. O processamento completo (SIFT, correspondência e fototriangulação) sempre ocorreu entre 4 imagens de cada vez. Por esse motivo, o segundo par de imagens da primeira sequência passa a ser, no processamento seguinte, o primeiro par de imagens da segunda sequência. Esse procedimento se repete até o final das seqüências (levantamento).

7.3.1 Resultado da fototriangulação básica (paralaxe)

A fototriangulação básica refere-se ao processamento sem que haja o recálculo da matriz peso das observações. Serve para mostrar a necessidade de “eliminar” as observações cujos resíduos sejam maiores do que o tamanho do pixel, adotado aqui como σ_{pix} como um critério de análise de qualidade das observações oriundas da técnica SIFT. Neste experimento a inunção de base também foi aplicada.

Nos quadros de 5 a 9 encontram-se os valores dos parâmetros iniciais (PO) usado no processo de fototriangulação e os ajustados (PA). Sempre os parâmetros ajustados do segundo par de cada sequência serão os parâmetros iniciais do primeiro par da sequência seguinte. As variâncias dos parâmetros iniciais foram arbitradas para cada sequência de processamento conforme os valores descritos no **Quadro 4**.

Número de iterações final : 3 Sequência de processamento : 1 Sigma a posteriori : 7.992465							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
1	PO	92.2561	5.2397	-4.0543	1005.6418	981.4716	101.1856
	PA	99.3741	4.0363	-4.6142	1005.6441	981.4718	101.1884
2	PO	91.8846	5.0261	-4.1671	1006.0690	981.5234	101.1501
	PA	100.5024	2.6118	-6.5738	1006.0673	981.2932	101.0468
3	PO	92.2561	5.2397	-4.0543	1005.6418	982.4716	101.1856
	PA	93.4979	3.8201	-6.8148	1005.5284	983.0166	101.2070
4	PO	91.8846	5.0261	-4.1671	1006.0690	982.5234	101.1501
	PA	93.2190	3.4813	-6.6562	1005.9527	982.9407	101.2260

Quadro 5 - Resumo dos resultados da fototriangulação básica da primeira sequência

Número de iterações final : 3 Sequência de processamento : 2 Sigma a posteriori : 10.014798							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
3	PO	93.4979	3.8201	-6.8148	1005.5284	983.0166	101.2070
	PA	96.6782	2.2933	-7.6500	1005.5288	983.0167	101.2073
4	PO	93.2190	3.4813	-6.6562	1005.9527	982.9407	101.2260
	PA	97.0470	-1.0372	-9.0775	1005.9528	983.0357	101.0404
5	PO	93.4979	3.8201	-6.8148	1005.5284	984.2685	101.2070
	PA	99.1323	2.1380	-9.9656	1005.8362	984.5504	101.1266
6	PO	93.2190	3.4813	-6.6562	1005.9527	984.0921	101.2260
	PA	99.3310	2.3864	-9.7513	1006.2336	984.3893	101.1653

Quadro 6 - Resumo dos resultados da fototriangulação básica da segunda sequência

Número de iterações final : 3 Sequência de processamento : 3 Sigma a posteriori : 8.176842							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
5	PO	99.1323	2.1380	-9.9656	1005.8362	984.5504	101.1266
	PA	104.9166	1.1653	-9.6178	1005.8344	984.5507	101.1307
6	PO	99.3310	2.3864	-9.7513	1006.2336	984.3893	101.1653
	PA	108.9093	-0.0977	-15.9652	1006.2360	984.4187	101.2170
7	PO	99.1323	2.1380	-9.9656	1005.8362	985.9775	101.1266
	PA	101.7834	-0.3519	-10.2707	1006.4896	985.1538	101.0387
8	PO	99.3310	2.3864	-9.7513	1006.2336	985.7230	101.1653
	PA	104.1535	-0.8626	-10.9948	1006.8565	984.5480	101.1182

Quadro 7 - Resumo dos resultados da fototriangulação básica da terceira sequência

Número de iterações final : 4 Sequência de processamento : 4 Sigma a posteriori : 4.596830							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
7	PO	101.7834	-0.3519	-10.2707	1006.4896	985.1538	101.0387
	PA	103.4315	-0.9735	-10.0349	1006.4876	985.1536	101.0340
8	PO	104.1535	-0.8626	-10.9948	1006.8565	984.5480	101.1182
	PA	121.0291	14.6237	-17.1728	1006.8565	984.7108	100.9866
9	PO	101.7834	-0.3519	-10.2707	1006.4896	985.5495	101.0387
	PA	118.8140	-17.4017	-10.3544	1007.2121	985.5174	100.7025
10	PO	104.1535	-0.8626	-10.9948	1006.8565	985.0686	101.1182
	PA	130.3855	1.4482	-20.1818	1007.4537	984.9793	100.5974

Quadro 8 - Resumo dos resultados da fototriangulação básica da quarta sequência

Número de iterações final		: 3					
Sequência de processamento		: 5					
Sigma a posteriori		: 5.383734					

Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)

9	PO	118.8140	-17.4017	-10.3544	1007.2121	985.5174	100.7025
	PA	118.8439	-17.5786	-9.0113	1007.2214	985.5174	100.7025
10	PO	130.3855	1.4482	-20.1818	1007.4537	984.9793	100.5974
	PA	-83.5193	-57.2482	-156.2439	1007.4445	986.2727	101.7883
11	PO	118.8140	-17.4017	-10.3544	1007.2121	986.0393	100.7025
	PA	139.9789	-23.7678	36.8570	1007.3516	985.5932	100.6401
12	PO	130.3855	1.4482	-20.1818	1007.4537	985.4216	100.5974
	PA	91.0528	-26.4886	-124.6614	1007.8099	985.3912	100.4917

Quadro 9 - Resumo dos resultados da fototriangulação básica da quinta sequência

Do Quadro 5 ao Quadro 9 exibem os valores dos parâmetros de orientação exterior ajustados em cada sequência. Observou-se uma forte tendência de degradação dos ângulos de orientação envolvidos (ω , ϕ , κ). A

Figura 69 mostra graficamente as coordenadas Xcp e Ycp plotadas num gráfico 2D a evolução de ambas ao longo do caminhamento das sequências processadas. Também, é possível verificar que elas se degradaram ao longo do levantamento. O processamento deste experimento, diferente dos demais, foi interrompido já na quinta sequência em função de que os dados não convergiram mais quando se executou a fototriangulação.

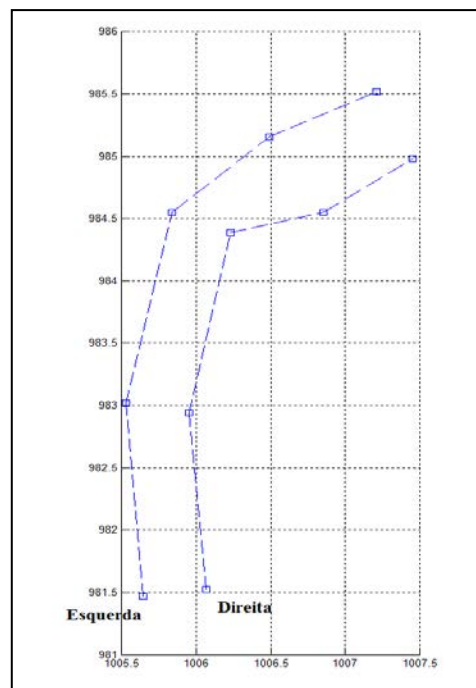


Figura 69 - POEs ajustados (câmara da esquerda e direita)

7.3.2 Resultado da fototriangulação com reproprocessamento da matriz peso (paralaxe)

Neste experimento as seqüências foram processadas até o final do levantamento (9 tempos). Para cada seqüência realizou-se a fototriangulação com ajustamento das observações. Porém, diferente do processo na seção anterior, neste a matriz peso foi reproprocessada uma única vez com base num critério. O critério adotado foi que o resíduo da observação referente à coordenada x se fosse maior do que o tamanho do pixel, a peso da mesma seria redefinido para um valor previamente escolhido, caso contrário o seu peso não seria alterado. O novo valor para o peso foi de (0.00001). Dessa forma, a observação cujo peso foi alterado terá uma influência muito pequena no reproprocessamento da fototriangulação. A estrutura do programa desenvolvido não permite retirar essas observações fisicamente, por isso, foi adotada aqui a técnica de atribuição de pesos pequenos para observações com algum tipo de erro.

Os quadros 10 a 18 mostram numericamente os valores resultantes dos POEs em cada seqüência processada.

Número de iterações final : 3							
Seqüência de processamento : 1							
Sigma a posteriori : 0.000919							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
1	PO	92.2561	5.2397	-4.0543	1005.6418	981.4716	101.1856
	PA	92.2562	5.2397	-4.0543	1005.6418	981.4716	101.1856
2	PO	91.8846	5.0261	-4.1671	1006.0690	981.5234	101.1501
	PA	92.7046	4.7625	-4.1183	1006.0690	981.5124	101.1581
3	PO	92.2561	5.2397	-4.0543	1005.6418	982.4716	101.1856
	PA	92.3738	5.0584	-4.0257	1005.6557	982.4732	101.1835
4	PO	91.8846	5.0261	-4.1671	1006.0690	982.5234	101.1501
	PA	78.6290	4.8753	1.3278	1006.0787	982.5208	101.1222

Quadro 10 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (primeira seqüência)

Número de iterações final : 3							
Seqüência de processamento : 2							
Sigma a posteriori : 0.005552							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
3	PO	92.3738	5.0584	-4.0257	1005.6557	982.4732	101.1835
	PA	92.3736	5.0282	-4.0262	1005.6557	982.4730	101.1835
4	PO	78.6290	4.8753	1.3278	1006.0787	982.5208	101.1222
	PA	77.5552	9.6393	2.4272	1006.0787	982.5202	101.1220
5	PO	92.3738	5.0584	-4.0257	1005.6557	983.4744	101.1835
	PA	95.8174	-1.3607	-2.9241	1005.6460	983.4601	101.1257
6	PO	78.6290	4.8753	1.3278	1006.0787	983.5298	101.1222
	PA	74.7019	10.0599	3.6210	1006.0734	983.5032	101.1845

Quadro 11 -- Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (segunda seqüência)

Número de iterações final : 4							
Sequência de processamento : 3							
Sigma a posteriori : 0.003890							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
5	PO	95.8174	-1.3607	-2.9241	1005.6460	983.4601	101.1257
	PA	95.8174	-1.3605	-2.9242	1005.6460	983.4601	101.1257
6	PO	74.7019	10.0599	3.6210	1006.0734	983.5032	101.1845
	PA	71.8422	6.7868	1.6155	1006.0734	983.5048	101.1062
7	PO	95.8174	-1.3607	-2.9241	1005.6460	984.4605	101.1257
	PA	96.5114	-3.1542	-2.7754	1005.6671	984.2964	101.1133
8	PO	74.7019	10.0599	3.6210	1006.0734	984.5080	101.1845
	PA	70.7387	16.1398	3.7454	1006.0768	984.2724	101.2619

Quadro 12 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (terceira sequência)

Número de iterações final : 3							
Sequência de processamento : 4							
Sigma a posteriori : 0.478963							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
7	PO	96.5114	-3.1542	-2.7754	1005.6671	984.2964	101.1133
	PA	96.5115	-3.1541	-2.7755	1005.6671	984.2964	101.1133
8	PO	70.7387	16.1398	3.7454	1006.0768	984.2724	101.2619
	PA	68.1355	14.5847	2.8706	1006.0768	984.2727	101.2415
9	PO	96.5114	-3.1542	-2.7754	1005.6671	985.1976	101.1133
	PA	97.7614	-6.4166	-2.0350	1005.6080	985.0246	101.0765
10	PO	70.7387	16.1398	3.7454	1006.0768	985.0353	101.2619
	PA	70.2671	16.1380	3.8684	1006.0080	985.0185	101.2518

Quadro 13 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (quarta sequência)

Número de iterações final : 3							
Sequência de processamento : 5							
Sigma a posteriori : 0.001743							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
9	PO	97.7614	-6.4166	-2.0350	1005.6080	985.0246	101.0765
	PA	97.7615	-6.4164	-2.0351	1005.6080	985.0246	101.0765
10	PO	70.2671	16.1380	3.8684	1006.0080	985.0185	101.2518
	PA	67.9215	15.2253	3.4110	1006.0080	985.0185	101.2341
11	PO	97.7614	-6.4166	-2.0350	1005.6080	985.8345	101.0765
	PA	96.6858	-10.8312	-0.9771	1005.5232	985.7189	101.0552
12	PO	70.2671	16.1380	3.8684	1006.0080	985.7691	101.2518
	PA	71.5190	16.1862	5.0683	1005.9154	985.7199	101.2319

Quadro 14 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (quinta sequência)

Número de iterações final : 3							
Sequência de processamento : 6							
Sigma a posteriori : 0.002656							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
11	PO	96.6858	-10.8312	-0.9771	1005.5232	985.7189	101.0552
	PA	96.6859	-10.8312	-0.9771	1005.5232	985.7189	101.0552
12	PO	71.5190	16.1862	5.0683	1005.9154	985.7199	101.2319
	PA	69.8457	14.9808	4.6090	1005.9154	985.7279	101.2311
13	PO	96.6858	-10.8312	-0.9771	1005.5232	986.4275	101.0552
	PA	96.7636	-11.3716	-0.3451	1005.4594	986.3777	101.0509
14	PO	71.5190	16.1862	5.0683	1005.9154	986.4470	101.2319
	PA	71.5402	16.1860	5.4939	1005.8528	986.4236	101.2186

Quadro 15 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (sexta sequência)

Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
Número de iterações final : 3							
Sequência de processamento : 7							
Sigma a posteriori : 0.002156							
13	PO PA	96.7636 96.7637	-11.3716 -11.3715	-0.3451 -0.3451	1005.4594 1005.4594	986.3777 986.3777	101.0509 101.0509
14	PO PA	71.5402 69.3538	16.1860 15.4974	5.4939 5.0364	1005.8528 1005.8528	986.4236 986.4461	101.2186 101.2108
15	PO PA	96.7636 94.6534	-11.3716 -11.3248	-0.3451 2.4705	1005.4594 1005.4565	987.0477 987.0252	101.0509 101.0556
16	PO PA	71.5402 73.5818	16.1860 16.2009	5.4939 6.1831	1005.8528 1005.8445	987.1349 987.1077	101.2186 101.2218

Quadro 16 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (sétima sequência)

Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
Número de iterações final : 3							
Sequência de processamento : 8							
Sigma a posteriori : 0.002721							
15	PO PA	94.6534 94.6534	-11.3248 -11.3248	2.4705 2.4705	1005.4565 1005.4565	987.0252 987.0252	101.0556 101.0556
16	PO PA	73.5818 72.3746	16.2009 15.7864	6.1831 5.8785	1005.8445 1005.8445	987.1077 987.1245	101.2218 101.2124
17	PO PA	94.6534 94.3116	-11.3248 -9.0691	2.4705 2.9895	1005.4565 1005.5503	987.6814 987.7346	101.0556 101.0678
18	PO PA	73.5818 74.8252	16.2009 16.1149	6.1831 6.4631	1005.8445 1005.9328	987.7887 987.8549	101.2218 101.2251

Quadro 17 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (oitava sequência)

Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
Número de iterações final : 3							
Sequência de processamento : 9							
Sigma a posteriori : 0.001676							
17	PO PA	94.3116 94.3116	-9.0691 -9.0691	2.9895 2.9895	1005.5503 1005.5503	987.7346 987.7346	101.0678 101.0678
18	PO PA	74.8252 72.4751	16.1149 15.4190	6.4631 6.1565	1005.9328 1005.9328	987.8549 987.8903	101.2251 101.1893
19	PO PA	94.3116 94.8433	-9.0691 -7.5276	2.9895 4.9463	1005.5503 1005.5642	988.4530 988.5194	101.0678 101.0917
20	PO PA	74.8252 74.9569	16.1149 12.9130	6.4631 6.6609	1005.9328 1005.9594	988.5761 988.5975	101.2251 101.2430

Quadro 18 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (nona sequência)

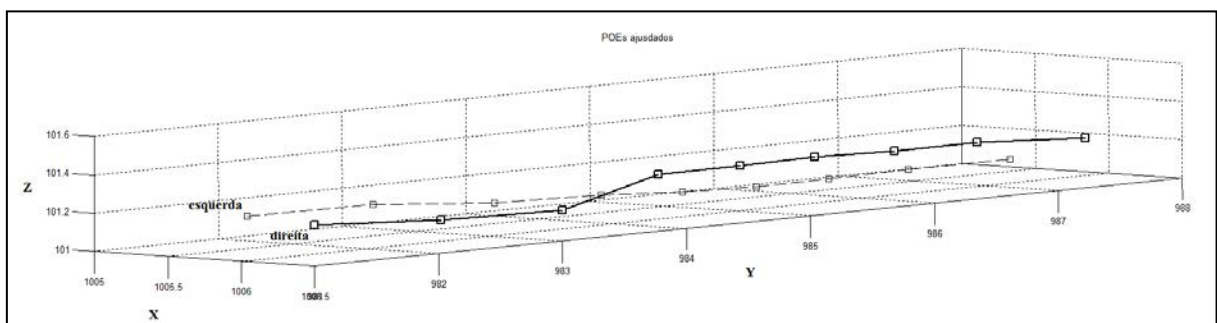


Figura 70 - POEs ajustados com recálculo da matriz peso das observações (Xcp, Ycp e Zcp) - A

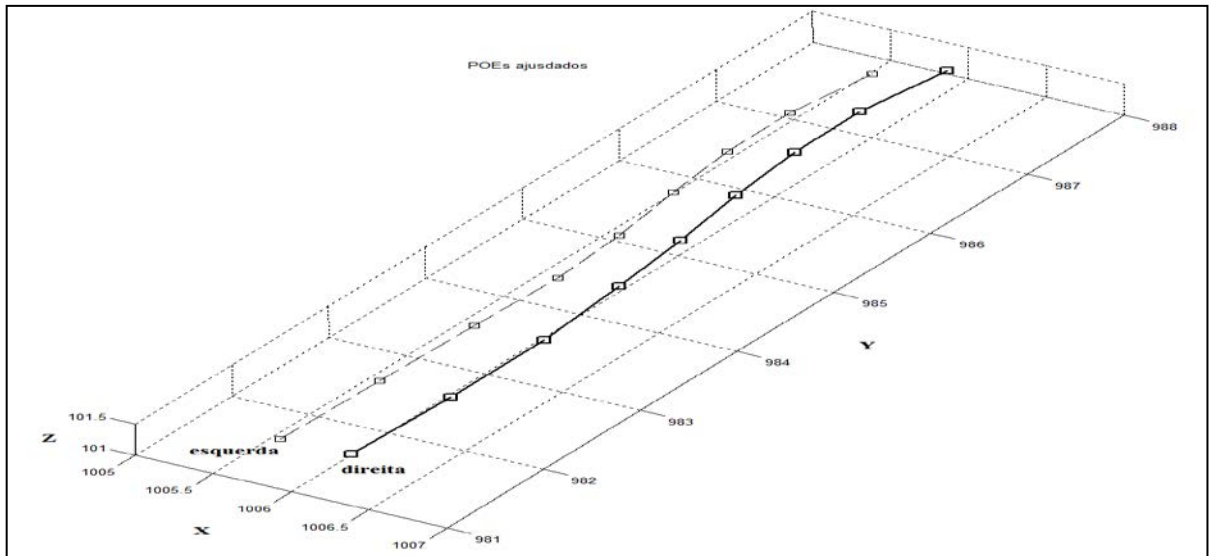


Figura 71 - POEs ajustados com recálculo da matriz peso das observações (X_{cp} , Y_{cp} e Z_{cp}) - B

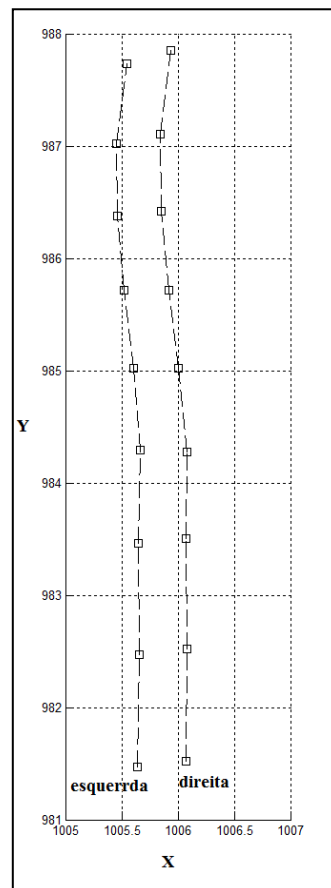


Figura 72 - POEs ajustados com recálculo da matriz peso das observações (X_{cp} , Y_{cp})

Com base nos resultados numéricos e a verificação nos gráficos dos CPs plotados podemos verificar uma melhora significativa quando comparado com o processo sem o recálculo da matriz peso das observações. Porém, com a injeção de base e a atribuição de

pesos pequenos nas observações com variância maiores do que o tamanho do pixel os erros tendem a ser distribuídos para outros parâmetros. Por isso, os ângulos continuam sendo influenciados por esses erros, como pode ser visto nos dados obtidos ao longo da fototriangulação nas seqüências analisadas. Essa redistribuição dos erros ocasionada pelo ajustamento mudou além dos valores angulares, também o sinal. Ver os quadros **Quadro 10** ao **Quadro 18**.

7.3.3 Resultado da fototriangulação com reprocessamento da matriz peso (distância euclidiana)

O procedimento adotado aqui foi semelhante ao da seção anterior (7.3.2). O que diferenciou foi a atribuição dos pesos para as observações a partir do cálculo da distância euclidiana, segundo a equação

(50). O número de reprocessamento da matriz peso foi igual a experimento anterior, isto é, de apenas uma vez.

Entretanto, há possibilidade de reprocessar várias vezes a matriz peso até que o ajustamento se estabilize. Mas, com finalidade de comparar os resultados manteve-se o mesmo procedimento.

Número de iterações final		: 5					
Seqüência de processamento		: 1					
Sigma a posteriori		: 0.013459					
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
1	PO	92.2561	5.2397	-4.0543	1005.6418	981.4716	101.1856
	PA	92.2562	5.2397	-4.0543	1005.6418	981.4716	101.1856
2	PO	91.8846	5.0261	-4.1671	1006.0690	981.5234	101.1501
	PA	92.8479	4.7162	-4.1098	1006.0690	981.5124	101.1581
3	PO	92.2561	5.2397	-4.0543	1005.6418	982.4716	101.1856
	PA	30.9623	-3.7902	5.0744	1005.6430	982.4686	101.1366
4	PO	91.8846	5.0261	-4.1671	1006.0690	982.5234	101.1501
	PA	92.0560	4.8803	-4.1351	1006.0699	982.5235	101.1502

Quadro 19 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (primeira seqüência – distância euclidiana)

Número de iterações final : 3							
Sequência de processamento : 2							
Sigma a posteriori : 0.017594							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
3	PO	30.9623	-3.7902	5.0744	1005.6430	982.4686	101.1366
	PA	30.9644	-3.7890	5.0810	1005.6482	982.4687	101.1365
4	PO	92.0560	4.8803	-4.1351	1006.0699	982.5235	101.1502
	PA	67.3874	4.8887	-21.1020	1006.0646	982.5235	101.2471
5	PO	30.9623	-3.7902	5.0744	1005.6430	983.4684	101.1366
	PA	14.2754	-7.4364	2.1288	1005.6940	983.5354	101.4208
6	PO	92.0560	4.8803	-4.1351	1006.0699	983.5346	101.1502
	PA	92.3227	11.5769	-4.0554	1006.0707	983.4968	101.1948

Quadro 20 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (segunda sequência – distância euclidiana)

Número de iterações final : 3							
Sequência de processamento : 3							
Sigma a posteriori : 0.005525							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
5	PO	14.2754	-7.4364	2.1288	1005.6940	983.5354	101.4208
	PA	14.2757	-7.4359	2.1283	1005.6940	983.5355	101.4207
6	PO	92.3227	11.5769	-4.0554	1006.0707	983.4968	101.1948
	PA	92.2392	8.6986	-5.2696	1006.0707	983.6300	101.2295
7	PO	14.2754	-7.4364	2.1288	1005.6940	984.5515	101.4208
	PA	12.6317	-7.2185	-0.0547	1005.7496	984.5251	101.4064
8	PO	92.3227	11.5769	-4.0554	1006.0707	984.4975	101.1948
	PA	92.4011	20.5049	-3.8154	1006.1398	984.4625	101.2366

Quadro 21 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (terceira sequência – distância euclidiana)

Número de iterações final : 4							
Sequência de processamento : 4							
Sigma a posteriori : 0.059268							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
7	PO	12.6317	-7.2185	-0.0547	1005.7496	984.5251	101.4064
	PA	12.6318	-7.2175	-0.0552	1005.7496	984.5252	101.4063
8	PO	92.4011	20.5049	-3.8154	1006.1398	984.4625	101.2366
	PA	92.1052	16.6165	-5.9690	1006.1398	984.6589	101.2754
9	PO	12.6317	-7.2185	-0.0547	1005.7496	985.5312	101.4064
	PA	8.2133	-7.2553	-7.6300	1005.9398	985.3784	101.3918
10	PO	92.4011	20.5049	-3.8154	1006.1398	985.3537	101.2366
	PA	94.3598	46.6387	-4.4103	1006.3310	985.2303	101.2895

Quadro 22 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (quarta sequência – distância euclidiana)

Número de iterações final : 3							
Sequência de processamento : 5							
Sigma a posteriori : 0.004597							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
9	PO	8.2133	-7.2553	-7.6300	1005.9398	985.3784	101.3918
	PA	8.2132	-7.2548	-7.6300	1005.9398	985.3784	101.3918
10	PO	94.3598	46.6387	-4.4103	1006.3310	985.2303	101.2895
	PA	94.7969	44.9956	-4.1475	1006.3310	985.2315	101.2905
11	PO	8.2133	-7.2553	-7.6300	1005.9398	986.3100	101.3918
	PA	3.5338	-7.2702	-13.3634	1006.0532	986.2109	101.3785
12	PO	94.3598	46.6387	-4.4103	1006.3310	985.9002	101.2895
	PA	97.0751	54.0271	-5.8743	1006.3500	985.8633	101.3705

Quadro 23 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (quinta sequência – distância euclidiana)

Número de iterações final		: 3					
Sequência de processamento		: 6					
Sigma a posteriori		: 0.015753					
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
11	PO	3.5338	-7.2702	-13.3634	1006.0532	986.2109	101.3785
	PA	3.5335	-7.2683	-13.3666	1006.0532	986.2109	101.3785
12	PO	97.0751	54.0271	-5.8743	1006.3500	985.8633	101.3705
	PA	97.1887	55.0655	-5.9480	1006.3500	985.8996	101.3806
13	PO	3.5338	-7.2702	-13.3634	1006.0532	987.0093	101.3785
	PA	-1.5602	-8.4386	-26.0124	1006.2611	987.1048	101.3803
14	PO	97.0751	54.0271	-5.8743	1006.3500	986.5780	101.3705
	PA	104.0032	50.1441	-6.3687	1006.5096	986.7469	101.4109

Quadro 24 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (sexta sequência – distância euclidiana)

Número de iterações final		: 3					
Sequência de processamento		: 7					
Sigma a posteriori		: 0.561773					
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
13	PO	-1.5602	-8.4386	-26.0124	1006.2611	987.1048	101.3803
	PA	-1.5607	-8.4385	-26.0124	1006.2611	987.1048	101.3804
14	PO	104.0032	50.1441	-6.3687	1006.5096	986.7469	101.4109
	PA	104.5390	52.0894	-6.8286	1006.5096	986.7572	101.4299
15	PO	-1.5602	-8.4386	-26.0124	1006.2611	987.8750	101.3803
	PA	-2.6176	-8.8769	-49.0646	1006.4980	988.0549	101.4120
16	PO	104.0032	50.1441	-6.3687	1006.5096	987.5191	101.4109
	PA	107.4099	50.1344	0.2149	1006.6476	987.6204	101.3000

Quadro 25 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (sétima sequência – distância euclidiana)

Número de iterações final		: 3					
Sequência de processamento		: 8					
Sigma a posteriori		: 3.297788					
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
15	PO	-2.6176	-8.8769	-49.0646	1006.4980	988.0549	101.4120
	PA	-2.6177	-8.8674	-49.0700	1006.4980	988.0549	101.4120
16	PO	107.4099	50.1344	0.2149	1006.6476	987.6204	101.3000
	PA	108.5147	51.7467	-0.5906	1006.6476	987.6540	101.3696
17	PO	-2.6176	-8.8769	-49.0646	1006.4980	988.8504	101.4120
	PA	-2.4114	-8.7427	-41.6831	1006.5348	988.8050	101.3862
18	PO	107.4099	50.1344	0.2149	1006.6476	988.4475	101.3000
	PA	110.5293	46.9243	-4.4402	1007.0535	988.6891	101.4225

Quadro 26 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (oitava sequência – distância euclidiana)

Número de iterações final		: 3					
Sequência de processamento		: 9					
Sigma a posteriori		: 0.029254					
Comparação dos Parâmetros Ajustados e Iniciais do POE							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
17	PO	-2.4114	-8.7427	-41.6831	1006.5348	988.8050	101.3862
	PA	-2.4093	-8.7443	-41.6845	1006.5351	988.8050	101.3864
18	PO	110.5293	46.9243	-4.4402	1007.0535	988.6891	101.4225
	PA	104.3729	15.0634	-22.1201	1007.0532	988.7972	101.4191
19	PO	-2.4114	-8.7427	-41.6831	1006.5348	989.5579	101.3862
	PA	-2.6005	-9.9757	-42.0526	1006.6095	989.4656	101.3601
20	PO	110.5293	46.9243	-4.4402	1007.0535	989.5211	101.4225
	PA	113.0853	47.0156	-2.6992	1007.0389	989.3920	101.3185

Quadro 27 - Resumo dos resultados da fototriangulação com recálculo da matriz peso das observações (nona sequência – distância euclidiana)

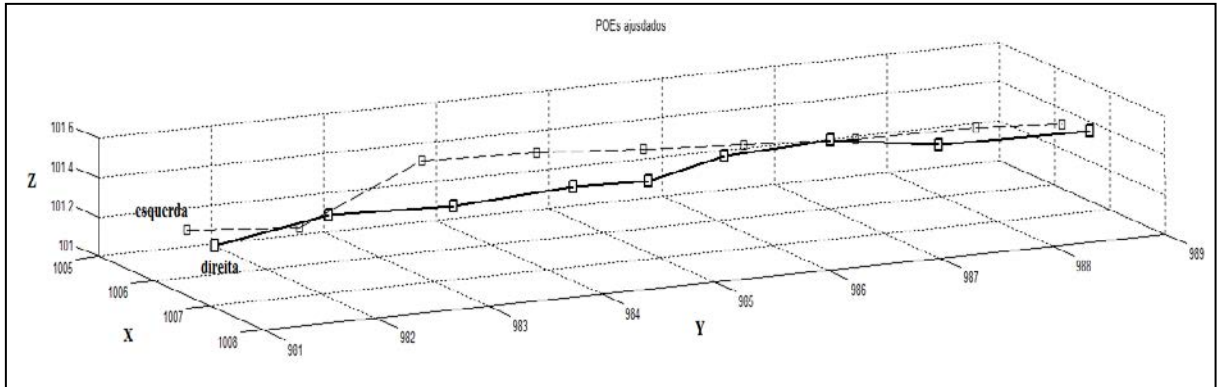


Figura 73 - POEs ajustados com recálculo da matriz peso das observações pela distância euclidiana (X_{cp} , Y_{cp} e Z_{cp}) – A

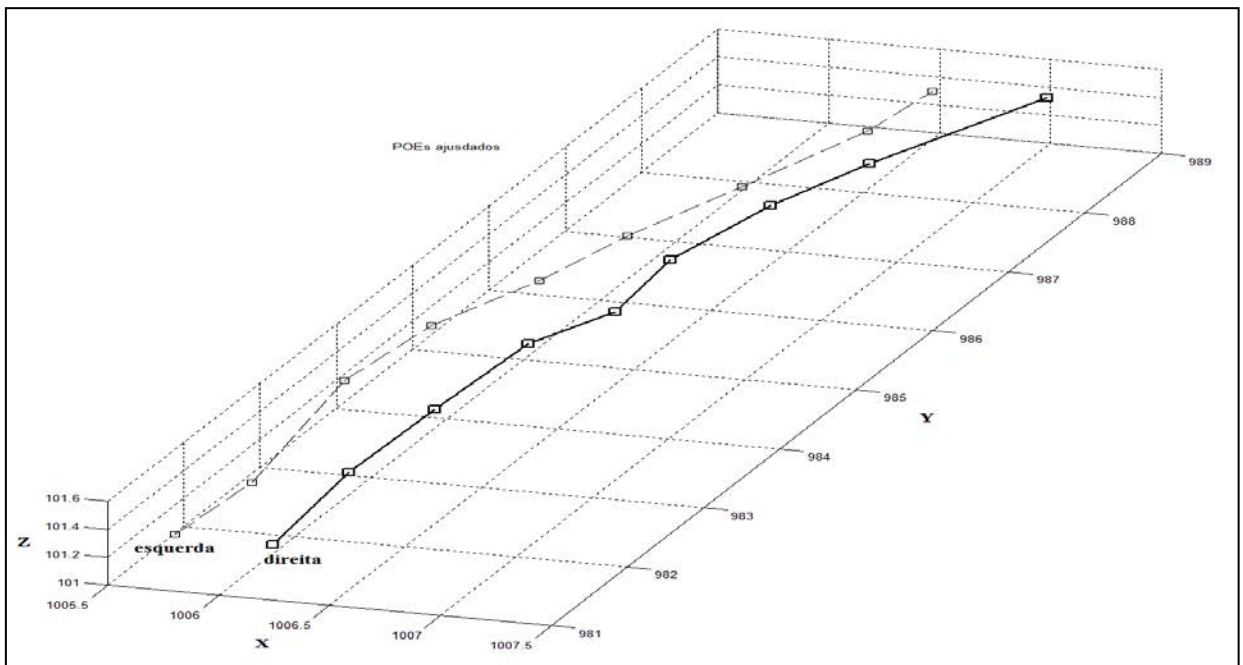


Figura 74 - POEs ajustados com recálculo da matriz peso das observações pela distância euclidiana (X_{cp} , Y_{cp} e Z_{cp}) – B

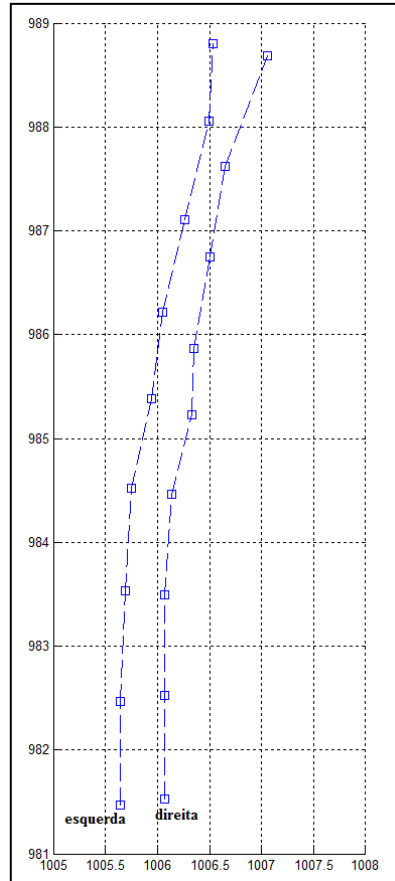


Figura 75 - POEs ajustados com recálculo da matriz peso das observações pela distância euclidiana (X_{cp} , Y_{cp})

A Figura 75 mostra graficamente que já na primeira seqüência os ângulos que fazem parte dos parâmetros de orientação exterior começaram a deteriorar em consequência da injunção de base inserida desde o início da fototriangulação. Porém, as posições do CP mantiveram-se relativamente estável até a quarta seqüência e depois começaram a divergir. Já a Figura 73 exhibe um gráfico no qual é possível verificar que a coordenada Z_{cp} também sofreu forte influência em relação a X_{cp} e Y_{cp} , entretanto não tanto quanto os ângulos.

7.3.4 Resultado da fototriangulação com atribuição de pesos iguais para as observações

A fototriangulação executada neste experimento assumiu pesos iguais para todas as observações. Os valores foram adotados com a seguinte grandeza (0.0001). O objetivo desse valor é para que as observações não tenham muito influência no processo de ajustamento. Não houve reprocessamento da matriz.

Da mesma forma que os outros experimentos, os quadros 28 a 36 mostram os resultados numéricos dos POEs ajustados de cada sequência referente ao levantamento.

Número de iterações final : 3 Sequência de processamento : 1 Sigma a posteriori : 0.001230							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi (Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
1	PO	92.2561	5.2397	-4.0543	1005.6418	981.4716	101.1856
	PA	92.2568	5.2394	-4.0543	1005.6418	981.4716	101.1856
2	PO	91.8846	5.0261	-4.1671	1006.0690	981.5234	101.1501
	PA	96.8945	3.4836	-3.7664	1006.0690	981.5135	101.1598
3	PO	92.2561	5.2397	-4.0543	1005.6418	982.4716	101.1856
	PA	92.9860	4.1674	-3.8114	1005.6434	982.4719	101.1860
4	PO	91.8846	5.0261	-4.1671	1006.0690	982.5234	101.1501
	PA	92.7710	4.3096	-3.9134	1006.0689	982.5235	101.1508

Quadro 28 - Resumo dos resultados da fototriangulação sem recálculo da matriz peso das observações (primeira sequência – pesos iguais)

Número de iterações final : 3 Sequência de processamento : 2 Sigma a posteriori : 0.000599							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi (Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
3	PO	92.9860	4.1674	-3.8114	1005.6434	982.4719	101.1860
	PA	92.9859	4.1671	-3.8114	1005.6434	982.4719	101.1860
4	PO	92.7710	4.3096	-3.9134	1006.0689	982.5235	101.1508
	PA	92.1606	2.2690	-4.2197	1006.0689	982.5230	101.1501
5	PO	92.9860	4.1674	-3.8114	1005.6434	983.4722	101.1860
	PA	93.4312	3.8575	-4.2017	1005.6441	983.4725	101.1855
6	PO	92.7710	4.3096	-3.9134	1006.0689	983.5331	101.1508
	PA	93.6440	4.3794	-4.3373	1006.0684	983.5332	101.1508

Quadro 29 - Resumo dos resultados da fototriangulação sem recálculo da matriz peso das observações (segunda sequência – pesos iguais)

Número de iterações final : 3 Sequência de processamento : 3 Sigma a posteriori : 0.001486							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi (Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
5	PO	93.4312	3.8575	-4.2017	1005.6441	983.4725	101.1855
	PA	93.4315	3.8574	-4.2017	1005.6441	983.4725	101.1855
6	PO	93.6440	4.3794	-4.3373	1006.0684	983.5332	101.1508
	PA	97.3120	3.7817	-4.2464	1006.0684	983.5351	101.1542
7	PO	93.4312	3.8575	-4.2017	1005.6441	984.4731	101.1855
	PA	94.0369	1.3519	-4.3252	1005.6481	984.4742	101.1863
8	PO	93.6440	4.3794	-4.3373	1006.0684	984.5432	101.1508
	PA	95.2242	1.9522	-4.2724	1006.0710	984.5443	101.1529

Quadro 30 - Resumo dos resultados da fototriangulação sem recálculo da matriz peso das observações (terceira sequência – pesos iguais)

Número de iterações final : 3 Sequência de processamento : 4 Sigma a posteriori : 0.003762							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
7	PO	94.0369	1.3519	-4.3252	1005.6481	984.4742	101.1863
	PA	94.0375	1.3518	-4.3253	1005.6481	984.4742	101.1863
8	PO	95.2242	1.9522	-4.2724	1006.0710	984.5443	101.1529
	PA	102.9526	-0.0854	-4.0001	1006.0710	984.5492	101.1650
9	PO	94.0369	1.3519	-4.3252	1005.6481	985.4754	101.1863
	PA	103.9223	0.1832	-4.5339	1005.6524	985.4764	101.2055
10	PO	95.2242	1.9522	-4.2724	1006.0710	985.5540	101.1529
	PA	107.7978	-0.9231	-3.5228	1006.0743	985.5548	101.1781

Quadro 31 - Resumo dos resultados da fototriangulação sem recálculo da matriz peso das observações (quarta sequência – pesos iguais)

Número de iterações final : 3 Sequência de processamento : 5 Sigma a posteriori : 0.020575							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
9	PO	103.9223	0.1832	-4.5339	1005.6524	985.4764	101.2055
	PA	103.9228	0.1829	-4.5335	1005.6521	985.4764	101.2055
10	PO	107.7978	-0.9231	-3.5228	1006.0743	985.5548	101.1781
	PA	112.5023	2.5838	-1.7840	1006.0746	985.5144	101.1243
11	PO	103.9223	0.1832	-4.5339	1005.6524	986.4783	101.2055
	PA	116.0897	-15.9014	2.7562	1005.5938	986.4265	101.0238
12	PO	107.7978	-0.9231	-3.5228	1006.0743	986.5626	101.1781
	PA	124.4766	7.3118	-11.0318	1006.0337	986.4459	100.9915

Quadro 32 - Resumo dos resultados da fototriangulação sem recálculo da matriz peso das observações (quinta sequência – pesos iguais)

Número de iterações final : 3 Sequência de processamento : 6 Sigma a posteriori : 0.046269							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
11	PO	116.0897	-15.9014	2.7562	1005.5938	986.4265	101.0238
	PA	116.0932	-15.9015	2.7564	1005.5940	986.4265	101.0240
12	PO	124.4766	7.3118	-11.0318	1006.0337	986.4459	100.9915
	PA	156.5901	-1.7092	-2.8809	1006.0336	986.2107	101.2056
13	PO	116.0897	-15.9014	2.7562	1005.5938	987.3510	101.0238
	PA	118.7409	-7.4204	-12.3789	1005.5582	987.4517	100.9591
14	PO	124.4766	7.3118	-11.0318	1006.0337	987.4159	100.9915
	PA	121.4563	-6.0503	10.0882	1006.0138	987.3060	101.1148

Quadro 33 - Resumo dos resultados da fototriangulação sem recálculo da matriz peso das observações (sexta sequência – pesos iguais)

Número de iterações final : 3 Sequência de processamento : 7 Sigma a posteriori : 0.075319							
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
13	PO	118.7409	-7.4204	-12.3789	1005.5582	987.4517	100.9591
	PA	118.7453	-7.4213	-12.3786	1005.5585	987.4518	100.9592
14	PO	121.4563	-6.0503	10.0882	1006.0138	987.3060	101.1148
	PA	165.1413	5.2246	14.6916	1006.0135	987.2722	101.0228
15	PO	118.7409	-7.4204	-12.3789	1005.5582	988.4426	100.9591
	PA	159.6090	-8.7797	1.1702	1005.3485	988.5175	101.0611
16	PO	121.4563	-6.0503	10.0882	1006.0138	988.2534	101.1148
	PA	164.5246	5.4962	15.1512	1005.7404	988.2987	101.0648

Quadro 34 - Resumo dos resultados da fototriangulação sem recálculo da matriz peso das observações (sétima sequência – pesos iguais)

Número de iterações final		: 3					
Sequência de processamento		: 8					
Sigma a posteriori		: 0.107035					
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
15	PO	159.6090	-8.7797	1.1702	1005.3485	988.5175	101.0611
	PA	159.6152	-8.7790	1.1706	1005.3487	988.5174	101.0613
16	PO	164.5246	5.4962	15.1512	1005.7404	988.2987	101.0648
	PA	202.8127	30.0035	22.9684	1005.7402	988.2600	101.1288
17	PO	159.6090	-8.7797	1.1702	1005.3485	989.5311	101.0611
	PA	155.8720	-11.5393	2.7544	1005.4081	989.4887	101.2622
18	PO	164.5246	5.4962	15.1512	1005.7404	989.1158	101.0648
	PA	175.2445	14.2823	15.9536	1005.5359	989.0672	101.2758

Quadro 35 - Resumo dos resultados da fototriangulação sem recálculo da matriz peso das observações (oitava sequência – pesos iguais)

Número de iterações final		: 3					
Sequência de processamento		: 9					
Sigma a posteriori		: 0.028165					
Foto	Nota	Omega(Graus)	Phi(Graus)	Kapa(Graus)	Xcp(m)	Ycp(m)	Zcp(m)
17	PO	155.8720	-11.5393	2.7544	1005.4081	989.4887	101.2622
	PA	155.8784	-11.5382	2.7561	1005.4080	989.4886	101.2618
18	PO	175.2445	14.2823	15.9536	1005.5359	989.0672	101.2758
	PA	174.1991	12.5147	10.5034	1005.5359	989.0730	101.3561
19	PO	155.8720	-11.5393	2.7544	1005.4081	990.4540	101.2622
	PA	170.2560	-13.1252	6.0654	1005.4675	990.3462	101.1375
20	PO	175.2445	14.2823	15.9536	1005.5359	989.8324	101.2758
	PA	172.8439	9.7304	8.6729	1005.6221	989.9539	101.2463

Quadro 36 - Resumo dos resultados da fototriangulação sem recálculo da matriz peso das observações (nona sequência – pesos iguais)

Mesmo com pesos iguais, porém, sem o reproprocessamento da matriz peso os ângulos ainda continuam sendo influenciados pelos erros e assumindo valores grandes a partir da quarta sequência.

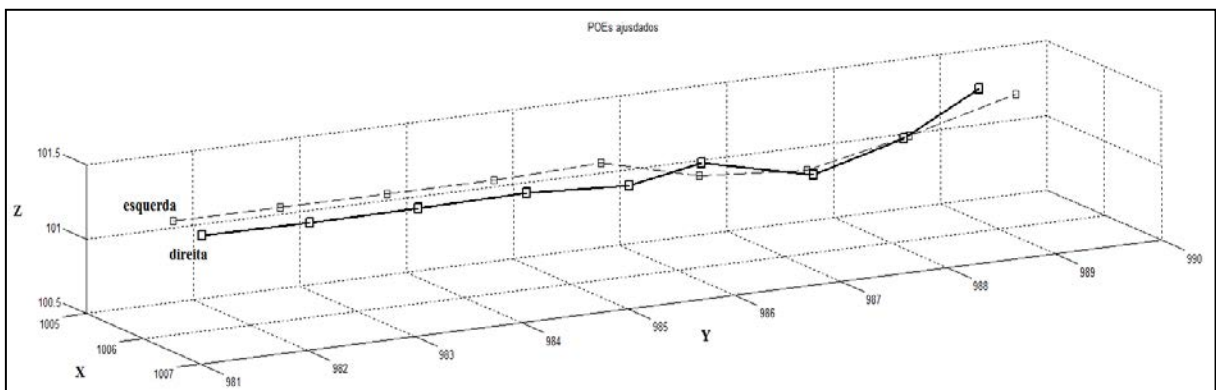


Figura 76 - POEs ajustados com recálculo da matriz peso das observações por pesos iguais (Xcp, Ycp e Zcp)

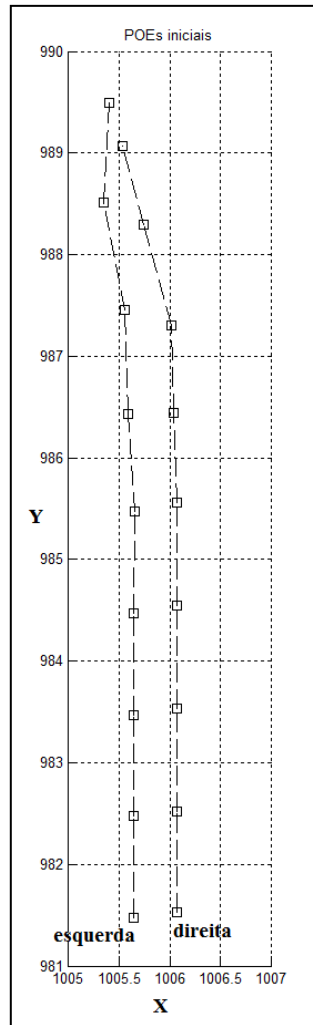


Figura 77 - POEs ajustados com recálculo da matriz peso das observações por pesos iguais (X_{cp} , Y_{cp})

A **Figura 76** e a **Figura 77** exibem os POEs plotados em três e duas dimensões. É possível verificar que os valores dos parâmetros de orientação exterior a partir da sexta seqüência começaram a divergir comprometendo de forma significativa as posições futuras dos centros perspectivos no caminamento. No gráfico da **Figura 78** é possível verificar a relação de cada sigma a posteriori calculado após o processamento das seqüências, constatando um acréscimo ao seu valor a cada seqüência devido ao aumento dos resíduos.

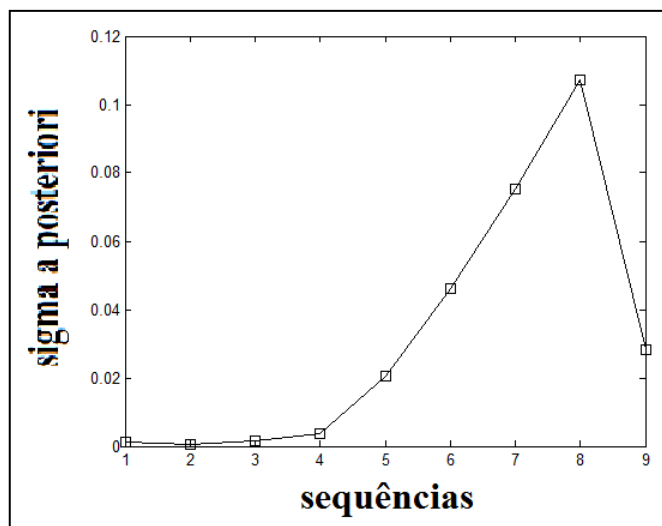


Figura 78 - Gráfico da evolução do sigma a posteriori em cada sequência

Mesmo com o acúmulo de erro nos ângulos com conseqüências diretas na orientação do sistema, a atribuição de pesos iguais às observações promoveu resultados mais interessantes em relação aos outros experimentos quando levando em consideração apenas as posições do CPs.

8 CONCLUSÕES

Nesta dissertação foi apresentada uma metodologia para posicionar e orientar de forma semiautomática pares de imagens obtidas a partir de duas câmaras estereoscópicas pertencentes a um sistema de mapeamento móvel terrestre. Esse posicionamento e orientação deram-se exclusivamente por dados (fotocoordenadas) oriundos de imagens extraídos pela técnica de visão computacional SIFT e a fototriangulação, isto é, sem a utilização de sensores do tipo GPS e/ou inercial, com exceção do odômetro digital que fornece a distância entre as tomadas dos pares de imagens.

A pesquisa aqui desenvolvida visa contribuir com a automação de uma Unidade Móvel de Mapeamento Digital que é um dos objetos de estudo do laboratório de mapeamento móvel da Unesp – Presidente Prudente. Essa contribuição está relacionada em agregar ao sistema uma outra forma de orientar e posicionar quando os sensores do tipo inercial (INS) e/ou o de posicionamento (GPS) são submetidos a condições que interferem no seu funcionamento ou na recepção do sinal afetando significativamente o caminhamento fotogramétrico do levantamento por algum intervalo de tempo.

Para estimar os parâmetros de orientação exterior de cada par de imagem pertencentes a um levantamento fotogramétrico a partir de fotocoordenadas lançou mão de técnicas de visão computacional e fotogrametria.

Apesar de existirem diversos algoritmos computacionais que podem realizar esse procedimento foi escolhido aqui o SIFT pelo fato do mesmo ter resultados interessantes quando existe uma diferença de escala entre as imagens analisadas. Essa situação foi confirmada quando se aplicou o SIFT nas imagens do primeiro e do segundo par (imagens avante). A quantidade de pontos-chave (fotocoordenadas) extraída e correspondida neste caso era maior do que quando aplicada nas imagens do próprio par (imagens laterais). Entretanto, mesmo com número menor de correspondência entre as imagens laterais a técnica mostrou bem satisfatória quando foi verificada a correspondência entre as quatro imagens pertencente a sequência analisada a cada passo.

A quantidade de pontos-chave correspondido nas quatro imagens está diretamente ligada à dimensão da imagem e o limiar (*threshold*) previamente estabelecido. Em diversos experimentos foi constatado que a dimensão original com um limiar de 0.6 (recomendado por David Lowe) resulta num grande número de pontos-chave e correspondência nos dois pares de imagens. Entretanto, o tempo computacional foi grande (por volta de 10 minutos) quando comparado com outras combinações de dimensão menores com o mesmo limiar.

Por isso, a maioria dos experimentos desenvolvido neste trabalho levou em consideração um percentual de redução da imagem de 70%, isto é, apenas 30% da imagem foi utilizada no processamento do SIFT e um limiar de 0.4 e/ou 0.6. Os resultados obtidos a partir dessa combinação levaram a conclusão que o processo de fototriangulação a partir dessa quantidade de pontos-chave (observações) não foi prejudicado já que o número foi suficiente para realizá-la.

A existência de inúmeras variáveis que compõem os experimentos torna inviável realizá-los com todas as combinações, por isso, de forma empírica e com um planejamento dos experimentos utilizou-se de algumas combinações. Todos os experimentos levaram em consideração o percentual de redução de 70% com um limiar de 0.4, diferenciando apenas na atribuição de pesos para as observações por: paralaxe, distância euclidiana ou pesos iguais, e o reproprocessamento ou não da matriz peso.

Os experimentos realizados sem o reproprocessamento da matriz peso mostraram que os ângulos (ω , φ , κ) sofreram alterações significativas de valor e de sinal e, também, os valores das coordenadas X_{cp} , Y_{cp} e Z_{cp} divergiram já nas primeiras seqüências do levantamento, mesmo com inserção da injunção de base desde o início do processamento.

Para os experimentos realizados com reproprocessamento da matriz peso (uma única vez para cada seqüência) foram obtidos resultados melhores para o posicionamento, porém, ainda com alterações angulares dos seus respectivos valores e sinais.

O experimento com o melhor resultado foi o com pesos iguais e pequenos para as observações juntamente com o reproprocessamento da matriz peso até que o ajustamento se estabilizasse. Esse reproprocessamento é feito manualmente pelo operador do sistema desenvolvido em Matlab que é composto por uma interface gráfica que exhibe as variáveis envolvidas no processo, podendo combiná-las conforme o objetivo do levantamento.

A extração automática dos pontos nas imagens do levantamento fotogramétrico é de grande importância para a automatização de parte do processo. Neste trabalho constatou que é sim possível pelas técnicas atuais tal procedimento. O SIFT demonstrou eficácia na quantidade de pontos obtidos, porém, a qualidade dos mesmos não foi objeto de estudo deste trabalho. Porém, baseado em trabalhos que usam o SIFT em reconhecimento de objetos, extração de pontos homólogos em imagens digitais e outros, assumiu que o limiar de 0.4 ou 0.6 garante a qualidade dos pontos correspondidos nas imagens analisadas.

A proposta inicial deste trabalho era a construção de uma metodologia totalmente automática de extração de pontos em imagens digitais e a fototriangulação com ajustamento das observações. Porém, no decorrer do projeto verificou-se que haveria necessidade de em

algum momento ter a intervenção humana para tomada de decisão. Isso concretizou principalmente na fase da fototriangulação com ajustamento, onde o usuário decidia através dos dados (valores angulares, posição e sigma a posteriori) obtidos pelo processamento da fototriangulação se iria ou não reprocessar, e quantas vezes, a matriz peso. O operador poderia para esse reprocessamento escolher entre modificar apenas a maior ou todas as observações cujos resíduos sejam maiores do que ϕ , 2σ ou 3σ , onde o σ adotou -se como o tamanho do pixel.

Em todos os experimentos notou-se que os resultados após o ajustamento das observações as coordenadas X_{cp} , Y_{cp} e Z_{cp} sofreram menos distorções do que os valores angulares (ω , ϕ , K). Isso ocorreu pelo fato do uso da injunção de base que forçou a geometria da triangulação. Porém, esses erros foram absorvidos em parte pelos ângulos, resultando em uma degradação maior ao longo do caminhamento desses três parâmetros angulares.

Algumas alternativas podem ser propostas para trabalhos futuros, testar injunções angulares para verificar o comportamento ao longo de todas as seqüências analisadas. Entretanto, mesmo com essa degradação angular a estimação das coordenadas (X_{cp} , Y_{cp} e Z_{cp}) dos CPs não foram afetadas tão significativamente quanto aos ângulos.

Por isso, sugiro para trabalhos futuros a automatização completo de todo o processo, incluindo análises estatísticas para tomadas de decisão também automática até que se atinja um critério estipulado no início do processo e não no meio dele. Para essas análises alguns testes estatísticos do tipo qui-quadrado e/ou Tau poderiam ser um recurso interessante.

Outro trabalho futuro é o estudo de técnicas para atribuir pesos para as fotocoordenadas (observações). Pois, verificou-se neste trabalho que a paralaxe e a distância euclidiana só foram satisfatórias quando a matriz pesos era reprocessada. Acredita-se então por esse fato que as observações poderiam conter erros.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. SBEE. Curitiba. 258p. 1998.
- ABDEL-AZIZ, KARARA H.M. **Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates**. American Society of Photogrammetry Symposium on Close-Range Photogrammetry, Falls Church, Virginia, U.S.A., pp. 1-18. 1971.
- BADOLATO, I. **Trabalho de introdução ao processamento de imagens**. 2011. 9f. Trabalho de conclusão de disciplina de Introdução ao Processamento de Imagens (Graduação em Engenharia de Sistemas e Computação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. RJ. Disponível em <<http://www.lcg.ufrj.br/Cursos/Members/badolato/IPI/relatorio>>. Acesso em: 10 dez. 2012.
- BARBOSA, R. L. **Caminhamento fotogramétrico utilizando o fluxo óptico filtrado**. 2006. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, São Paulo. 2006.
- BROWN, M; LOWE, D.G. **Invariant features from interest point groups**. In British Machine Vision Conference. Cardiff Wales. 656-665p. 2002.
- GALO, M. **Automação dos processos de correspondência e orientação relativa em visão estéreo**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – FEEC – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba. UTFPR. 1994.
- GREWAL, M.S. WEILL, L. R. e ANDREWS, A. P. **Global positioning systems, inertial navigation, and integration**. 2. ed. Hoboken, N.J. Wiley-Interscience. John Wiley. 2007.
- GONZÁLES, G. L. G. **Aplicação da Técnica SIFT para Determinação de Campos de Deformações de Materiais usando Visão Computacional**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- GONZALEZ, R. C. e WOODS, R. E. **Digital image processing**. 3 ed. Pearson Prentice Hall. 2008.
- KRAUS, K. **Photogrammetry: fundamental and standard processes**. Bonn. Dümmler. 1993. 397p. v.1.
- LOWE, D.G. **Distinctive image features from scale-invariant keypoints**. University of British Columbia. Computer Science Department. Vancouver. Canada. 2004. Disponível em <<http://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/ijcv04.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2012.
- LI, R. S e SCLAROFF. S. **Multi-scale 3D scene flow from binocular stereo sequences**. Boston Univ. Computer Science. Tech Report - 034. 2007.
- LUGNANI, J. B. **Introdução à Fototriangulação**. Curitiba: Ed. da UFPR, 1987, 134 p.

LUHMAN, T. ROBSON, S. KYLE, S. HARLEY, I. **Close Range Photogrammetry: Principles, Methods and Applications**, Wiley. New Jersey. 2006.

MIKHAIL, E. BETHEL. J. and MCGLONE. J. **Introduction to modern photogrammetry**. John Wiley & Sons. New York. 479p. 2001.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo. Editora Unesp. 2 ed. 2008.

MOFFITT, F. H. e MIKHAIL. E. M. **Photogrammetry**. Harper & Row Publishers. New York. 3 ed. 1980.

NUNES, L. C. S. CASTELLO, D. A. DOS SANTOS, P. A. M. and MATT, C. F. T. **Identification of material properties using full field and non contact measurements**. J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.. Rio de Janeiro. Jul/Set. 2009. n.3. v. 31.

OLIVEIRA, E.B. **Implementação do módulo de intersecção fotogramétrica em um banco de imagens georreferenciadas**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, São Paulo.

PITERI, M. A. RODRIGUES, J. C. (Organizadores). **Fundamentos de visão computacional**. Faculdade de Ciência e Tecnologia (UNESP). Presidente Prudente, SP . 2011.

RACHID, C. L. PEREIRA, A. A. S. **Algoritmos de busca SIFT e SURF no uso de dispositivos móveis**. II Encontro Multidisciplinar da Unipac Ubá (SEMULT). Minas Gerais. 2009.

RANDENIYA, D.I.B. GUNARATNE, M. SARKAR, S. NASEF, A. **Calibration of inertial and vision systems as a prelude to multisensory fusion**. Science Direct. Part C. p. 255-74. 2008.

SASDELLI, D. C. **Extração de pontos de interesse de imagens utilizando o algoritmo SIFT no ambiente android**. 2010. Monografia de projeto orientado em computação II (Departamento de Ciência da Computação) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. Minas Gerais.

SCHENK, T. **Digital Photogrammetry**.. Laurelville: TerraScience. 428p. 1999. v. 1.

SILVA, J.F.C. CAMARGO, P.O. GUARDIA, M.C. REISS, M.L.L. SILVA, R.A.C. GALLIS, R.B.A. OLIVEIRA, R.A. **Mapeamento de ruas com um sistema móvel de mapeamento digital**. Revista Brasileira de Cartografia. N. 53. p. 82-91. Dezembro. 2001.

SILVA, J.F.C. BARBOSA, R.L. JUNIOR, M.M. GALLIS, R. B. A. **Photogrammetric bridging using filtered monocular optical flow**. Proceedings. ISMMT2077. Padova. Itália. 2007.

SILVA, J.F.C. **Configuração e especificação de um Sistema de mapeamento móvel rápido e robusto**. SIMMOV/R2. Projeto de Pesquisa. Bolsa de estágio de pesquisa no exterior. FAPESP. São Paulo. 2011.

_____. **Notas de Aula de Fotogrametria Analítica**, Curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, UNESP/FCT, Presidente Prudente, 2001.

TAO, C. Chapman, M. A. Chaplin, B. A. **Automated processing of mobile mapping image sequences**. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 330–346p. 2001. v. 55.

VETH, M. J. **Navigation using images, a survey of techniques**. *Journal of the Institute of Navigation*. Vol. 58. N. 2. USA. 2011.

WOLF, P. R. **Elements of photogrammetry, with air photo interpretation and remote sensing**. New York: McGraw-Hill. 628p. 1983.

APÊNDICE A

Equações das derivadas parciais

Equações das derivadas parciais da matriz de rotação. Baseado no material do LUHMAN et. al. (2006), e referente à equação (11).

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$$

onde:

$$m_{11} = \cos(\varphi) * \cos(k)$$

$$m_{12} = -\cos(\varphi) * \text{sen}(k)$$

$$m_{13} = \text{sen}(\varphi)$$

$$m_{21} = \cos(\omega) * \text{sen}(k) + \text{sen}(\omega) * \text{sen}(\varphi) * \cos(k)$$

$$m_{22} = \cos(\omega) * \cos(k) - \text{sen}(\omega) * \text{sen}(\varphi) * \text{sen}(k)$$

$$m_{23} = -\text{sen}(\omega) * \cos(\varphi)$$

$$m_{31} = \text{sen}(\omega) * \text{sen}(k) - \cos(\omega) * \text{sen}(\varphi) * \cos(k)$$

$$m_{32} = \text{sen}(\omega) * \cos(k) + \cos(\omega) * \text{sen}(\varphi) * \text{sen}(k)$$

$$m_{33} = \cos(\omega) * \cos(\varphi)$$

$$r = (m_{11} * \Delta X) + (m_{21} * \Delta Y) + (m_{31} * \Delta Z)$$

$$s = (m_{12} * \Delta X) + (m_{22} * \Delta Y) + (m_{32} * \Delta Z)$$

$$q = (m_{13} * \Delta X) + (m_{23} * \Delta Y) + (m_{33} * \Delta Z)$$

As derivadas parciais das equações de colinearidade, equação (14), em relação aos parâmetros são:

Derivadas parciais da fotocoordenadas x:

$$\frac{\partial x}{\partial \omega} = \frac{f}{q} * \left(\frac{r}{q} * (m_{33} * \Delta Y - m_{23} * \Delta Z) - m_{31} * \Delta Y + m_{21} * \Delta Z \right)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \varphi} = \frac{f}{q} * \left(\frac{r}{q} * (s * \text{sen}(k) - r * \cos(k) - q * \cos(k)) \right)$$

$$\frac{\partial x}{\partial k} = \frac{f}{q} * s$$

$$\frac{\partial x}{\partial X_{cp}} = \frac{f}{q^2} * (m_{13} * r - m_{11} * q)$$

$$\frac{\partial x}{\partial Y_{cp}} = \frac{f}{q^2} * (m_{23} * r - m_{21} * q)$$

$$\frac{\partial x}{\partial Z_{cp}} = \frac{f}{q^2} * (m_{33} * r - m_{31} * q)$$

$$\frac{\partial x}{\partial X} = -\frac{f}{q^2} * (m_{13} * r - m_{11} * q)$$

$$\frac{\partial x}{\partial Y} = -\frac{f}{q^2} * (m_{23} * r - m_{21} * q)$$

$$\frac{\partial x}{\partial Z} = -\frac{f}{q^2} * (m_{33} * r - m_{31} * q)$$

$$\frac{\partial x}{\partial x_0} = 1 - (2 * K1 * (x - x_0)^2 + K1 * r^2)$$

$$\frac{\partial x}{\partial y_0} = -2 * K1 * (x - x_0) * (y - y_0)$$

$$\frac{\partial x}{\partial K1} = (x - x_0) * r^2$$

$$\frac{\partial x}{\partial f} = \frac{r}{q}$$

Derivadas parciais da fotocoordenadas y:

$$\frac{\partial y}{\partial \omega} = \frac{f}{q} * \left(\frac{s}{q} * (m_{33} * \Delta Y - m_{23} * \Delta Z) - m_{32} * \Delta Y + m_{22} * \Delta Z \right)$$

$$\frac{\partial y}{\partial \varphi} = \frac{f}{q} * \left(\frac{s}{q} * (r * \cos + s * \text{sen}(k) + q * \text{sen}(k)) \right)$$

$$\frac{\partial y}{\partial k} = \frac{f}{q} * r$$

$$\frac{\partial y}{\partial X_{cp}} = \frac{f}{q^2} * (m_{13} * s - m_{12} * q)$$

$$\frac{\partial y}{\partial Y_{cp}} = \frac{f}{q^2} * (m_{23} * s - m_{22} * q)$$

$$\frac{\partial y}{\partial Z_{cp}} = \frac{f}{q^2} * (m_{33} * s - m_{32} * q)$$

$$\frac{\partial y}{\partial X} = -\frac{f}{q^2} * (m_{13} * s - m_{12} * q)$$

$$\frac{\partial y}{\partial Y} = -\frac{f}{q^2} * (m_{23} * s - m_{22} * q)$$

$$\frac{\partial y}{\partial Z} = -\frac{f}{q^2} * (m_{33} * s - m_{31} * q)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_0} = -2 * KI * (x - x_0) * (y - y_0)$$

$$\frac{\partial y}{\partial y_0} = 1 - (2 * KI * (y - y_0)^2 + KI * r^2)$$

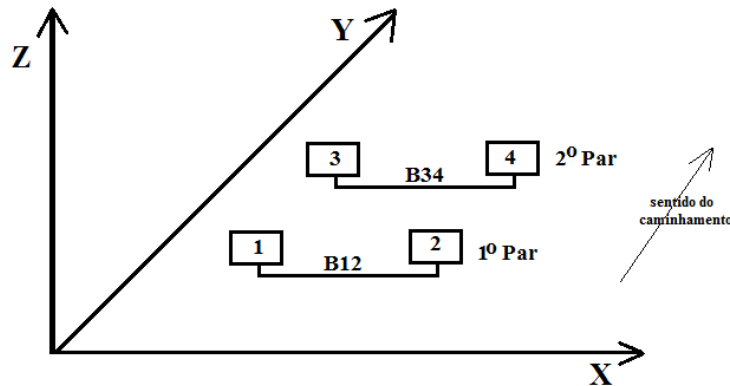
$$\frac{\partial y}{\partial KI} = (y - y_0) * r^2$$

$$\frac{\partial y}{\partial f} = \frac{s}{q}$$

APÊNDICE B

Injunção de distância da base

Derivadas das fotocoordenadas em relação à equação da distância da base.



A base é calculada pela seguinte expressão:

$$\text{Base (1 e 2)} = B12 = \sqrt{(X_{cp}^1 - X_{cp}^2)^2 + (Y_{cp}^1 - Y_{cp}^2)^2 + (Z_{cp}^1 - Z_{cp}^2)^2}$$

$$\text{Base (3 e 4)} = B34 = \sqrt{(X_{cp}^3 - X_{cp}^4)^2 + (Y_{cp}^3 - Y_{cp}^4)^2 + (Z_{cp}^3 - Z_{cp}^4)^2}$$

O sobre índice (*I*) das coordenadas ($X_{cp}^I, Y_{cp}^I, Z_{cp}^I$) indicam se é a câmara da esquerda ou da direita. Por convenção, os índices de número 1 e 3 são referentes à câmara da esquerda, e os de números 2 e 4 são da câmara da direita.

As derivadas parciais em relação aos parâmetros:

Para base B12

$$\frac{\partial B12}{\partial X_{cp}^1} = \frac{X_{cp}^1 - X_{cp}^2}{\sqrt{(X_{cp}^1 - X_{cp}^2)^2 + (Y_{cp}^1 - Y_{cp}^2)^2 + (Z_{cp}^1 - Z_{cp}^2)^2}}$$

$$\frac{\partial B12}{\partial X_{cp}^2} = -\frac{X_{cp}^1 - X_{cp}^2}{\sqrt{(X_{cp}^1 - X_{cp}^2)^2 + (Y_{cp}^1 - Y_{cp}^2)^2 + (Z_{cp}^1 - Z_{cp}^2)^2}}$$

$$\frac{\partial B12}{\partial Y_{cp}^1} = \frac{Y_{cp}^1 - Y_{cp}^2}{\sqrt{(X_{cp}^1 - X_{cp}^2)^2 + (Y_{cp}^1 - Y_{cp}^2)^2 + (Z_{cp}^1 - Z_{cp}^2)^2}}$$

$$\frac{\partial B_{12}}{\partial Y_{cp}^2} = - \frac{Y_{cp}^1 - Y_{cp}^2}{\sqrt{(X_{cp}^1 - X_{cp}^2)^2 + (Y_{cp}^1 - Y_{cp}^2)^2 + (Z_{cp}^1 - Z_{cp}^2)^2}}$$

$$\frac{\partial B_{12}}{\partial Z_{cp}^1} = \frac{Z_{cp}^1 - Z_{cp}^2}{\sqrt{(X_{cp}^1 - X_{cp}^2)^2 + (Y_{cp}^1 - Y_{cp}^2)^2 + (Z_{cp}^1 - Z_{cp}^2)^2}}$$

$$\frac{\partial B_{12}}{\partial Z_{cp}^2} = - \frac{Z_{cp}^1 - Z_{cp}^2}{\sqrt{(X_{cp}^1 - X_{cp}^2)^2 + (Y_{cp}^1 - Y_{cp}^2)^2 + (Z_{cp}^1 - Z_{cp}^2)^2}}$$

Para base B34

$$\frac{\partial B_{34}}{\partial X_{cp}^1} = \frac{X_{cp}^3 - X_{cp}^4}{\sqrt{(X_{cp}^3 - X_{cp}^4)^2 + (Y_{cp}^3 - Y_{cp}^4)^2 + (Z_{cp}^3 - Z_{cp}^4)^2}}$$

$$\frac{\partial B_{34}}{\partial X_{cp}^2} = - \frac{X_{cp}^3 - X_{cp}^4}{\sqrt{(X_{cp}^3 - X_{cp}^4)^2 + (Y_{cp}^3 - Y_{cp}^4)^2 + (Z_{cp}^3 - Z_{cp}^4)^2}}$$

$$\frac{\partial B_{34}}{\partial Y_{cp}^1} = \frac{Y_{cp}^3 - Y_{cp}^4}{\sqrt{(X_{cp}^3 - X_{cp}^4)^2 + (Y_{cp}^3 - Y_{cp}^4)^2 + (Z_{cp}^3 - Z_{cp}^4)^2}}$$

$$\frac{\partial B_{34}}{\partial Y_{cp}^2} = - \frac{Y_{cp}^3 - Y_{cp}^4}{\sqrt{(X_{cp}^3 - X_{cp}^4)^2 + (Y_{cp}^3 - Y_{cp}^4)^2 + (Z_{cp}^3 - Z_{cp}^4)^2}}$$

$$\frac{\partial B_{34}}{\partial Z_{cp}^1} = \frac{Z_{cp}^3 - Z_{cp}^4}{\sqrt{(X_{cp}^3 - X_{cp}^4)^2 + (Y_{cp}^3 - Y_{cp}^4)^2 + (Z_{cp}^3 - Z_{cp}^4)^2}}$$

$$\frac{\partial B_{34}}{\partial Z_{cp}^2} = - \frac{Z_{cp}^3 - Z_{cp}^4}{\sqrt{(X_{cp}^3 - X_{cp}^4)^2 + (Y_{cp}^3 - Y_{cp}^4)^2 + (Z_{cp}^3 - Z_{cp}^4)^2}}$$

APÊNDICE C

Tela do software

As principais configurações são:

- Percentual de redução da imagem
- Sequência de processamento
- Limiar do SIFT

O processo manual executado pelo usuário tem a seguinte sequência:

- 1º. Botão: Limpar variáveis
- 2º. Botão: Processar extração – SIFT
- 3º. Botão: Fototriangulação
- 4º. Botão: Reprocessar matriz MPFc (matriz peso das fotocoordenadas)

Os passos 3º e 4º são supervisionadas pelo operador. As informações que o mesmo tem na tela são: o sigma a posteriori e os valores dos POEs ajustados. A partir delas ele pode decidir continuar ou não a reprocessar a matriz peso e a fototriangulação até que o ajustamento se estabilize.

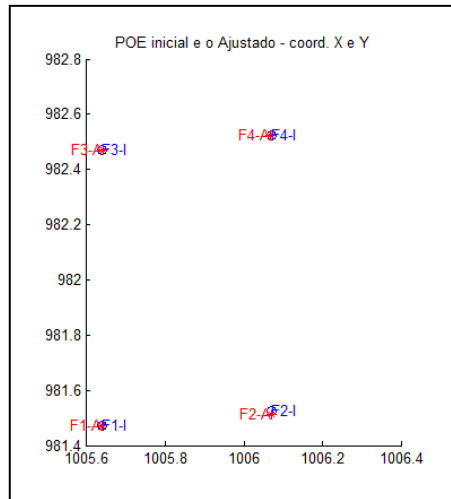


Figura 80 - POEs ajustados (2D)

Botão: **Visualizar Pontos/Área**

O operador pode visualizar o conjunto dos pontos-chave correspondidos nas quatro imagens e sua distribuição na cena. Informação importante para a verificação da geometria da fototriangulação.

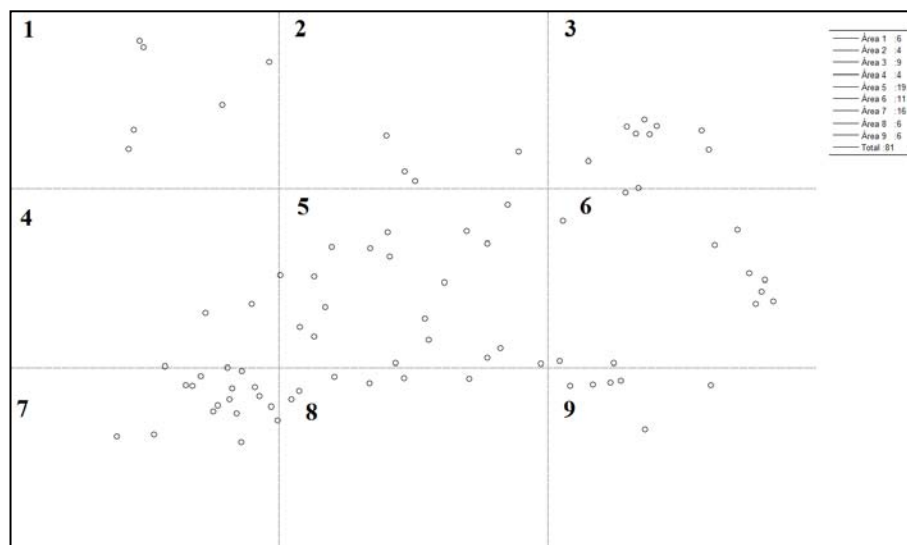


Figura 81 - Pontos-chave por área (região)