



Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil

**AJUSTAMENTO SIMULTÂNEO DO BLOCO DE FAIXAS DO LASER
SCANNER AEROTRANSPORTADO (ALS)**

TESE DE DOUTORADO

Florianópolis

2008

Universidade Federal de Santa Catarina

**Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil**

Plinio da Costa Temba

**AJUSTAMENTO SIMULTÂNEO DO BLOCO DE FAIXAS DO LASER
SCANNER AEROTRANSPORTADO (ALS)**

**Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Doutor em
Engenharia Civil**

Área de concentração: Cadastro Técnico Multifinalitário e Gestão Territorial

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Jürgen W. Philips

Florianópolis

2008

TEMBA, Plinio da Costa. ***Ajustamento simultâneo do bloco de faixas do laser scanner aerotransportado (als).***
Florianópolis, 2009. 231p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Jürgen W. Philips
Defesa: 12/2008

“AJUSTAMENTO SIMULTÂNEO DO BLOCO DE FAIXAS DO LASER SCANNER AEROTRANSPORTADO (ALS)”

PLINIO DA COSTA TEMBA

Tese julgada adequada para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Dr. Glicério Trichês - Coordenador do PPGEC

Prof. Dr.-Ing. Jürgen W. Philips - Orientador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr.-Ing. Jürgen W. Philips - ECV/UFSC - Moderador

Prof. Dr. Francisco de Oliveira - UDESC



Prof. Dr. Carlos Antonio Oliveira Vieira - UFV



Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno - UFPR

Prof. Dr. Jucilei Cordini - ECV/UFSC

Prof^a. Dr^a. Ruth Emília Nogueira - ECV/UFSC

Florianópolis, 18 de dezembro de 2008.

† SEBASTIANA MOREIRA

† EMILIA e MIGUEL DIAB

DEDICO

Agradecimentos

Ao Professor Jürgen Philips, orientador, pela confiança, incentivo, amizade e oportunidade em realizar esse trabalho.

À Eliane Temba e aos nossos filhos Phillipe e Naomi Temba, pela ajuda e motivação decisivas. À Aurinha a quem devo todo respeito, carinho, esforços e investimentos que uma vida não seria suficiente para saldá-los.

À Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A, e, em especial, ao Silas Salem Filho, Elisabete e ao Roberto pela paciência, dedicação e participação essenciais na discussão e processamento dos dados de varredura do sensor laser realizados em Curitiba/PR.

Ao Prof. Carlos Loch pela generosidade, compreensão e palavras de incentivo durante toda a jornada e, particularmente, ao suporte de equipamentos e pessoal disponibilizado no LabFSG sediado no prédio da Engenharia Civil na UFSC. Aos colegas da UNESP/FCT, Departamento de Cartografia; Prof. Antônio Maria Garcia Tommaselli, Prof. Júlio Kiyoshi Hasegawa e Prof. João Francisco Galera. Destino a mesma importância aos da UFPR, Departamento de Geomática; Prof. Edson Aparecido Mitishita pelas palavras de incentivo e sugestões criativas à pesquisa. . Aos Prof. Romualdo Wandressem, Prof. Luis Augusto Koenig Veiga e Prof. Pedro Faggion, Alex Soria Medina ao disponibilizar os recursos do Laboratório de Aferição e Instrumentação Geodésica (LAIG) aos interesses da conclusão da pesquisa. Não poderia deixar de citar o Prof. Quintino Dalmolin pelo competente e motivador parecer emitido sobre a proposta da tese.

Ao LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento) pela atenção e cessão de medições e disponibilidade de equipamentos imprescindíveis a conclusão do projeto de pesquisa sob a coordenação dos Srs. Maurício Müller e Marlo Martins.

Aos colegas da UFMG, minha casa no Instituto de Geociências, Departamento de Cartografia, especial atenção aos Prof. Britaldo Silveira Soares Filho, Prof. Philippe Maillard e Prof. Marcos Elmiro Timbó, nos momentos decisivos acreditaram e fizeram a diferença.

E, em especial, a todos os amigos, familiares, colegas de academia não citados, que direta ou indiretamente se envolveram e tornaram possível a concretização desse trabalho.

Sumário

Lista de Figuras.....	XIII
Lista de Quadros.....	XVII
Lista de Tabelas.....	XVIII
Lista de Siglas e Abreviaturas.....	XX
Resumo.....	XXI
Abstract.....	XXII

CAPÍTULO 01 - INTRODUÇÃO p.01

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	p.01
1.2 OBJETIVOS.....	p.02
1.2.1 Objetivo Geral.....	p.02
1.2.2 Objetivos Específicos.....	p.02
1.3 INEDITISMO DA PESQUISA SOBRE A TECNOLOGIA DO ALS.....	p.02
1.4 LIMITAÇÃO DA PESQUISA SOBRE A TECNOLOGIA ALS.....	p.03
1.5 JUSTIFICATIVAS.....	p.04
1.6 CONTRIBUIÇÃO À CIÊNCIA.....	p.12
1.7 RELEVÂNCIA DO PROBLEMA.....	p.12
1.8 HIPÓTESES.....	p.13
1.8.1 Hipótese Principal.....	p.13
1.8.2 Hipóteses Secundárias.....	p.13
1.9 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	p.14

CAPÍTULO 02 - REVISÃO DE LITERATURA

p.15

2.1 INTRODUÇÃO.....	p.15
2.2 PERFILAMENTO COM O ALS.....	p.21
2.3 LIDAR.....	p.24
2.4 O SISTEMA ALS – FUNCIONAMENTO E AMBIENTE.....	p.29
2.5 ERROS SISTEMÁTICOS DAS OBSERVAÇÕES – ALS.....	p.35
2.5.1 Erro devido ao deslocamento compreendido entre o objeto e o sensor (R)....	p.36
2.5.2 Erro devido a estabilidade do posicionamento do ALS no momento da medição.....	p.39
2.5.3 Erro devido a atitude do ALS.....	p.39
2.5.4 Erro devido ao registro do tempo.....	p.39
2.5.5 Influência de várias fontes de erros na precisão das coordenadas 3D.....	p.40
2.6 AJUSTAMENTO DE FAIXAS DE VÔO.....	p.41
2.6.1 Equação geral do laser.....	p.42
2.6.2 Análise sobre os métodos voltados para o ajustamento.....	p.46
2.6.2.1 Método de ajustamento de Kornus e Ruiz	p.46
2.6.2.2 Método de ajustamento de Maas	p.48
2.6.2.3 Método de ajustamento de Kager	p.50
2.6.2.4 Método de ajustamento de Burman.....	p.53
2.7 CALIBRAÇÃO DO ALS.....	p.56
2.7.1 Refração atmosférica.....	p.56
2.7.2 Atraso do relógio.....	p.57
RESUMO DO CAPÍTULO.....	p.60

CAPÍTULO 03 - MATERIAIS E MÉTODO PARA O AJUSTAMENTO SIMULTÂNEO DO BLOCO

p.61

3.1 MATERIAIS.....	p.61
3.1.1 Equipamentos.....	p.61
3.1.2 Dados para o processamento.....	p.62
3.1.3 Aplicativos usados.....	p.64
3.2 MÉTODO: INTRODUÇÃO.....	p.65
3.2.1 Projeto Água verde – seleção de faixas.....	p.68
3.2.1.1 Módulo TERRASCAN – Classify ground.....	p.68
3.2.1.2 Gradiente do relevo.....	p.69
3.2.2 Planejamento para o apoio de campo.....	p.70
3.2.2.1 Espacialização dos alinhamentos e escolha dos marcos-estação sobre o bloco..	p.73
3.2.3 Arquitetura do bloco.....	p.77
3.2.3.1 Marcos limítrofes.....	p.78
3.2.3.1.1 Marcos limítrofes – rotina de processamento.....	p.83
3.2.3.2 Marcos de apoio.....	p.85
3.2.3.3 Marcos parciais homólogos de apoio nas zonas de sobreposição lateral.....	p.88
3.2.3.3.1 Marcos parciais – rotina de processamento.....	p.91
3.2.3.4 Determinação dos planos homólogos sobre a superfície física.....	p.92
3.2.3.5 Cálculo dos pontos homólogos.....	p.96
3.2.3.6 Observações de campo.....	p.103
3.2.3.6.1 Ondulação geoidal	p.104
3.2.3.7 Modelo de transformação de referenciais para o ajustamento das observações..	p.112
3.2.3.7.1 Transformação isogonal ou conforme de Helmert.....	p.112
3.2.3.8 Modelo matemático de ajustamento.....	p.113
3.3 PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DO ALS	p.124
3.3.1 Estimativa dos parâmetros de orientação interior do ALS.....	p.124

CAPÍTULO 04 - RESULTADOS E ANÁLISES

p.128

4.1 MÉTODO MOORE-PENROSE.....	p.129
4.1.1 Estimativa de parâmetros.....	p.129
4.1.1.1 Arranjo espacial com 36 observações.....	p.135
4.1.1.2 Arranjo espacial com 34 observações.....	p.139
4.1.1.3 Arranjo espacial com 30 observações.....	p.143
4.1.2 Modelo polinomial do terceiro grau no espaço.....	p.147
4.1.3 Estimativa dos parâmetros se considerar a ondulação geoidal.....	p.150
4.1.3.1 Estimativa dos parâmetros – 36 observações.....	p.150
4.1.3.2 Estimativa dos parâmetros – 34 observações.....	p.154
4.1.3.3 Estimativa dos parâmetros – 30 observações.....	p.157
4.2 ANÁLISE DOS RESÍDUOS DE OBSERVAÇÕES DISTRIBUÍDAS NAS FAIXAS DE AEROLEVANTAMENTO.....	p.161
4.2.1 Análise dos resíduos de observações submetidas ao ajustamento – distribuição aleatória de marcos testes.....	p.161
4.2.2 Análise dos resíduos de observações submetidas ao ajustamento – distribuição de marcos no trecho superior.....	p.167
4.2.3 Análise dos resíduos de observações submetidas ao ajustamento – distribuição de marcos no trecho inferior.....	p.171
4.2.4 Análise dos resíduos de observações submetidas ao ajustamento – distribuição de marcos no trecho central.....	p.178
4.2.5 Análise dos resíduos de observações submetidas ao ajustamento – selecionados na zona de sobreposição lateral.....	p.184
4.2.6 Análise dos resíduos das medições realizadas com o receptor GPS.....	p.188
4.3 ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR DO ALS.....	p.192

CAPÍTULO 05 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES p.195

5.1 EM RELAÇÃO ÀS HIPÓTESES FORMULADAS..... p.195

5.1.1 Hipótese Principal..... p.195

5.1.2 Hipóteses Secundárias..... p.196

5.2 EM RELAÇÃO AOS OBJETIVOS PROPOSTOS..... p.197

5.2.1 Metodologia para o ajustamento das observações p.197

5.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS..... p.199

5.3.1 Em relação aos indicadores estatísticos do ajustamento..... p.199

5.3.2 Em relação à contribuição do ajustamento simultâneo do bloco para a qualidade posicional..... p.201

5.3.3 Recomendações para pesquisas..... p.202

CAPÍTULO 06 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS p.204

APÊNDICE p.214

ANEXOS p.215

Lista de Figuras

CAPÍTULO 2

FIGURA 01	COBERTURA AÉREA; À ESQUERDA SOBRE ASSENTAMENTO INFORMAL E À DIREITA SOBRE ASSENTAMENTO FORMAL.....	p.08
FIGURA 02	MÉTODO PARA MODELAGEM DE EDIFICAÇÃO.....	p.09
FIGURA 03	IMAGEM DA CLASSIFICAÇÃO DA MALHA URBANA À ESQUERDA E O MODELO 3D SEM VEGETAÇÃO À DIREITA.....	p.10
FIGURA 04	PROJEÇÃO DOS TRAÇOS DAS EDIFICAÇÕES SOBRE UMA AEROFOTO.....	p.11
FIGURA 05	LASER SCANNER AEROTRANSPORTADO.....	p.15
FIGURA 06	VISTA DE TOPO DO ALS ENCAIXADO NO COMPARTIMENTO DA AERONAVE.....	p.16
FIGURA 07	RECEPTOR GPS.....	p.17
FIGURA 08	CRISTAL NEODIMIUM: YAG.....	p.20
FIGURA 09	RETORNO DO SINAL.....	p.22
FIGURA 10	REFLECTÂNCIA DO ALVO.....	p.23
FIGURA 11	COMPONENTES PRINCIPAIS DO LASER SCANNER.....	p.25
FIGURA 12a	AEROLEVANTAMENTO COM O ALS.....	p.30
FIGURA 12b	AEROLEVANTAMENTO COM A CÂMARA.....	p.30
FIGURA 13	LEVANTAMENTO AÉREO COM O SISTEMA PLANNIX.....	P.31
FIGURA 14	MECANISMOS DE ESCANEAMENTO.....	p.33
FIGURA 15	VARREDURA POR FIBRAS	p.34
FIGURA 16	OS SUBSISTEMAS DO LASER.....	p.41
FIGURA 17	TRÊS SUBSISTEMAS DE FUNCIONAMENTO DO ALS E A ORIGEM DO REFERENCIAL LOCAL.....	p.44
FIGURA 18	REFLECTÂNCIA DA IMAGEM DE INTENSIDADE DE UMA RODOVIA EM TRÊS FAIXAS.....	p.49
FIGURA 19	PLANOS HOMÓLOGOS.....	p.51
FIGURA 20	TRAJETÓRIA DO RAIOS LUMINOSOS	p.57

CAPÍTULO 3

FIGURA 21	PLANO DE VÔO.....	p.63
FIGURA 22	AJUSTAMENTO DO BLOCO.....	p.66
FIGURA 23	FLUXOGRAMA DO MÉTODO PRATICADO NA PESQUISA.....	p.67
FIGURA 24	REGISTRO DO CLASSIFY GROUND.....	p.69
FIGURA 25	FAIXAS DO AEROLEVANTAMENTO E OS PONTOS DE	p.72

	APOIO.....	
FIGURA 26	PLANEJAMENTO DO ALINHAMENTO DE PONTOS DE APOIO SOBRE O BLOCO.....	p.74
FIGURA 27	ÁREA DE ABRANGÊNCIA DOS MARCO-ESTAÇÃO.....	p.75
FIGURA 28	LOCALIZAÇÃO IDEAL DE UM MARCO-LIMÍTROFE.....	p.79
FIGURA 29	CÍRCULO DE ABRANGÊNCIA DAS OBSERVAÇÕES	p.81
FIGURA 30	FLUXOGRAMA DO CÁLCULO DO MARCO_LIMÍTROFE.....	p.84
FIGURA 31	REGISTRO DO MARCO PARCIAL SOBRE A MALHA VIÁRIA.....	p.85
FIGURA 32	FLUXOGRAMA DO CÁLCULO DO MARCOS PARCIAIS	p.91
FIGURA 33	LOCALIZAÇÃO DA ZONA DE SOBREPOSIÇÃO LATERAL.....	p.92
FIGURA 34	PLANO HOMÓLOGO.....	p.94
FIGURA 35	ZONA DE SOBREPOSIÇÃO ENTRE OS PLANOS HOMÓLOGO E A DISPOSIÇÃO DOS CENTROS DE PLANOS HOMÓLOGOS.....	p.95
FIGURA 36	PERFILAMENTO COM A DISCREPÂNCIA VERTICAL (Δz).....	p.97
FIGURA 37	EVIDÊNCIA DO PONTO HOMÓLOGO.....	p.98
FIGURA 38	POSICIONAMENTO DE UM DOS POLÍGONOS QUE ABRIGAM O PLANO HOMÓLOGO SOBRE A ZSL.....	p.99
FIGURA 39	PERFILAMENTO SEM A DISCREPÂNCIA VERTICAL (Δz).....	p.100
FIGURA 40	LOCAÇÃO DO PONTO HOMÓLOGO.....	p.103
FIGURA 41	ONDULAÇÃO GEOIDAL.....	p.105
FIGURA 42	VARIAÇÃO DA ONDULAÇÃO GEOIDAL.....	p.109
FIGURA 43	FLUXOGRAMA DO AJUSTAMENTO DO BLOCO DE FAIXAS DE AEROLEVANTAMENTO.....	p.111
FIGURA 44	EXEMPLO: CONVERGÊNCIA NA SEGUNDA ITERAÇÃO.....	p.115
FIGURA 45	GRÁFICOS DO MAL CONDICIONAMENTO DE UM SISTEMA BIDIMENSIONAL.....	p.117
FIGURA 46	LOCALIZAÇÃO DAS OBSERVAÇÕES REALIZADAS NA ZONA URBANA E ZONA RURAL PARA SUBSIDIAR A MATRIZ DE INJUNÇÃO DE PARALELISMO.....	p.123

CAPÍTULO 4

FIGURA 47	IMAGEM DO PERFILAMENTO COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO APOIO PREVISTO NO PLANEJAMENTO.....	p.117
FIGURA 48	IMAGEM DO PERFILAMENTO COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE APOIO MEDIDOS COM GPS.....	p.118
FIGURA 49	ARRANJO 01: AJUSTAMENTO COM 36 OBSERVAÇÕES.....	p.120
FIGURA 50	GRÁFICO DOS RESÍDUOS DO ARRANJO 01.....	p.123
FIGURA 51	ARRANJO 02: AJUSTAMENTO COM 34 OBSERVAÇÕES.....	p.124
FIGURA 52	GRÁFICO DOS RESÍDUOS DO ARRANJO 02.....	p.125
FIGURA 53	ARRANJO 03: AJUSTAMENTO COM 30 OBSERVAÇÕES.....	p.128
FIGURA 54	GRÁFICO DOS RESÍDUOS DO ARRANJO 03.....	p.129
FIGURA 55	ARRANJO POLINOMIAL.....	p.134
FIGURA 56	GRÁFICOS DOS RESÍDUOS DO ARRANJO 01 COM 36 OBSERVAÇÕES AO ADOTAR A CORREÇÃO DA ONDULAÇÃO GEOIDAL.....	p.137

FIGURA 57	GRÁFICOS DOS RESÍDUOS DO ARRANJO 01 COM 36 OBSERVAÇÕES AO ADOTAR A CORREÇÃO DA ONDULAÇÃO GEOIDAL SOBRE O SIMILAR SEM A ONDULAÇÃO GEOIDAL.....	p.138
FIGURA 58	GRÁFICO DOS RESÍDUOS DO ARRANJO 02 COM 34 OBSERVAÇÕES AO ADOTAR A CORREÇÃO DA ONDULAÇÃO GEOIDAL.....	p.141
FIGURA 59	GRÁFICO DOS RESÍDUOS DO ARRANJO 01 COM 36 OBSERVAÇÕES AO ADOTAR A CORREÇÃO DA ONDULAÇÃO GEOIDAL SOBRE O SIMILAR SEM A ONDULAÇÃO GEOIDAL.....	p.141
FIGURA 60	GRÁFICO DOS RESÍDUOS DO ARRANJO 03 COM 30 OBSERVAÇÕES AO ADOTAR A CORREÇÃO DA ONDULAÇÃO GEOIDAL.....	p.144
FIGURA 61	GRÁFICO DOS RESÍDUOS DO ARRANJO 03 COM 30 OBSERVAÇÕES AO ADOTAR A CORREÇÃO DA ONDULAÇÃO GEOIDAL SOBRE O SIMILAR SEM A ONDULAÇÃO GEOIDAL.....	p.145
FIGURA 62	ARRANJO ESPACIAL DOS MARCOS TESTES DESTINADOS AO AJUSTAMENTO DO BLOCO.....	p.147
FIGURA 63	GRÁFICOS DOS RESÍDUOS DOS MARCOS TESTES ESTIMADOS COM OS PARÂMETROS 36 E 34 OBSERVAÇÕES.....	p.148
FIGURA 64	GRÁFICOS DOS RESÍDUOS DOS MARCOS TESTES ESTIMADOS COM OS PARÂMETROS 30 OBSERVAÇÕES.....	p.149
FIGURA 65	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS OBSERVAÇÕES DO ALS EM RELAÇÃO AO MARCO TESTE SETE.....	p.151
FIGURA 66	ARRANJO ESPACIAL DOS MARCOS NO TRECHO SUPERIOR DO BLOCO DESTINADOS AO AJUSTAMENTO DO BLOCO.....	p.152
FIGURA 67	GRÁFICOS DOS RESÍDUOS DOS MARCOS ESTIMADOS COM OS PARÂMETROS 36 E 34 OBSERVAÇÕES.....	p.153
FIGURA 68	GRÁFICOS DOS RESÍDUOS DOS MARCOS ESTIMADOS COM OS PARÂMETROS 30 OBSERVAÇÕES.....	p.154
FIGURA 69	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS OBSERVAÇÕES DO ALS EM RELAÇÃO AO MARCO 10210.....	p.155
FIGURA 70	ARRANJO ESPACIAL DOS MARCOS NO TRECHO INFERIOR DO BLOCO DESTINADOS AO AJUSTAMENTO DO BLOCO.....	p.156
FIGURA 71	GRÁFICOS DOS RESÍDUOS DOS MARCOS ESTIMADOS COM OS PARÂMETROS 36 E 34 OBSERVAÇÕES.....	p.157
FIGURA 72	GRÁFICOS DOS RESÍDUOS DOS MARCOS ESTIMADOS COM OS PARÂMETROS 30 OBSERVAÇÕES.....	p.158
FIGURA 73	ARRANJO ESPACIAL DOS MARCOS NO TRECHO CENTRAL DO BLOCO DESTINADOS AO AJUSTAMENTO DO BLOCO.....	p.163
FIGURA 74	GRÁFICOS DOS RESÍDUOS DOS MARCOS ESTIMADOS COM OS PARÂMETROS 36 E 34 OBSERVAÇÕES.....	p.164
FIGURA 75	GRÁFICOS DOS RESÍDUOS DOS MARCOS ESTIMADOS COM OS PARÂMETROS 30 OBSERVAÇÕES.....	p.165
FIGURA 76	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS OBSERVAÇÕES DO ALS EM RELAÇÃO AO MARCO 10112W.....	p.166
FIGURA 77	ZONA DE SOBREPOSIÇÃO LATERAL ENTRE A FAIXA 1 E FAIXA 2.....	p.169
FIGURA 78	VARIAÇÃO DA DISCREPÂNCIA VERTICAL ANTES DE SER SUBMETIDA AO MODELO ISOGONAL DE TRANSFORMAÇÃO.....	p.171
FIGURA 79	VARIAÇÃO DA DISCREPÂNCIA VERTICAL APÓS DE SER SUBMETIDA AO MODELO ISOGONAL DE TRANSFORMAÇÃO.....	p.171
FIGURA 80	REDUÇÃO DA DISCREPÂNCIA VERTICAL.....	p.172
FIGURA 81	REGISTRO DO DESVIO-PADRÃO MEDIDO COM O RECEPTOR GPS PARA A PLANIMETRIA.....	

FIGURA 82	REGISTRO DO DESVIO-PADRÃO MEDIDO COM O RECEPTOR GPS PARA A ALTIMETRIA.....	p.175
FIGURA 83	HISTOGRAMA DAS DIFERENÇAS DE ALTURA NAS BORDAS DAS FAIXAS.....	p.176

CAPÍTULO 5

FIGURA 84	MAPA DOS ALINHAMENTOS.....	p.181
FIGURA 85	REGISTRO DA DIFERENÇA ENTRE RESÍDUOS.....	p.185
FIGURA 86	REFLETOR PARA SINALIZAÇÃO DE AEROLEVANTAMENTO.....	p.186

Lista de Quadros

CAPÍTULO 3

QUADRO 3.1	BASES PARA O APOIO DO LEVANTAMENTO COM RECEPTORES GPS	p.76
QUADRO 3.2	REDE ALTIMÉTRICA DO PARANA	p.107

CAPÍTULO 4

QUADRO 4.1	SÍNTESE DAS MEDIÇÕES REALIZADAS COM RECEPTOR GPS NA ZONA DO PROJETO – MARCOS RESIDENTES NAS BORDAS DAS FAIXAS E MARCOS HOMÓLOGOS.....	p.115
QUADRO 4.2	SÍNTESE DAS MEDIÇÕES REALIZADAS COM RECEPTOR GPS NA ZONA DO PROJETO – MARCOS TESTES E MARCOS HOMÓLOGOS.....	p.116
QUADRO 4.3	QUADRO DAS COORDENADAS ADOTADAS PARA O AJUSTAMENTO DE 36 OBSERVAÇÕES.....	p.121
QUADRO 4.4	PARÂMETROS DO AJUSTAMENTO – 36 OBSERVAÇÕES.....	p.122
QUADRO 4.5	QUADRO DAS COORDENADAS ADOTADAS PARA O AJUSTAMENTO DE 34 OBSERVAÇÕES.....	p.126
QUADRO 4.6	PARÂMETROS DO AJUSTAMENTO – 34 OBSERVAÇÕES.....	p.127
QUADRO 4.7	QUADRO DAS COORDENADAS ADOTADAS PARA O AJUSTAMENTO DE 30 OBSERVAÇÕES.....	p.130
QUADRO 4.8	PARÂMETROS DO AJUSTAMENTO – 30 OBSERVAÇÕES.....	p.130
QUADRO 4.9	QUADRO DAS COORDENADAS ADOTADAS PARA O AJUSTAMENTO DE 62 OBSERVAÇÕES.....	p.133
QUADRO 4.10	QUADRO DAS COORDENADAS DE CAMPO ADOTADAS PARA O AJUSTAMENTO DE 36 OBSERVAÇÕES COM AS CORREÇÕES DEVIDO À ONDULAÇÃO GEOIDAL.....	p.135
QUADRO 4.11	PARÂMETROS DO AJUSTAMENTO – 36 OBSERVAÇÕES.....	p.136
QUADRO 4.12	PARÂMETROS DO AJUSTAMENTO – 34 OBSERVAÇÕES.....	p.139
QUADRO 4.13	QUADRO DAS COORDENADAS ADOTADAS PARA O AJUSTAMENTO DE 34 OBSERVAÇÕES.....	p.140
QUADRO 4.14	PARÂMETROS DO AJUSTAMENTO – 30 OBSERVAÇÕES.....	p.142
QUADRO 4.15	QUADRO DAS COORDENADAS ADOTADAS PARA O AJUSTAMENTO DE 30 OBSERVAÇÕES.....	p.143
QUADRO 4.16	PARÂMETROS DO AJUSTAMENTO – 30 OBSERVAÇÕES.....	p.160
QUADRO 4.17	QUADRO COMPARATIVO ENTRE OS PARÂMETROS DO AJUSTAMENTO ESTIMADO PARA 34 E 30 OBSERVAÇÕES.....	p.161

CAPÍTULO 5

QUADRO 5.1	RESÍDUOS DO AJUSTAMENTO.....	p.186
------------	------------------------------	-------

Lista de Tabelas

CAPÍTULO 2

TABELA 2.1	PRECISÃO NOMINAL DO LEVANTAMENTO COM O ALS.....	p.36
-------------------	---	------

CAPÍTULO 3

TABELA 3.1	EQUIPAMENTOS.....	p.61
TABELA 3.2	CLASSIFICAÇÃO DOS ARQUIVOS DE COORDENADAS.....	p.70
TABELA 3.3	CODIFICAÇÃO DOS PONTOS DE APOIO.....	p.73
TABELA 3.4	MARCOS LIMÍTROFES RASTREADOS COM GPS NAS ZONAS LIMÍTROFES DO BLOCO.....	p.78
TABELA 3.5	MARCOS LIMÍTROFES AJUSTADOS.....	p.83
TABELA 3.6	MARCOS DE APOIO: MARCOS DA BORDA DO BLOCO E MARCOS DA ZSL_1.....	p.86
TABELA 3.7	MARCOS DE APOIO: MARCOS DA ZSL_2, MARCOS PARA TESTES NAS ZSL_1, MARCOS PARA TESTES NAS ZSL_2.....	p.87
TABELA 3.8	MARCOS PARCIAIS HOMÓLOGOS: MARCOS PARCIAIS E MARCOS PARCIAIS À ESTE.....	p.89
TABELA 3.9	MARCOS PARCIAIS HOMÓLOGOS: MARCOS PARCIAIS E MARCOS PARCIAIS À OESTE E MARCOS PARCIAIS PARA TESTES.....	p.90
TABELA 3.10	MARCOS HOMÓLOGOS: MARCOS HOMÓLOGOS DA ZSL_1.....	p.101
TABELA 3.11	MARCOS HOMÓLOGOS: MARCOS HOMÓLOGOS DA ZSL_2.....	p.102
TABELA 3.12	MARCOS RASTREADOS COM GPS NO INTERIOR E NAS CABECEIRAS DO BLOCO DE FAIXAS.....	p.108
TABELA 3.13	EXTREMIDADES DAS BORDAS DAS FAIXAS DE VARREDURA.....	p.126

CAPÍTULO 4

TABELA 4.1	ERROS MÉDIOS QUADRÁTICOS APURADOS COM DISTRIBUIÇÃO ALEATÓRIA DE MARCOS TESTES.....	p.150
TABELA 4.2	ERROS MÉDIOS QUADRÁTICOS APURADOS DO AJUSTAMENTO..	p.155
TABELA 4.3	DIFERENÇAS ENTRE AS COORDENADAS CALCULADAS E AS COORDENADAS DE CAMPO.....	p.159
TABELA 4.4	ERROS MÉDIOS QUADRÁTICOS APURADOS DO AJUSTAMENTO..	p.162

TABELA 4.5	MEDIÇÕES DO ALS INSERIDAS NO RAIOS DE 20 m DE EXTENSÃO..	p.167
TABELA 4.6	ERROS MÉDIOS QUADRÁTICOS APURADOS DO AJUSTAMENTO..	p.168
TABELA 4.7	RELAÇÃO DAS COORDENADAS MEDIDAS NO CAMPO COM O RECEPTOR GPS.....	p.173
TABELA 4.8	RELAÇÃO DAS COORDENADAS MEDIDAS NO CAMPO COM O RECEPTOR GPS.....	p.174
TABELA 4.9	MARCOS_APOIO PARA ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS INTERNIÓS DO ALS.....	p.177
TABELA 4.10	INDICADORES DO AJUSTAMENTO.....	p.178

CAPÍTULO 5

TABELA 5.1	RESÍDUOS DO AJUSTAMENTO.....	p.186
TABELA 5.2	SÍNTESE DO AJUSTAMENTO SIMULTÂNEO DO BLOCO.....	p.187

Lista de Siglas e Abreviaturas

AEIS	Áreas Especiais de Interesse Social
ALS	Airborne Laser Scanner
ALTM	Airborne laser Tematic Mapping
Applanix POS/AV	Position and Orientation System for Airborne Vehicles
CAD	Computer Aided Design
CW	Continuous Wave
DEM	Digital Elevation Model
DSG	Diretoria do Serviço Geográfico do Exército
<i>fdp</i>	Função de distribuição de probabilidade
FOV	Field of View
GEOIDEPR	Aplicativo para plataforma DOS
GEOIDEPR06-FFT	Aplicativo para plataforma DOS
GPS	Global Positioning System
HIR	Hierarchic Interpolation Robust
HV	Pontos de duplo apoio – planimétrico e altimétrico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMU	Inertial Measurement Unit
LADAR	Laser Detection And Ranging
LAIG/UFPR	Laboratório de Aferição e Instrumentação Geodésica
LANDSAT MSS/TM	Agência norte-americana de administração de satélites imageadores
LIDAR	Light Detection And Ranging
MAPGEO	Aplicativo para plataforma Windows
MATLAB 7.04	Aplicativo para plataforma Windows
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MICROSTATION V8	Aplicativo para plataforma Windows
MMQ	Método dos mínimos Quadrados
MVCXA	Matriz Variância Covariância dos Parâmetros
Nd: YAG	Neodimium: Ytrium Aluminum Garnet
ORIENT	Aplicativo para o ajustamento de Faixas com o sensor laser
PE&RS	Photogrammetric Engineering and Remote. Sensing
PGE	Programa Global Específico
POS	Passive Optical Sensor
RRNN/RN	Referências de Nível/Referência de Nível
RTK	Real Time Kinematic
SAAB TopEye	Fabricante suíço de sensor laser
SAD	South American Datum
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SPSS	Aplicativo para plataforma Windows
TERRASCAN	Aplicativo para plataforma MICROSTATION V8
TopoSys	Topographische Systemdatum
UV	Radiação ultra-violeta
V	Ponto de apoio Simples
WGS-84	World Geodetic System
ZSL	Zona de Sobreposição Lateral

Resumo

A discrepância vertical na zona de sobreposição lateral é uma distorção da medida original de difícil correção decorrente da varredura realizada pelo sensor laser, em particular, residente nos extremos laterais da faixa de vôo. A pesquisa faz uma criteriosa avaliação dos resultados dedicados ao ajustamento simultâneo do bloco que pode atender, entre outros, a redução da discrepância vertical. Identifica possíveis comportamentos de caráter tendencioso, avalia a existência de resíduos (*outlier*) no conjunto das observações e submete ao ajustamento os critérios de análises estatísticas. A tese estuda os componentes e funcionamento do sensor de mapeamento remoto o laser scanner aerotransportado (ALS). São investigadas as capacidades de otimizar atividades dedicadas a gerar pontos na superfície iluminada. São descritos, ainda, os cuidados tomados na realização de um perfilamento com o ALS em relação à potência usada e as altitudes de vôos possíveis do ponto de vista da segurança para a saúde humana. Revela a contribuição que as medições realizadas com o sensor laser podem atender as atividades voltadas para a gestão municipal, ao cadastro rural ou mesmo, ao cadastro ambiental. É adotado o polinômio isogonal de Helmert no espaço para modelar o comportamento da superfície amostrada. No estágio seguinte, promove estratégias que apontam uma função matemática capaz de estimar os parâmetros de orientação interna do sensor laser ao considerar o canhão de emissão/recepção laser direcionado para o nadir. Assim, a tese sugere que se implemente uma técnica adicional aos métodos praticados para a calibração e registro de coordenadas com o ALS que visem, sobretudo, reduzir a influência de resíduos e/ou distorções que são inerentes ao processo de medição.

Palavras-Chave: ALS; ajustamento simultâneo do bloco; discrepância vertical

Abstract

The vertical discrepancy in the zone of lateral superposition is a distortion of the original measure that is hard to correct due to the sweeping realized by the laser sensor, especially, located in the lateral extremes of the flight area. Research does a judicious evaluation of the results dedicated to the simultaneous adjustment of the block, which may result, among others, in the reduction of the vertical discrepancy. It also identifies possible biased behaviors, evaluates the existence of residues (outlier) in the set of observations and submits the criteria of statistical analysis to adjustment. The thesis studies the components and the functioning of the remote sensor or airborne laser scanner (ALS). It examines the capacities to enhance activities dedicated to the generation of points in the lighted surface. In addition, it describes precautions taken in the profiling with the ALS in relation to the used power and the possible flight altitudes from the standpoint of security to the human health. Moreover, it reveals that the measuring done with the laser sensor may assist with activities directed to the municipal management, rural survey or even, environmental survey. The Helmert isogonal is adopted in the area with the purpose of shaping the behavior of the sampled surface. In the following stage it promotes strategies that point to a mathematical function capable of estimating the parameters of internal orientation of the laser sensor when considering the issuing/receiving laser cannon directed to the nadir. In this manner, the thesis suggests that it an additional technique be added to the methods already practiced in the calibration and the registering of coordinates with the ALS that aim, above all, at reducing the influence of the residues and/or distortions that are inherent to the measuring process.

Keywords: ALS, simultaneous block adjustment; vertical discrepancy.

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

São absolutamente inestimáveis as contribuições que a tecnologia, que se notabilizou por Laser Scanner Aerotransportado (ALS), trouxeram para as atividades dedicadas ao mapeamento. Em pouco mais de uma década a tecnologia do ALS revolucionou o entendimento, até então, de técnicas apuradas e tradicionalmente praticadas para o levantamento da superfície física, seja edificada, cultivada ou solo exposto. O Brasil desde 2001 conta com a tecnologia do ALS em diversos campos de atuação e usa com propriedade a incorporação aos projetos de interesse ao desenvolvimento do país. São projetos destinados à análise de riscos, projetos de drenagem, planejamento de diques, planejamento para a instalação de torres e equipamentos voltados à telefonia móvel e para a transmissão de energia elétrica, estudo da propagação da poluição sonora, planejamento de infra-estrutura urbana, mapeamento de corredores de transportes para citar alguns exemplos. Não obstante, às contribuições assistidas até então, a atividade principal trata da coleta de dados de elevação e o conseqüente processo de geração do Modelo Digital de Elevação (MDE) e o Modelo Digital de Terreno (MDT).

A arquitetura do sensor laser depende do funcionamento de três dispositivos. Um emissor/receptor do sinal luminoso, um receptor GPS de dupla freqüência e uma unidade de medição inercial. A presunção da sincronia dos dispositivos é apenas teórica, pois as taxas de transmissão são distintas para cada um dos elementos envolvidos e requer um custo de processamento elevado. Ao mesmo tempo em que a estrutura física do equipamento responde pela eficiência das medições e é também fonte de incertezas e fragilidades.

Por outro lado, a discrepância vertical nas zonas de sobreposição lateral são evidências de problemas correntes na realização de medições realizadas com o ALS. Se possível fosse estabelecer um paralelo entre as distorções que afetam as aerofotos e àquelas que afetam as medições decorrentes do perfilamento, termo comumente atribuído à varredura com o ALS, as bordas laterais das faixas medidas com o sensor ALS e as bordas das aerofotos seriam as regiões mais vulneráveis. A cobertura aérea de uma

localidade com a tecnologia ALS cria um bloco de faixas decorrente da varredura e provoca inevitável comparação com a metodologia de redução de resíduos praticada com as atividades similares com as câmeras aéreas. Dentre as quais se destaca o ajustamento simultâneo do bloco de faixas dedicado a minimizar a presença de distorções prevaletes sobre a coleção de fotografias. O ajustamento tem o propósito de minimizar a influência de distorções que afetam as medições originais realizadas com o ALS, pois submete obrigatoriamente todas as observações ao mesmo referencial local.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

- Propor uma metodologia para o ajustamento das observações realizadas sobre a superfície física de um bloco de faixas decorrente da cobertura com o laser scanner aerotransportado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar as técnicas de ajustamento e filtragem de observações geradas pelo ALS voltadas para a redução das discrepâncias vertical e horizontal residentes nas faixas de varredura do sensor;
- Avaliar o desempenho das observações submetidas ao modelo matemático de ajustamento;
- Estimar as precisões alcançadas com a metodologia proposta.

1.3 INEDITISMO DA PESQUISA SOBRE A TECNOLOGIA DO ALS

Há pouco menos de vinte anos a literatura sobre a tecnologia LIDAR trazia as primeiras publicações. A profusão de softwares voltados para o registro de pontos amostrados sobre a superfície, a modelagem matemática de superfícies iluminadas pelo sensor laser, as cartas temáticas elaboradas da reflectância de pulsos são mostras do vigor que o tema vem ganhando cada vez mais destaque nos periódicos, eventos e revistas especializadas. Por outro lado, as dificuldade de compreensão em relação ao

funcionamento do ALS sofreu nestes anos um avanço modesto. A *rotina - proprietário* que abriga os parâmetros internos de realização de medições, a interpolação e sincronização dos sinais emitidos pelos componentes internos e toda a sorte de mecanismos de controle são, até o momento, desconhecidos. As tentativas de estimar os algoritmos que norteiam as engrenagens do ALS esbarram no volume denso e formato dos arquivos digitais. Diante deste quadro, a pesquisa amadurecida pela tese fornece um caminho que pode aproximar as soluções de problemas enfrentados até então, pois pauta os modelos matemáticos por um procedimento assemelhado à aerotriangulação. A literatura especializada sobre a triangulação espacial nos últimos cinquenta anos relatou por artigos científicos, livros, oficinas de ensino um aprendizado diversificado e, sob um aspecto mais importante, incorporou a tecnologia digital aos métodos analógicos processados no passado. Além disso, a tese revela um procedimento que supera as barreiras da *rotina - proprietário*, porque redefine o sistema de referência praticado para as observações que repousam sobre as faixas de varredura decorrentes do aerolevantamento por um sistema de referência comum – método que segue ao processo de aerotriangulação ocorrido com a coleção de aerofotos. Discute, ainda, em função do ajustamento submetido ao bloco de varredura do sensor ALS, a eficiência dos modelos matemáticos descritos na literatura sobre a estimativa de parâmetros internos do sensor laser.

Logo, a proposição das medidas submetidas à reflexão e reveladas nos capítulos seguintes traduzem um caráter inovador ao reunir conhecimentos e proposições consagradas em campos diversos da tecnologia LIDAR mas que podem agir na condução de uma solução possível, de custo operacional reduzido se comparado com os modelos avaliados e na correção de registro de pontos amostrados na extensão das faixas de varredura, sobretudo, nas bordas laterais.

1.4 LIMITAÇÃO DA PESQUISA SOBRE A TECNOLOGIA DO ALS

A pesquisa abrange uma extensão de aproximadamente 36 km², são três faixas sinuosas de vôo com aproximadamente 1,4 km de largura por 9,0 km de comprimento, em uma zona densamente verticalizada no centro da capital paranaense. Apesar deste

cenário a metodologia não é direcionada apenas para regiões urbanizadas como possa parecer, pois as zonas rurais sofrem igualmente com as distorções nas observações decorrentes do perfilamento com o sensor ALS. O procedimento dedicado ao ajustamento revelou parâmetros muito rígidos se verificado os valores apontados pelas respectivas variâncias. Há duas interpretações para a questão; em primeiro lugar constata-se que as correções de distorções verificadas nas coordenadas de pontos ajustados sobre a superfície amostrada que traziam as características do relevo semelhantes aos pontos elencados para a rotina do ajustamento e, conseqüentemente, a estimativa dos parâmetros, resultaram exitosos no propósito da diminuição da discrepância vertical, porém, se as coordenadas traziam características distintas, o efeito é inverso e o processo de ajustamento parece não interferir com eficiência na eliminação ou minoração da influência dos resíduos sobre as coordenadas.

1.5 JUSTIFICATIVAS

O LIDAR, acrônimo do termo em inglês para *Light Detection And Range* quando aerotransportado recebe a denominação de Laser Scanner Aerotransportado. É um sensor ativo que, entre outros, estima as distâncias com a refletividade dos alvos. Quer dizer, quanto menor a refletividade captada pelo sensor pior será a capacidade de aferir corretamente à distância. O termo em inglês para esta propriedade é *penetration rate*, razão entre o número de pontos refletidos da superfície iluminada e o total de pontos medidos. A imagem de intensidade produzida pelo sensor, os módulos de gestão de dados e a nuvem de pontos sobre a superfície física e superfície edificada permitiram inovações às tecnologias consagradas dedicadas ao mapeamento. Porém, há restrições ao acesso de parâmetros de calibração do equipamento e as *rotinas-proprietário* (ou *sistemas-proprietário*) significam um entrave à difusão do conhecimento e amadurecimento da tecnologia, pois cria limitações às informações sobre o verdadeiro alcance e impedimentos técnicos do ALS.

O LIDAR despertou interesse em expressões acadêmicas voltadas para investigar; técnicas de varredura em plataformas terrestres, os parâmetros de calibração, o ajustamento e filtragem de observações decorrente da emissão de pulsos, a

modelagem matemática de componentes do sensor laser e a discrepância vertical, respectivamente, LICHTI et al. (2000), KATZENBEISSER (2003), VOLSSEMAN & MAAS (1999), BALTSAVIAS (1999) e SCHENK(2001) para citar alguns exemplos.

A discrepância vertical é uma das principais distorções que deterioram a qualidade das observações que ocupam as bordas das faixas de aerolevante realizadas pelo sensor laser. Apesar dos esforços de pesquisadores, a literatura traz abordagens superficiais e reticentes que pouco contribuem para estabelecer um método sistemático e eficiente de correção do problema.

A pesquisa aborda uma técnica de ajustamento simultâneo de faixas de varredura obtida com o sensor laser aeronavegado que vai ao encontro das principais publicações científicas que relatam o progresso para a redução da influência da discordância nas faixas de aerolevante. Resgata técnicas consagradas praticadas para a aerofotogrametria e, conseqüentemente, conta com o amadurecimento sobre o tema decorrente do registro histórico de problemas enfrentados e alternativas exitosas no exercício de procedimentos técnicos com câmaras aéreas assemelhados aos realizados com o ALS. Estabelece um roteiro de cálculo que promove uma simplificação de algoritmos e operadores matemáticos que tornam o custo computacional mais reduzido do que os modelos praticado por KAGER (2006), KAGER (2004), KAGER (2003).

Há décadas a gestão pública busca alternativas para superar os constantes contingenciamentos de recursos destinados à atualização de registros da base cartográfica voltada, sobretudo, para o mapeamento sistemático. A evidência das dificuldades enfrentada pelo IBGE e órgãos responsáveis é expressa na comercialização, impressão, publicação, digitalização matricial e vetorial de uma base que revela a realidade da ocupação territorial verdadeira para os idos da década de setenta e oitenta do século passado, na sua maioria.

Embora, se atualizada fosse, a coleção de cartas do mapeamento sistemático seria insuficiente para atender aos usuários responsáveis pela gestão pública municipal, porque as escalas dos mapas são impróprias para realizar a gestão territorial,

sobretudo, afeitos às plantas de zoneamento, valores, uso do solo, gestão ambiental etc.

As imagens de plataformas orbitais, as ortofotos, e todo o acervo de mapas cadastrais fomentam as decisões no âmbito municipal para atender aos desafios decorrentes do forte adensamento nos centros urbanos e a proliferação de conflitos territoriais em zonas rurais.

A tecnologia do ALS pode atender aos gestores municipais com o tempo de pós-processamento (medições decorrentes do aerolevanteamento) e custos reduzidos se comparados com as técnicas de mapeamento consagradas. São as curvas de nível, os mapas hipsométricos, os Modelos Digitais de Terreno (MDT) e Modelos Digitais de elevação (MDE), as composições com cores hipsométricas e as imagens de intensidade. É oportuno o entendimento das superfícies matematicamente definidas. KHOURY et al. (2005) definem o *Modelo Digital de Elevação* (MDE) como uma representação matemática contínua que descreve a superfície terrestre iluminada em função das coordenadas posicionais. O *Modelo Digital de Superfície* (MDS) é uma representação matemática contínua delimitado pelo intervalo entre a superfície física e a atmosfera. Neste aspecto, inclui, toda sorte de elementos edificados sobre a superfície física, naturais como árvores e culturas semeadas ou artificiais como prédios, armazéns, poste etc. E, finalmente, o *Modelo Digital de Terreno* (MDT) é uma representação matemática contínua que reflete rigorosamente a superfície terrestre delimitado pelos contornos do relevo. Independente da alternativa escolhida em relação as superfícies contínuas matematicamente definidas, são produtos de cartografia que motivam a criação de soluções de gestão que atendem, entre outros, ao impacto ambiental decorrente da ocupação ilegal de terras seja na derrubada da floresta nativa nas regiões centro-oeste e norte do país seja a ocupação desordenada nas encostas nas capitais. Além disso, a tecnologia LIDAR é capaz de gerar modelos digitais densos e precisos, da topografia e das estruturas verticais da superfície. Em áreas urbanas, as edificações podem ser extraídas do contexto, telhados e muros podem ser modelados a partir dos dados de elevação. Outras estruturas construídas podem ser observadas como linhas de transmissão, torres, pontes, entre outros entes, tornando-se assim em

uma opção para usuários finais de dados topográficos em várias áreas de aplicação. Para diversos usos que exijam modelos digitais de elevação com alta densidade, alta resolução e precisão da ordem de decímetro.

Por outro lado, a nuvem de pontos do sensor laser aerotransportado permite ao profissional responsável pela cartografia a combinação de técnicas comuns da aerofotogrametria, sensoriamento remoto ou demais mecanismos dedicados à cartografia com a tecnologia LIDAR. A obtenção da ortofoto verdadeira, termo em inglês para *true ortho*, estampou em 2003 a capa do prestigioso periódico PE&RS (Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, No. 70). O principal artigo contemplava o sucesso obtido com a criação da ortofoto corrigida das distorções que afetam a superfície física e a superfície edificada (árvores e edificações), pois havia uma técnica inovadora; o algoritmo responsável pela superfície edificada foi usado para resgatar a verdadeira geometria das edificações existentes nas aerofotos.

É oportuno lembrar que as medidas realizadas com a aerofotogrametria prescindem da identificação de feições e pontos residentes na superfície física. Restrições impostas pelo sombreamento, falhas decorrentes da realização do vôo, ou mesmo, seleção do filme podem frustrar a implementação de um projeto bem sucedido voltado para o mapeamento de uma localidade. Aliar a técnica adotada pelo ALS à aerofotogrametria permite a observação de elementos pontuais na superfície do terreno, pois o pulso emitido pelo sensor laser tem a capacidade de suprir deficiências e medir localidades ou regiões que poderiam parecer inatingíveis pelas técnicas de medição sobre a coleção de aerofotos.

A fidelidade métrica dos registros produzidos pelo sensor laser agrega um componente de vital importância para a cobertura aerofotogramétrica sobre os assentamentos informais existentes nas principais capitais do país. Nas grandes metrópoles brasileiras, estima-se que cerca de 50% da população, em média, se encontre morando na informalidade, o que só em São Paulo representa cerca de 6 milhões de pessoas. Os moradores de favelas chegam a cerca de 20% da população, assim como em Porto Alegre, Belo Horizonte ou no Rio de Janeiro, chegando a 46% em Recife. São praticados, tradicionalmente, sobre as ocupações irregulares tetos de vôos mais baixos

se comparados sobre a malha urbana formal. A figura 01 ilustra o sobrevôo realizado sobre uma região de invasão com escala de 1:4000 e sobre a malha formal a escala foi de 1:8000.



As cidades brasileiras com mais de vinte mil habitantes, em sua maioria, trazem um texto constitucional aprovado pela câmara municipal que regula o ordenamento territorial voltado para as *Áreas Especiais de Interesse Social* (AEIS). Surpreendentemente, embora a peça de Lei municipal e as resoluções do CONAMA sejam detalhadas na regulação que trata do impacto ambiental, preservação das nascentes e orientação das ocupações não contempla o adensamento da população e a proliferação de habitações térreas ou verticalizadas. O fato repercute severamente na ampliação de conflitos urbanos e concorre tanto com o espaço destinado a instalação do mobiliário urbano quanto com as vias de acesso.

As pesquisas com as observações geradas pelo ALS podem futuramente contribuir para a gestão das comunidades residentes nas AEIS, pois as atividades de ampliação e/ou verticalização nas zonas de interesse social poderiam ser acompanhadas continuamente com as imagens de intensidade e o perfilamento gerado pelo ALS. MAAS (2002) revelou uma técnica bem sucedida orientada para a modelagem matemática de edificações. Embora o procedimento seja voltado para um pequeno

condomínio de casas assemelhado a uma vila, a experiência revela que é possível a concepção de metodologias eficientes para a gestão territorial e ocupação urbana.

A figura 02 mostra o método MAAS em três etapas.

Geração de Modelos 3-D de Edificações – Método MAAS

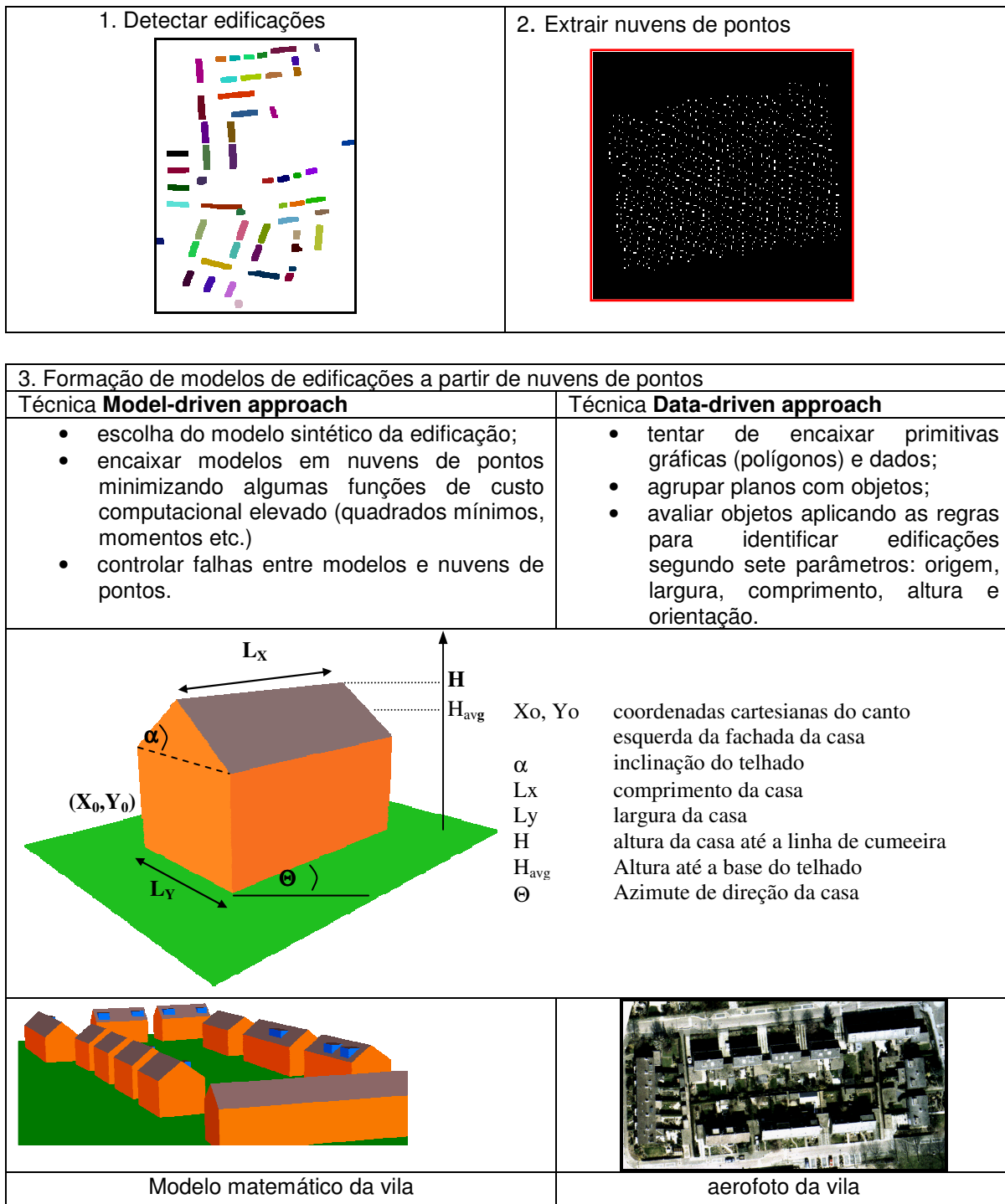
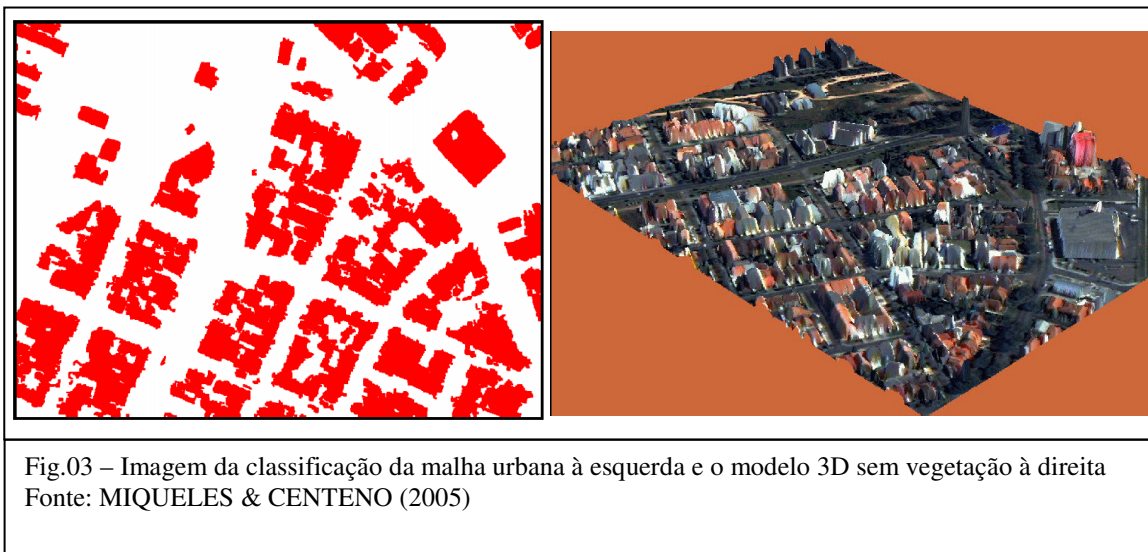


Fig.02 – Método para modelagem de edificação
Fonte: MAAS(2002)

TEMBA & PHILIPS (2007), MIQUELES & CENTENO (2005) endossam a compreensão revelada por diversos autores sobre o potencial do ALS para o monitoramento de erosão nas encostas e o mapeamento urbano devido à capacidade do sensor produzir informações da superfície iluminada, sobretudo, ao aspeto altimétrico que permitem detectar mudanças do relevo ou da ocupação do terreno. Porém, advertem que devido à pobreza espectral da imagem de intensidade, se limita a informações sobre a forma e altura de objetos iluminados. MIQUELES & CENTENO (2005) descrevem tratamento digital submetido a duas cenas digitais; a imagem de intensidade e a cena orbital do satélite Quickbird pancromática. A técnica compreende as etapas de fusão das imagens digitais, correção geométrica e segmentação e classificação, a figura 03 ilustra o resultado do processamento digital das cenas.



CHARANIYA et al. (2004), ROTTENSTEINER et al. (2002), e ROTTENSTEINER & BRIESE (2004) experimentaram um método singular para a geração automatizada de modelos 3D de edificações. É concebido em função do feixe de pontos gerados por sensores LIDAR. Usa um aplicativo de Interpolação Robusta Hierárquica - HIR (acrônimo para o termo em inglês *Hierarchical Interpolation Robust*) com uma função *skew* de distribuição de erros. Os pontos gerados do sensor ALS são classificados para:

- a) pontos no terreno (na superfície física);

- b) pontos elevados em edificações e em outras classes de objeto e,
- c) geração do modelo digital do terreno (MDT)

Os pontos sobre os edifícios devem ser separados de outros pontos classificados como pontos do elevados do terreno. Procedimento que é realizado por uma análise das diferenças de altura entre um modelo digital de elevação (MDE) e de um modelo digital do terreno (MDT). Assim, uma máscara do edifício é estimada e os modelos poliedrais dos edifícios são criados nestas regiões adotando um procedimento conhecido por *bottom-up*. As primitivas gráficas paramétricas de formato retangular são especialmente usadas. No plano 2D obtem-se o contorno do prédio. O polígono da edificação 2D no mapa é inserido dentro de regiões retangulares. São usadas técnicas de segmentação de imagens, veja uma seqüência de polígonos que delinea o contorno dos telhados na figura 04.

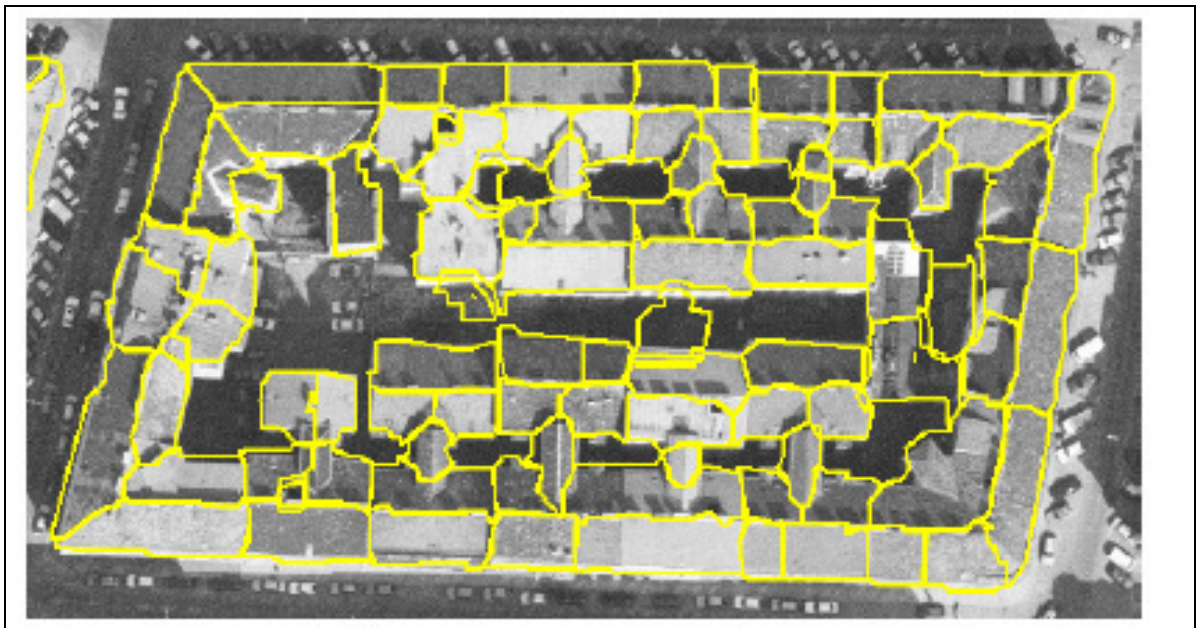


Figura 04: Projeção dos traços das edificações sobre uma aerofoto
Fonte: ROTTENSTEINER & BRIESE (2004)

Logo, é possível afirmar que a metodologia destinada à reduzir a discrepância vertical sobre as medições decorrentes do perfilamento realizado com o sensor laser vai ao encontro de pesquisas que resgatam a geometria de edificações sobre aerofotos publicadas por KIM et al. (2006). A modelagem dedicada à superfície física se estiver corrigida de distorções contribui indiretamente com estudos voltados para a modelagem

de edificações tais como artigo publicado por MAAS (2002) e projetos mais arrojados de modelagem de edificações. É importante salientar que a tese não é um feito isolado e desconexo de um contexto histórico, pois acompanha as pesquisas realizadas em diferentes partes do mundo que procuram difundir a compreensão do funcionamento do ALS e extrair propriedades do sensor que podem ser amadurecidas no âmbito da pesquisa.

1.6 CONTRIBUIÇÃO À CIÊNCIA

“O papel crítico de algumas tecnologias pode ser transitório mesmo para um tipo de ação. Por exemplo, a renovação tecnológica de estradas no sec.XVIII, ao contrário do ocorrido à época dos romanos, nada tem a ver com tecnologias de levantamento ou locação de estradas”, afirma RODRIGUES (1987).

Na literatura brasileira e internacional, a abordagem à processos discutidos e amadurecidos sobre a redução de distorções ou resíduos que afetam as observações tomadas pelo LIDAR são diminutos se comparados com técnicas comuns à aerofotogrametria ou sensoriamento remoto. Ao fazer alusão ao pensamento de RODRIGUES (1987), os estudos sobre a tecnologia de mapeamento LIDAR experimentam um estágio igualmente transitório, pois deixaram de ser vistos como novidade, por outro lado, guardam relativa distância se considerar o aprendizado acumulado sobre técnicas consagradas voltadas para a cartografia.

Falta tempo de maturação para formar convicções e identificar propostas que visam investigar os resultados no que diz respeito ao uso da tecnologia LIDAR na cartografia, a fim de certificar se há compatibilidade, em qualidade, aos valores normalmente obtidos por outras técnicas. Assim, a presente pesquisa busca contribuir com método para redução de resíduos que afetam as observações decorrentes do perfilamento com o sensor laser até agora inexistente acerca de um problema que tem sido pouco abordado pela literatura especializada no país.

1.7 RELEVÂNCIA DO PROBLEMA

A discussão aqui proposta visa fundamentalmente subsidiar pesquisas que promovam o aprofundamento sobre a rotina de funcionamento do ALS, em particular, ao registro das coordenadas tridimensionais. A técnica de ajustamento de observações abordada na tese é uma estratégia para correção das distorções que afetam as observações, sem no entanto, conhecer o valor praticado para os parâmetros internos do equipamento durante a realização do aerolevanteamento. Assim, espera-se que a pesquisa reúna informações sobre dados e procedimentos que permitam a concepção de projetos de investigação que consigam aperfeiçoar a proposta presente e detalhar o verdadeiro funcionamento das *rotinas-proprietário*.

1.8 HIPÓTESES

1.8.1 Hipótese Principal

A discrepância vertical é uma distorção que afeta as bordas das faixas durante o aerolevanteamento, de um modo geral, realizado com o sensor laser. A pesquisa sustenta que a correção da discrepância das observações que depositam sobre a superfície física residente no bloco de faixas pode ser reduzido se for submetido ao processo de ajustamento simultâneo do bloco de faixas, sobretudo, se levar em conta o histórico de resultados decorrente do ajustamento submetido ao bloco de aerofotos – a aerotriangulação.

1.8.2 Hipóteses Secundárias

- a) As observações medidas e as correspondentes observações ajustadas no centro da faixa de vôo com o ALS voltado para o nadir permitem a estimativa dos parâmetros de orientação interior do sensor;
- b) O modelo polinomial do terceiro grau no espaço é uma alternativa ao modelo isogonal para realização do ajustamento simultâneo do bloco;
- c) A estimativa do modelo da ondulação geoidal não é imprescindível para a realização de aerolevanteamentos com o sensor laser.

1.9 ESTRUTURA DA PESQUISA

A organização da pesquisa foi ordenada em cinco capítulos, nos quais foram abordados tópicos com informações e relevância a compreensão plena ao desenvolvimento do projeto.

A pesquisa se propõe a detalhar os procedimentos e principais etapas dedicadas à concepção de uma metodologia de ajustamento simultâneo de faixas de varredura criadas pelo sensor laser aeronavegado. Contempla, sobretudo, os pontos de ligação entre faixas (se comparado a aerotriangulação; é o apoio suplementar) e, as respectivas observações terrestres quando submetidas aos modelos matemáticos.

No primeiro capítulo é apresentada a introdução, objetivos, justificativas, e a estrutura organizacional da pesquisa. No segundo capítulo trata da revisão bibliográfica que dará suporte ao leitor sobre uma noção geral do funcionamento do sensor com detalhamentos sobre as limitações e propriedades dos componentes; discute a contribuição da tecnologia LIDAR se comparada com técnicas tradicionais de mapeamento, por outra, compara também o efeito das filtragens e refinamentos com as observações geradas pelo sensor, descreve as técnicas de calibração do sensor.

No terceiro capítulo descreve o tratamento submetido à nuvem de pontos gerados pelo sensor e a localidade e a dimensão da área abrangida pela pesquisa. Ainda, relata detalhadamente os critérios e formulações matemáticas que sustentam a seleção das observações segundo uma hierarquia e organização específicos. Em síntese; concentra a descrição da metodologia voltada para o desenvolvimento do projeto assim como todos os aplicativos necessários. O quarto capítulo as observações ajustadas são submetida a uma avaliação criteriosa, no quinto capítulo são realizadas as conclusões e recomendações. Por fim, são relacionadas as referências bibliográficas que forneceram o embasamento acadêmico e/ou científico para a concepção e conclusão da pesquisa.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 INTRODUÇÃO

O Laser Scanner Aerotransportado - ALS (sigla para o termo em inglês *Airborne Laser Scanner*) é uma das tecnologias que surgiu nos últimos dez anos voltada para o mapeamento. Usado para medir uma distância e a refletância de objetos na superfície da terra é um equipamento, ilustração na figura 05, composto por três conjuntos de dispositivos eletrônicos:

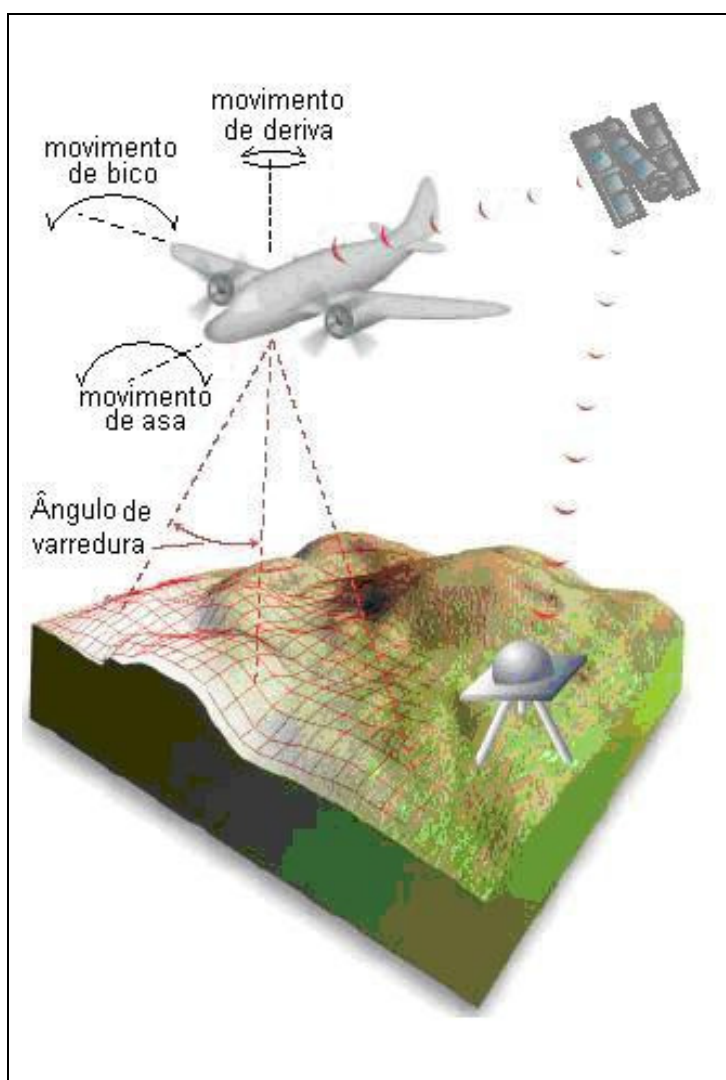


Fig.05 – Laser Scanner Aerotransportado
Fonte: LEICA (2001)

- a) o receptor *GPS (Global Positioning System)*; é componente de um sistema de navegação por satélites. Guarda propriedades que permite o posicionamento preciso em qualquer lugar no globo terrestre, independente da hora, dia e das condições atmosféricas;
- b) a *unidade de medição inercial - IMU (Inertial Measurement Unit)* destinada a estimar a atitude do sensor, qual seja, a orientação no momento da emissão do feixe luminoso e;
- c) o *emissor de laser* gera um feixe de pontos luminosos.

A figura 06 mostra a configuração espacial do emissor/receptor do pulso laser e a unidade de medição inercial. Há componentes adicionais, são; um dispositivo de armazenamento de dados - o disco rígido, uma video câmera que serve para apoiar o processo de edição do aerolevanteamento e, naturalmente, os circuitos eletrônicos formados por cabos, conexões de todo tipo, bobinas elétricas, fusível etc.

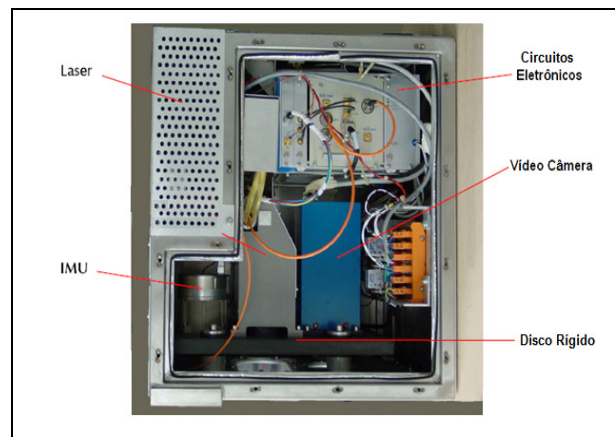


Fig.06 – Vista de topo do ALS encaixado no compartimento da aeronave
Fonte: TopoSys (2002)

A tecnologia GPS adotada pelo ALS é expressa por um equipamento composto por receptores e decodificadores de sinais de uma constelação de satélites artificiais que, entre outros, pode estimar a localização geográfica de posições na superfície terrestre. O método empreendido no levantamento com o sistema ALS é conhecido como cinemático em tempo real. A sigla RTK (*Real Time Kinematic*), às vezes, é adotada

nos textos científicos. O procedimento destinado ao aerolevanteamento com o ALS prevê a colocação de antenas nas asas e no dorso da aeronave durante o vôo. Conseqüentemente, determinam-se as coordenadas geográficas do sensor laser no momento da emissão do sinal (com precisão posicional centimétrica). A figura 07 mostra o posicionamento do receptor GPS no interior da aeronave durante a realização de um aerolevanteamento.



Fig.07 – Receptor GPS
Fonte: Gutierrez et al.(2001)

FREIBERGER JR & KRUEGER (2007) explicam que a técnica RTK é destinada ao posicionamento de alta precisão em tempo real. A estação de referência deve ser equipada com um receptor GPS e um rádio modem transmissor. Por meio de programas computacionais específicos, ela gera correções diferenciais e as transmite via rádio-link para uma estação móvel, que se utiliza destas informações para determinar sua posição com precisão. O formato das correções diferenciais é definido, segundo KRUEGER (1996), pelos padrões recomendados pela RTCM (*Radio Technical Comittee for Maritime Service*). Para efetuar o enlace de comunicação são utilizados rádios transmissores que normalmente operam nas faixas de frequência VHF/UHF para este tipo de aplicação. A grandeza de observação fundamental utilizada no RTK é a medida da fase da onda portadora, que propicia precisão sub-decimétrica ou melhor.

O papel das correções diferenciais é minimizar a influência dos erros atuantes na estação móvel, os quais dependem do comprimento das linhas de base, i.e. da

distância entre a estação móvel (aeronavegado) e a estação de referência. Dentre estes erros citam-se: os erros do relógio do satélite, os erros das efemérides e os erros da propagação do sinal na atmosfera, que limitam a precisão do posicionamento planimétrico de 1 a 10 ppm. O emprego da técnica RTK é limitado em linhas de base de 5 a 10 km em virtude do alcance do enlace UHF. Ademais, a determinação da posição nesta técnica utiliza somente a solução da onda portadora L1 ainda que a onda portadora L2 esteja presente para acelerar a resolução das ambigüidades.

As medidas da fase da onda portadora contêm o termo ambíguo “N”, correspondente ao número inteiro de comprimentos de onda existente entre a antena do satélite e a antena do receptor. A alta precisão oferecida pela técnica RTK só é alcançada após a determinação destas ambigüidades, enquanto a estação móvel estiver em movimento, afirma Monico(1990). A fixação das ambigüidades é uma função do tempo de ocupação, denominado tempo de fixação das ambigüidades, o qual aumenta em proporção ao comprimento da linha de base.

A técnica RTK foi adotada na realização do perfilamento a laser que resultou no conjunto de observações amostradas da superfície que foi utilizado na pesquisa. Todavia, não é possível julgar a qualidade, falhas de transmissão, falhas de sintonização com os demais componentes do sensor laser ou juízo de qualquer valor, pois o registro de posicionamento atribuído ao receptor GPS é função da *rotina-proprietário*, cabendo ao usuário apenas a aceitação ou não das coordenadas. Por outro lado, as medições de apoio ao processo de ajustamento realizadas na área destinada à pesquisa, que será detalhado no capítulo três, contaram com o mesmo método para validar a metodologia de ajustamento praticada. Porém, as observações são obtidas com todo o controle que a técnica pode oferecer, tais como o desvio-padrão calculado, inclinação admitida para a recepção de sinal da constelação de satélites observados, posicionamento das observações etc.

O projeto contou com a campanha no centro de Curitiba/PR em duas etapas. Na primeira fase foi direcionado para o registro físico de bases que serviram de suporte para os receptores estacionários e na etapa derradeira coube a locação dos marcos amostrados da superfície física com o receptor GPS.

A unidade de medição inercial (IMU) é um mecanismo de navegação eletrônica. Quer dizer, sofisticado equipamento e sistema eletrônico usado para determinação da posição e registro do controle dos movimentos do sensor em operação. Segundo TORRES & HEMERLY (2001) e AI-BAYARI (2002) o funcionamento do equipamento baseia-se em medições das acelerações e velocidades angulares do corpo em movimento em relação a determinado sistema de referência. As medições são obtidas por instrumentos que adotam as leis newtonianas de movimento. São componentes comuns na arquitetura dos aparelhos os dispositivos conhecidos como osciloscópio e acelerômetros. Os osciloscópios medem as rotações e os acelerômetros, as acelerações. Através de processos de integração, torna-se possível obter velocidade e posição, bem como determinar a orientação do corpo.

O emissor laser é o componente do ALS responsável pela emissão e recepção do sinal. NEWBY & MRSTIK (2005), DALMOLIN et al. (2005) e DALMOLIN & SANTOS (2004) afirmam que o emissor/receptor laser utiliza para realizar observações, a técnica de *varredura óptica-mecânica com pulsos laser*. A medida de distância compreendida entre o sensor e o objeto iluminado é estimada com o intervalo de tempo entre a emissão e a recepção entre eles. Além disso, seguem os autores, é um sistema composto de três elementos fundamentais para o funcionamento do instrumento. São eles; o gerador de pulsos, o conjunto óptico de emissão e recepção do pulso e o detector de sinais.

O primeiro, o gerador de pulsos, é responsável pelo estímulo do cristal (Nd: YAG símbolo do elemento *Neodimium: Ytrium Aluminum Garnet*), ilustração na figura 08, realizado através de um diodo semicondutor para a emissão da radiação amplificada da luz. O diodo semicondutor é um dispositivo ou componente eletrônico composto de cristal semicondutor de silício ou germânio numa película cristalina cujas faces opostas são dopadas (revestidas) por diferentes gases durante sua formação. É o tipo mais simples de componente eletrônico semicondutor, usado como retificador de corrente elétrica.



Fig.08 – Cristal Neodimium: YAG
Fonte: Cortec

Em seguida, o conjunto óptico de lentes e espelhos orienta os pulsos lasers para os objetos e capta os sinais de retorno e direciona para o receptor e, finalmente, o detector de sinais que recebe um sinal analógico (óptico) de retorno e por meio de um conversor analógico/digital, transforma o sinal analógico em digital. O sinal digital da radiação refletida passa por um filtro de suavização de sinais (operador matemático) que verifica se o sinal recebido possui a mesma intensidade do sinal emitido.

Assim, um Sistema de Navegação Inercial (*Inertial Navigation System* - INS) utiliza-se de Unidades de Medição Inercial (*Inertial Measurement System* - IMU) que contenham arranjos de sensores inerciais (*Inertial Sensors Array* - ISA). Estes arranjos devem conter 13 conjuntos de acelerômetros para a medição de força específica e conjuntos de giroscópios para detecção de movimentos de rotação, afirma LIMA (2005).

A IMU é responsável por fornecer continuamente a atitude do sensor ao longo da trajetória de vôo e a integração GPS/IMU é usada como um instrumento de fundamental importância na execução do levantamento com o sistema ALS, porque o sistema inercial pode complementar o rastreamento GPS e fornecer as informações de posição inicial e de velocidade após a perda de sinal do receptor. Mesmo quando a captura dos sinais dos satélites é insuficiente a IMU pode fornecer informações contínuas de trajetória. Por outro lado, o bom rendimento do sistema de posicionamento GPS pode suplementar o sistema de navegação inercial por meio da estimativa acurada do comportamento de seus erros ao longo do tempo. Segundo NEWBY &

MRSTIK (2005) os erros estão relacionados ao problema de deriva das componentes de trajetória, inerente aos sistemas inerciais usados para mapeamento. Os erros internos devido a IMU são modelados como desvios nos giros e deslocamentos nos acelerômetros, e podem ser corrigidos pelo método de filtragem Kalman ao integrar as informações de posição provenientes do GPS.

2.2 PERFILAMENTO COM O ALS

BRANDALIZE (2004) reitera um princípio abordado por WEHR & LOHR (1999), ao afirmar que as características do relevo, da cobertura vegetal e das áreas edificadas constituem fatores que podem influenciar a modelagem da superfície do terreno e, conseqüentemente, os resultados obtidos do perfilamento realizado pelo ALS. A figura 09 ilustra a situação de medição com o ALS tomada de três alvos distintos. O pulso vermelho simboliza a trajetória do sinal emitido pelo sensor laser até o alvo. Após alcançar a superfície do alvo o sinal interage refletindo difusamente, uma fração do sinal emitido é refletido, representado pelo sinal azul.

A situação 1, o pulso do ALS bate primeiro na copa da árvore e causa três ecos (retorno do sinal) do pulso. Em seguida, uma parcela do pulso alcança a superfície física e gera o retorno do último eco. Na situação 2, o feixe de laser é refletido de uma superfície com relevo ligeiramente ondulado. Na situação 3, o pulso é simplesmente refletido de uma superfície plana normal ao ângulo de incidência do feixe, o eco resultante do pulso tem a forma idêntica ao pulso emitido.

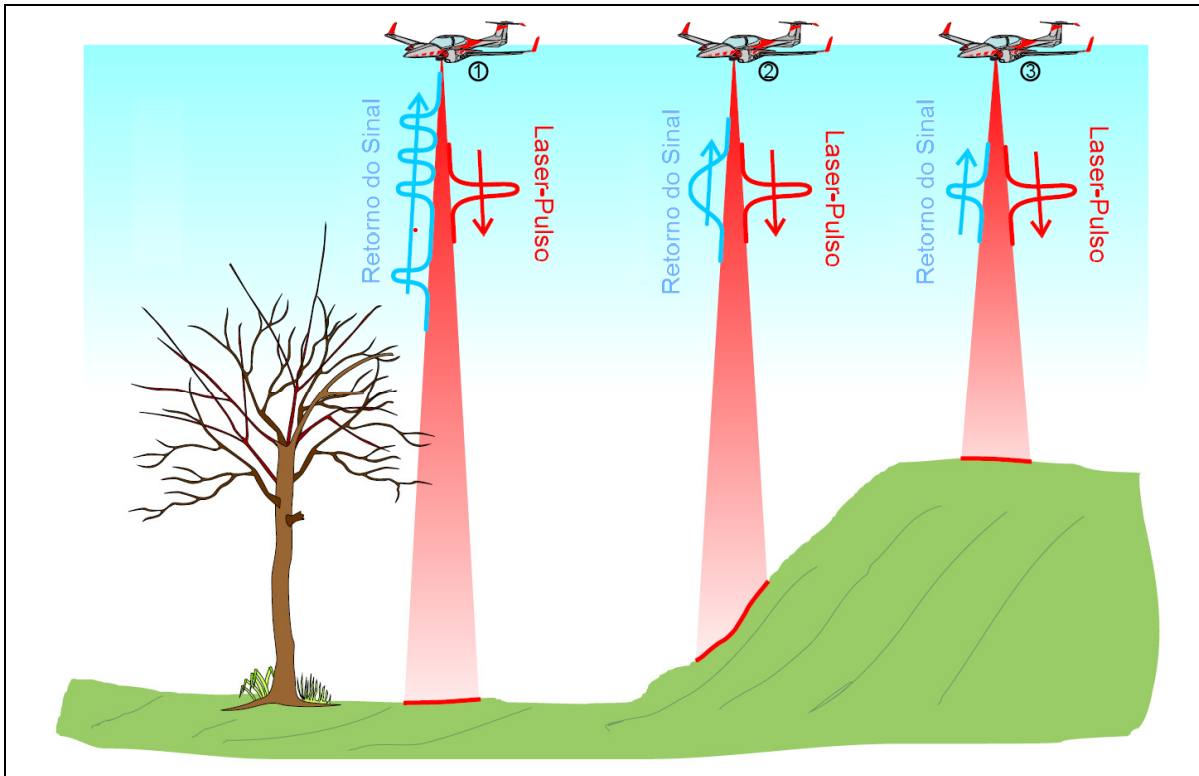


Fig.09 – Retorno do sinal
Fonte: Laser Measurement Systems (2004)

Além destes, outros elementos, como a presença de corpos d'água, de estradas pavimentadas e de superfícies cobertas por gelo ou neve, também devem ser observados. Tal preocupação se justifica, pois, a interação dos elementos que compõem a superfície do terreno com o comprimento de onda do sinal laser que os atinge é um fator determinante do alcance do dispositivo laser utilizado, bem como, da força com que o referido sinal é refletido de volta para aquele mesmo dispositivo. A reflectância é a razão entre o fluxo de radiação eletromagnética refletido e o fluxo incidente numa superfície. De acordo com WEHR & LOHR (1999), a capacidade de reflexão de um alvo influencia o alcance máximo do dispositivo laser utilizado por um sistema ALS. A figura 10 ilustra o alcance máximo que pode ser alcançado pelo pulso durante o perfilamento em função da refletância do alvo.

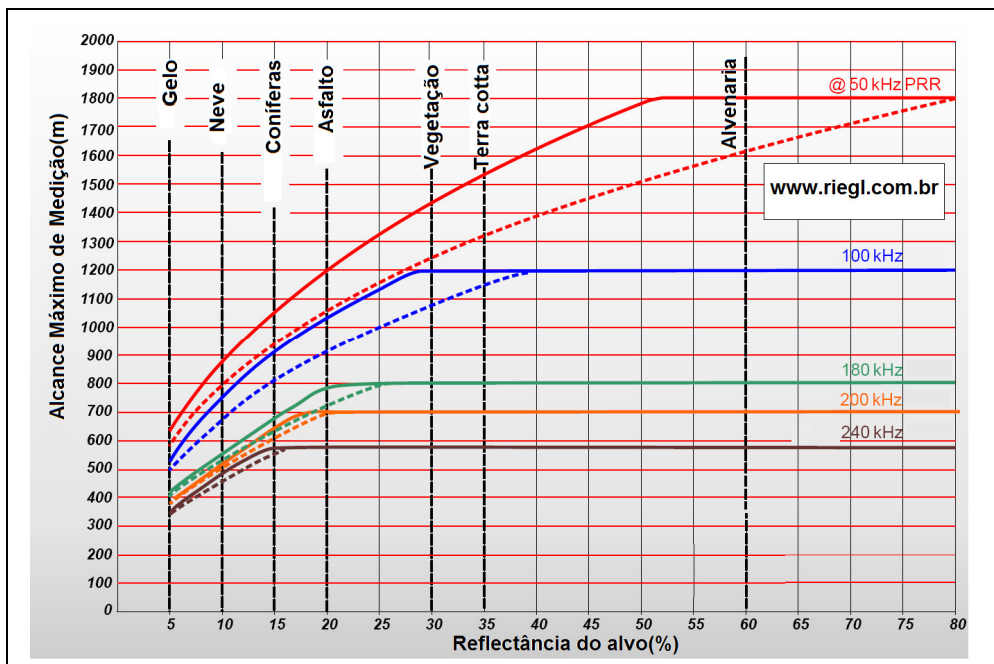


Fig.10 – Reflectância do alvo
 Fonte: Laser Measurement Systems (2004)

BRANDALIZE (2004) ressalta que alguns tipos de alvo (em especial, a neve) as porcentagens de reflectância reportadas são muito diferentes, embora o comprimento de onda do sinal incidente seja praticamente o mesmo. T tamanha diferença pode ser explicada tendo como base o fato de que a reflectância de um alvo não é afetada apenas pelo comprimento de onda do sinal incidente, mas, por uma série de outros fatores, tais como: condições atmosféricas, inclinação do terreno, ângulo de incidência, composição e estrutura do alvo; elevação, densidade e orientação do alvo em relação ao sensor. Um sistema ALS não é capaz de amostrar uma quantidade infinita de pontos laser sobre o terreno e, por esta razão, a complexa interação do sinal laser emitido, com o alvo, necessita ser considerada com cuidado. Relativamente às reflexões, sabe-se que um alvo difuso espalha a energia incidente em todas as direções e retorna apenas uma pequena parte desta energia ao emissor. Por sua vez, um alvo especular reflete a energia incidente em uma única direção bem definida, que geralmente não é a mesma da energia incidente.

Um mesmo alvo pode, portanto, comportar-se de diferentes maneiras (em termos de sua reflectância) em função do comprimento de onda do sinal que sobre ele incide. Da

mesma forma, um alvo que normalmente seria considerado especular (ex.: uma superfície asfaltada lisa), em função da sua estrutura (3D) e composição, pode vir a comportar-se como difuso (ex.: uma superfície asfaltada rugosa).

Segundo BEHAN (2000) tanto superfícies asfaltadas como superfícies aquáticas tendem a absorver parte do feixe laser incidente e a comportarem-se como alvos especulares. Dependendo das condições nas quais tais superfícies se encontram (no caso da água, principalmente em relação a sedimentos suspensos e à topografia da superfície), estes podem ou não desviar o feixe laser incidente para longe do receptor, afetando, assim, a varredura.

2.3 LIDAR

Não é consensual a atribuição de nomes para esta tecnologia. São encontrados na literatura para a designação, termos como LIDAR (*LIght Detection And Ranging*) e LADAR (*LAser Detection And Ranging*).

Independente da denominação adotada o instrumento eletrônico usa os conjuntos óptico-mecânicos de escaneamento assemelhados aqueles instalados nos scanners multiespectrais da plataforma orbital Skylab, no LANDSAT MSS e no LANDSAT TM. Porém, afirmam WEHR & LOHR (1999), LEICA (2005), OPTTECH (2005), são sistemas de sensoriamento ativos e o feixe de laser é usado como o portador do sensoriamento. Precisamente, um conjunto de, ao menos, dois feixes ópticos deve ser considerado. O feixe de laser emitido e a parcela recebida desse feixe. Todos os sistemas do laser medem de alguma forma a distância entre o sensor e o ponto iluminado na superfície terrestre. A figura 11 aborda dois aspectos operacionais do ALS; em primeiro lugar traz a evidência do funcionamento combinado dos três dispositivos eletrônicos; o receptor GPS, a unidade de medição inercial e o emissor do pulso laser e, em segundo, uma seqüência de registros que acompanham o processo de realização das observações com o ALS.

A compreensão do processo relacionado à emissão do pulso, segundo BRANDALIZE (2004), pode ser entendido em três conceitos fundamentais;

a) duração do pulso laser (t_P)

Expressa o tempo de duração de cada pulso, desde sua emissão até seu retorno para o sistema. A unidade de medida é um submúltiplo do segundo (s), normalmente, o nanosegundo (ns),

b) energia do pulso laser (T)

Expressa a força com que o pulso emitido se desloca no espaço. Constitui um dos parâmetros limitantes do alcance máximo de um sistema ALS. De acordo com BALTSAVIAS (1999), para uma dada potência média, quanto maior a taxa de repetição do pulso laser, menor a sua energia. A unidade de medida é um submúltiplo do joule (J), normalmente, o microjoule (μJ),

c) potência média do pulso laser (P)

É função da duração do pulso laser e de sua taxa de repetição, admitem WEHR & LOHR (1999). Também constitui um dos parâmetros limitantes do alcance máximo de um sistema ALS. De acordo com BALTSAVIAS (1999), para uma dada energia, quanto menor a duração de um pulso laser, mais alta é a sua potência (emitida e recebida) e, desta forma, menor é o erro de detecção deste pulso. A unidade de medida é o watt (W).

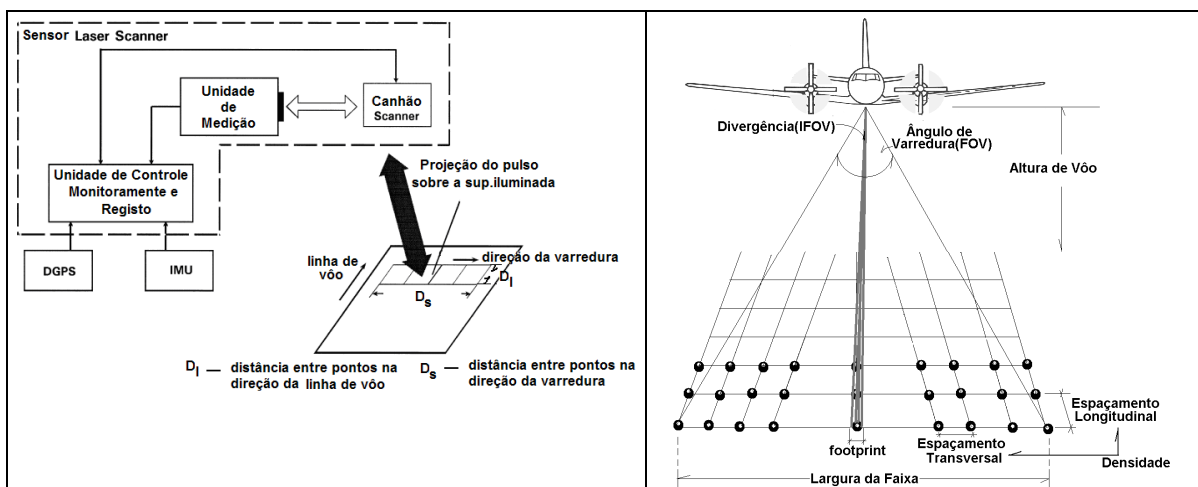


Figura 11 - Componentes principais do laser scanner
Fonte: WEHR & LOHR (1999)

Fonte: BRANDALIZE (2004)

BRANDALIZE (2004) descreve o funcionamento de um sistema de varredura laser por modelos matemáticos que, em última análise, traduzem a resultante da eficiência dos principais componentes eletrônicos internos que atuam no ALS. São;

a) IFOV - divergência do feixe Laser (γ)

É o ângulo sob o qual o feixe laser se espalha após ter sido emitido. Este é função do comprimento de onda (λ) e do diâmetro de abertura do laser (d). Diversos autores, entre eles WEHR & LOHR (1999), o denomina IFOV - termo em inglês para *Instantaneous Field of View*. A unidade de medida atribuída ao IFOV é um submúltiplo do radiano (rad), normalmente, o miliradiano (mrad). BALSAVIAS (1999) define a divergência mínima do feixe laser (limitada pela difração) por:

$$\gamma = 2,44 \frac{\lambda}{d} \quad (2.1)$$

λ comprimento de onda

d diâmetro de abertura do laser

O comprimento de onda do Laser (λ) é função do tipo de laser usado. Geralmente é um laser de estado sólido do tipo Nd:YAG, Nd:YLF ou Nd:YVO4. A unidade de medida é um submúltiplo do metro (m), normalmente, o nanometro (nm) ou o micrometro (mm).

b) largura da faixa de varredura (L)

É função da altura de vôo (H) e do ângulo de varredura (θ) e a unidade de medida é o metro (m). A largura da faixa de varredura, determinada a partir de relações trigonométricas, é expressa por:

$$L = 2H \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.2)$$

H altura de vôo

θ ângulo de varredura

A altura de vôo (H) corresponde à distância vertical máxima entre a plataforma do sensor laser e a superfície do terreno. Por esta razão, depende do tipo de plataforma e do sistema ALS utilizados. Uma vez que existem regulamentações quanto a possível exposição de seres humanos à radiação laser emitida por este tipo de sistema, existem especificações também para a altura de vôo mínima. Sua unidade de medida é o metro (m).

O ângulo de varredura (θ) corresponde ao ângulo máximo de abertura ou giro do scanner. Diversos autores, entre eles AXELSSON (1999), referem-se ao ângulo de varredura como FOV (*Field of View*). Sua unidade de medida é o grau ($^{\circ}$).

c) número de pontos por linha varredura (N_p)

Expressa o número de pontos laser coletados a cada linha de varredura pelo sensor laser. É função da taxa de repetição do pulso laser (F) e da frequência de varredura (f_{sc}). Assim, para BALTSAVIAS (1999), o número de pontos por linha de varredura é definido por:

$$N_p = \frac{F}{f_{sc}} \quad (2.3)$$

F taxa de repetição do pulso laser

f_{sc} frequência de varredura

A taxa de repetição do pulso laser (F) expressa o número de pulsos emitidos por segundo. É freqüentemente designada pelas siglas PRF (acrônimo para o termo em inglês *Pulse Repetition Frequency*) ou PRR (acrônimo para o termo em inglês *Pulse Repetition Rate*). Sua unidade de medida é um múltiplo do hertz (Hz), normalmente, o quilohertz (kHz). E a frequência de varredura (f_{sc}) frequência do scanner, expressa o número de vezes que o scanner percorre o FOV (movimento de ida e volta) em um segundo. Sua unidade de medida é o hertz (Hz).

d) Densidade de Pontos (D)

Expressa o número de pontos laser amostrados por unidade de área. Para ACKERMANN (1999), a densidade é função; da altura de vôo (H), velocidade de

cruzeiro da aeronave (v), do ângulo de varredura (θ), da taxa de repetição do pulso laser (F), da direção do vôo e do tipo de terreno levantado. Sua unidade de medida são pontos por metro quadrado (pontos/m^2). BALTSAVIAS (1999) afirma que a densidade de pontos por unidade de área, para uma única faixa de vôo, é expresso por:

$$D = \frac{F}{2H \operatorname{tg}(\theta/2)v} = \frac{F}{L_v} \quad (2.4)$$

v velocidade de cruzeiro

e) Espaçamento Longitudinal dos Pontos (D_{LONG})

É o espaçamento de observações realizadas pelo sensor laser ao longo da linha de vôo. É função da freqüência de varredura e da velocidade da plataforma. A unidade de medida é o metro (m). O espaçamento longitudinal dos pontos laser coletados é definido por:

$$D_{\text{long}} = \frac{v}{f_{sc}} \quad (2.5)$$

Em relação à linha de vôo. É função da altura de vôo, da taxa de repetição do pulso laser e do ângulo e freqüência de varredura (f_{sc}) afirma BALTSAVIAS (1999). A unidade de medida também é o metro (m). O espaçamento transversal dos pontos laser é:

$$D_{\text{trans}} = \frac{2H \operatorname{tg}(\theta/2)}{F} f_{sc} = \frac{L}{N_p} \quad (2.6)$$

f) Diâmetro do Pulso Laser sobre a Superfície do Terreno (D_P)

É função da altura de vôo e da divergência do feixe laser. Sua unidade de medida é o metro (m). Para BALTSAVIAS (1999) e WEHR & LOHR (1999), a área da superfície do terreno iluminada pelo pulso laser varia com o ângulo de varredura e com o tipo de terreno levantado. De acordo com estes mesmos autores, o diâmetro da projeção do laser (*laser footprint*) sobre o terreno, no

caso de terreno plano e ângulo de varredura igual a zero (posição de perfilamento), é definido por:

$$D_p = H\gamma \quad (2.7)$$

O ALS pode gerar os pontos que subsidiam os algoritmos dos Modelos Digitais de Terreno (MDT), fornecer acurácia das medições necessárias ao levantamento de uma região e agregar informações às tradicionais técnicas da fotogrametria, sensoriamento remoto e topografia eletrônica. São exemplos de aplicações; a modelagem denominada 3D City, a malha viária de projetos tradicionais da engenharia civil tais como o mapeamento de linhas de transmissão da energia elétrica, a extração automática de feições e os subsídios necessários à classificação de imagens aéreas e orbitais. Porém, segundo CROMBAGHS et al. (2002), BRETAR et al. (2003), a limitação do ALS está no fornecimento de coordenadas tridimensionais e a imagem de intensidade. Há, portanto, necessidade de combinar as medições realizadas pelo ALS às imagens obtidas de fotografias aéreas, ou mesmo, da coleção de imagens de intensidade gerada pelo próprio ALS com o propósito da fotointerpretação. Para BRANDALIZE (2004), o local da superfície do terreno atingido por um pulso laser só pode ser "visto" se o sistema ALS for capaz de capturar a intensidade de cada um dos seus retornos. AXELSSON (1999), por outro lado, afirma que as imagens de intensidade têm resolução espacial e radiométrica limitadas se comparadas às fotografias aéreas obtidas por técnicas fotogramétricas convencionais.

Logo, a compreensão do sistema de funcionamento do sensor laser mostra que a capacidade produtiva do ALS de gerar arquivos de coordenadas tridimensionais e a imagem de intensidade voltados para a superfície amostrada incorpora à outras tecnologias consagradas eficiência de medição e volume de registro de dados.

2.4 O SISTEMA ALS – FUNCIONAMENTO E AMBIENTE

KRAUS (2002) admite que o princípio do laser scanner pode ser definido por duas características cruciais, as figuras 12a e 12b ilustram respectivamente:

- a) pelos feixes luminosos de vetores 3D posicionado pela tecnologia GPS e orientado pela IMU e
- b) sensores ativos

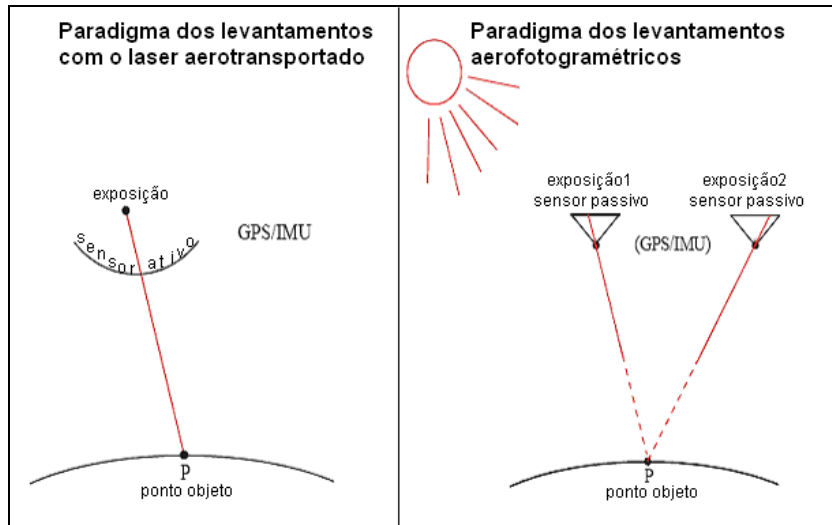


Figura 12a- Aerolevantamento com o ALS
Fonte: KRAUS (2002)

Figura 12b- Aerolevantamento com a câmara aérea

A aerofotogrametria, no entanto, apresenta três elementos importantes:

- a) dois feixes luminosos que interceptam no espaço-objeto;
- b) sensores passivos e
- c) a tecnologia GPS e a IMU são opcionais

Particularmente, nas regiões de sobreposição lateral, KRAUS (2002) acusa erros posicionais que superam cinquenta centímetros. Os efeitos verificados no aerolevantamento podem ser contornados ao adotar o *georreferenciamento*. Qual seja, rotinas que realizam o ajuste de faixas como unidade independente são adotadas e implementadas com sucesso. Os pontos de apoio suplementar (*tie points*) são obtidos automaticamente. Nas extremidades do bloco, pontos de apoio planimétrico são introduzidos para atribuir ao bloco de imagens a devida adequação geodésica.

MOSTAFA et al. (2000) confirmam a confiabilidade do método do *georreferenciamento* ao adotar para o levantamento fotogramétrico tradicional um sistema - Applanix POSTM/AV 510 System (acrônimo para o termo em inglês *Position and Orientation System for Airborne Vehicles*). O dispositivo eletrônico combina tecnologia GPS e a unidade de medição inercial anexo à câmara fotogramétrica.

AXELSSON (1999) mostra propriedades do sistema de laser scanner produzido pela Saab TopEye. O autor afirma que o sensor tem a capacidade de emitir um feixe luminoso de 7 kHz, através do qual são tomadas as distâncias compreendidas entre o sensor e a superfície física e, ao fim, atribui a coordenada a cada ponto por cada pulso registrado.

Se o LIDAR estiver distante do solo entre 50 a 500 m poderá medir objetos menores do que 0.1 m de diâmetro e registra a densidade de amostra de 0.25 a 2 m. O pulso do laser emitido faz um traçado sobre a superfície do terreno semelhante a um zigue-zague acompanhe a ilustração na figura 13. A posição e a atitude do helicóptero são determinadas pelo registro do GPS diferencial e a unidade de medição inercial ou também denominada sistema de navegação inercial. Os pontos de apoio terrestre são medidos com uma acurácia nominal de 0.1 m.

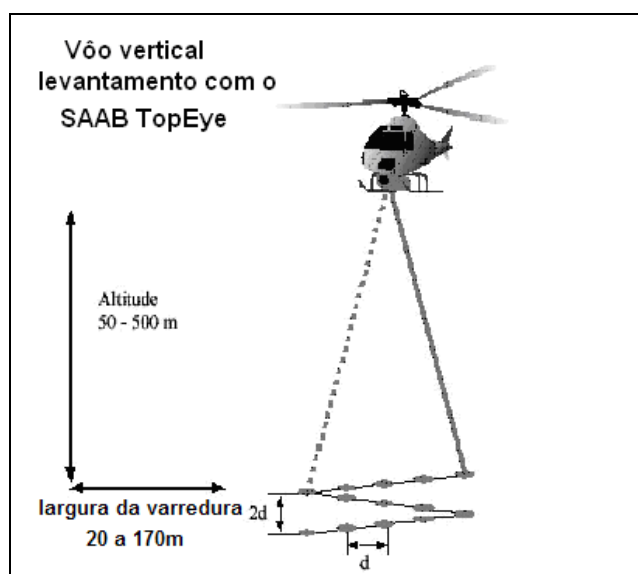


Figura 13 – Levantamento aéreo com o sistema APPLANIX

Fonte: AXELSSON (1998)

O sistema TopEye registra, ainda, a amplitude do eco do pulso do laser. A amplitude depende da propriedade de reflectância da superfície dos objetos além dos dados de elevação. Resulta invariavelmente em uma imagem 3D. O uso de índices de reflectância é muito útil afirma SLOBODA (2005) e AXELSSON (1998). Principalmente em terrenos planos com topografia suave de diferentes coberturas da superfície física e/ou superfície pavimentada com revestimento primário (cascalho), por exemplo.

AXELSSON (1998) explica ainda que outros sensores além do ALS podem ser montados na mesma plataforma orientada, tais como a câmera Daedalus digital, clichê com resolução radiométrica de 2Mb x 2Mb pixels. As duas vantagens de contar com o ALS na mesma plataforma do que a câmara aérea são; as imagens são orientadas sem qualquer procedimento de orientação externa e é possível combinar os arquivos de pontos e imagem de intensidade do ALS com fotografias aéreas digitais, pontos de elevação e/ou imagens obtidas de plataformas orbitais.

Há duas formas de emissão laser; um pulso ou um sinal contínuo. O sistema de pulso é mais comum e baseia-se na emissão e recepção de curtos pulsos de energia para os quais, pulsos de alta energia em intervalos curtos de tempo e ajustamento com pequenas aberturas, conferem elevada precisão. O sistema de onda contínua, conhecido como CW, acrônimo da expressão em língua inglesa - *Continuous Wave*, funciona a partir da medição da diferença de fase entre o sinal emitido e o recebido. Segundo WEHR & LOHR (1999) há cerca de cinco anos, aproximadamente, havia somente um sistema aerotransportado equipado comercialmente com o sistema ondas contínuas, onde na Alemanha a Universidade de Stuttgart foi uma das precursoras da tecnologia.

WEHR & LOHR (1999) afirmam que os lasers com emissão de pulso são geralmente lasers no estado sólido, que produzem alta potência. Podem ser produzidos com luz dos tubos do flash do Xe (gás nobre do elemento químico xenônio), lâmpadas do metal-vapor e diodos do laser aplicados especialmente para canhões de lasers aerotransportados. O tipo comum é o (elemento químico Neodímio): Laser de YAG, com larguras do pulso de 10 -15 ns, comprimento de onda de 1.064 nm e pico de potência até diversos MW.

O resultado da realização de uma varredura (perfilamento) obtém-se uma nuvem de pontos de elevada densidade, que varia, sobretudo, em função do tipo de scanner utilizado, da velocidade do aeroplano e da topografia do terreno.

O perfilamento da superfície amostrada pode ser uni ou bi-direcional, existindo diferentes opções para se efetuar o redirecionamento do feixe do laser, como por exemplo, o uso de espelhos móveis. Entre as opções disponíveis está o uso de um espelho oscilante que produz uma seqüência de linhas paralelas ou traçado assemelhado ao “zig-zag”. A figura 14 ilustra a varredura do espelho que adota o sistema Palmer Scanner. Utiliza um espelho que gira em torno de seu centro e produz um padrão elíptico e o espelho em forma de polígono rotatório, que produz linhas paralelas.

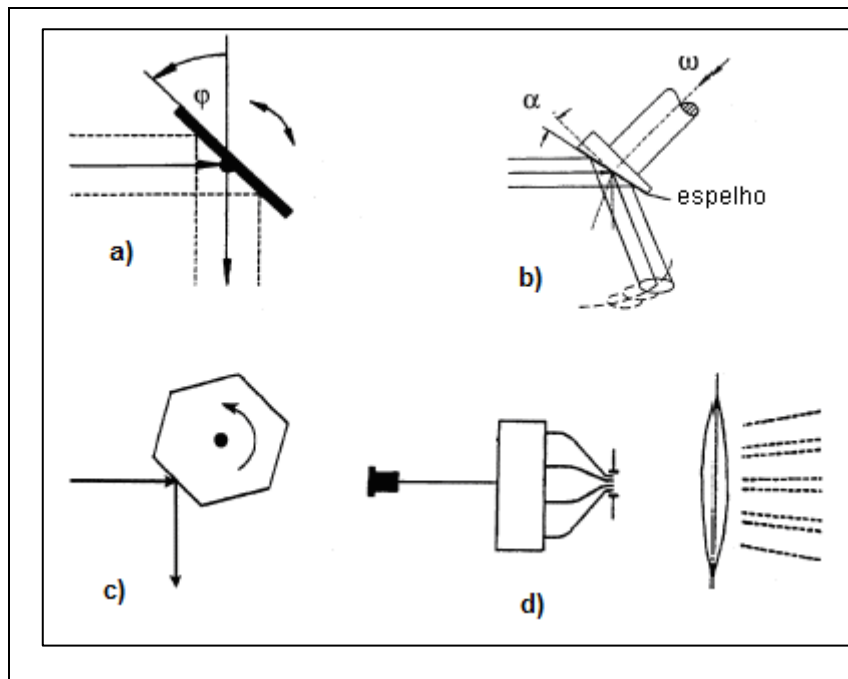


Figura 14 – Mecanismos de escaneamento (no sentido horário a partir do canto superior esquerdo): a) espelho oscilatório, b) sistema Palmer, c) polígono de rotação e d) escanner de fibras.

Fonte: WEHR e LOHR(1999)

O sistema de varredura por fibras apresenta um modelo único no mercado. A figura 15 mostra um diagrama do funcionamento que opera com fibras ópticas. Este sistema consiste num arranjo de fibras ópticas usado tanto para emitir como para medir o sinal. Neste caso, o redirecionamento do feixe é feito como uso de um espelho rotativo que possibilita registrar a energia proveniente de uma linha inteira com o arranjo de fibras ópticas montadas no plano focal da emissão e recepção. A emissão e a recepção óptica são idênticas, pois há uma camada igual de fibras ópticas nos planos. Este sistema confere ao aparelho alta velocidade de escaneamento e precisão.

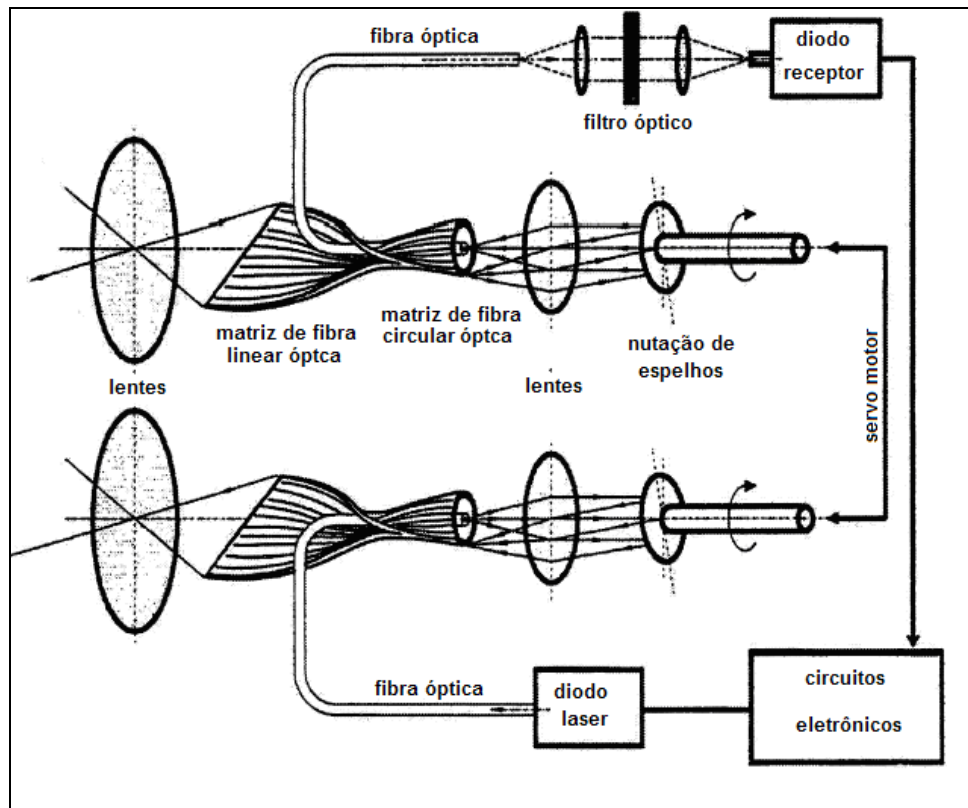


Fig. 15 - Varredura por fibras
 Fonte: WEHR e LOHR(1999)

O padrão do perfilamento do sensor sobre a superfície terrestre depende não somente do modelo padrão da varredura do laser, mas também o sentido do vôo e a velocidade da aeronave sobre a superfície do terreno. Os pontos ao longo de uma linha são feitos geralmente em etapas iguais ao ângulo, i.e., seu afastamento da terra não é constante. Devido à aceleração ou redução do mecanismo que controla a velocidade de

propagação de pulsos, os pontos nas bordas da faixa exibem medições eivadas de distorções e são removidos, às vezes, da série de dados brutos.

A vantagem da varredura da fibra (usado somente nas engrenagens do sistema TopoSys) é que a emissão e a recepção do sistema ótico é idêntico. Uma configuração idêntica da linha da fibra é montada no plano focal das lentes de recepção e emissão. A varredura seqüencialmente e sincronizadamente é feita por meio de dois espelhos realizando movimentos circulares, cada fibra do instrumento guia os sinais de transmissão/recepção.

2.5 ERROS SISTEMÁTICOS DAS OBSERVAÇÕES - ALS

GEMAEL (1994) afirma que o propósito do processo de ajustamento de observações é a estimativa da precisão da solução adotada. E a busca pela precisão das medidas deve acolher um pressuposto; *“toda medida conduzida pelo homem caracteriza-se pela presença inevitável de erros”*. Os erros que afetam as observações produzidos pelas influências das condições ambientais e/ou introduzidos pelos procedimentos e instrumentos ou sistemas de medição e podem ser mensurados por modelados matemáticos são denominados de erros sistemáticos.

As coordenadas tridimensionais obtidas do perfilamento com o ALS são estimadas para o datum internacional WGS-84. Porém, as observações de regiões com elipsóide diferente do padrão podem agregar resíduo ao submeter os modelos matemáticos de transformação do WGS-84 para o elipsóide de referência local. Inclui, ainda, correções para as ondulações geoidais. Além disso, o afastamento, a posição e o feixe luminoso de direção emitido pelo laser são medidos por diferentes sensores, por menor que seja a perda de registro do tempo, pode, eventualmente, influenciar nos resultados.

As medições apuradas com o ALS dependem da eliminação dos principais erros sistemáticos. São elencados a seguir os três fatores principais:

- ✓ erro devido ao deslocamento compreendido entre o objeto e o sensor (R)
- ✓ erro devido à posição f_0 (feixe de laser) do sensor laser e,

✓ erro devido à direção do laser.

HODGSON et al. (2005) e MOSAIC (2001) afirmam que muitos fatores contribuem para a influência dos erros decorrentes da medição do ALS. São; os componentes operacionais do processo de rastreamento da constelação de satélites GPS, os resíduos inerentes às medições atribuídas ao emissor/receptor laser e a unidade de medição inercial. Outros fatores que afetam a precisão das observações estão relacionados; ao planejamento de vôo, à influência das condições atmosféricas, à ondulação do relevo e à cobertura vegetal. O anexo 01 reproduz uma tabela mais completa do que àquela construída por MOSAIC (2001). A principal diferença recai sobre o componente que origina todos os valores atribuídos às fontes de incerteza. Enquanto MOSAIC (2001) destaca as características do relevo, BALTSAVIAS (1999) considera diferentes ângulos de varredura. A tabela 2.1 reproduz a precisão nominal esperada para um aerolevante, a depender das condições da superfície amostrada.

HODGSON et al. (2005) e MOSAIC (2001) sustentam que a estimativa do grau de incerteza nas medições decorrentes do perfilamento com o LIDAR prescinde de uma distribuição de pontos sobre a superfície amostrada.

Tabela 2.1 – Precisão nominal do levantamento com o ALS

Precisão típica ao nível de confiança de 95%(2 σ)		
Superfície amostrada	Vertical(m)	Horizontal(m)
solo exposto com relevo plano	0,15	0,50 a 0,75
cobertura vegetal com relevo variando de plano a ondulado	0,25	0,50 a 0,75
cobertura vegetal com relevo escarpado	0,30 a 0,50	0,50 a 0,75(*)

relevo plano - declividades predominantes entre 0 e 3%.

relevo ondulado - composto de elevações de topos tabulares, amplos, bastante suavizados e vertentes longas com declives que variam entre 3 e 8%

relevo escarpado - com declividades predominantes entre 8 e 20%; a densidade de drenagem é moderada, com vales relativamente profundos e estreitos.

(*) depende da altura de vôo e amplitude da divergência do feixe

Fonte: Mosaic Mapping Systems Inc.(2001)

2.5.1 Erro devido ao deslocamento compreendido entre o objeto e o sensor (R)

Porém BALTSAVIAS (1999) lembra que, para duas situações em particular, a importância relativa com respeito à influência total do erro devido à medida do deslocamento compreendido entre o objeto e o sensor aumenta. Quando:

- a) as alturas de vôo são inferiores a 500 m e,
- b) os ângulos de varredura são menores do que 5° ,

O sincronismo é apontado como um tema que merece especial atenção em razão do funcionamento do ALS, porque os três componentes do sensor – GPS, IMU e o emissor laser, embora de naturezas e arquiteturas distintas, precisam contar com absoluta sincronia dos sinais emitidos.

Sincronismo é o processo usado para fornecer um sinal de referência de tempo (relógio) comum a diversos circuitos ou equipamentos de uma rede. Na rede SDH (acrônimo do termo em inglês; *Synchronous Digital Hierarchy*) a referência de sincronismo é usada pelos relógios internos de escrita existentes nos elementos da rede, sendo responsável pela temporização dos circuitos que processam as informações para a transmissão do sinal digital. Na rede SDH o sinal de sincronismo pode ser analógico (sinal senoidal de 2048 kHz) ou digital (trem de bits de 2048 kbit/s).

A arquitetura da rede deve também ser projetada para garantir a distribuição do sinal de sincronismo mesmo em caso de falha. Os eventos mais comuns são o ajuste de ponteiros e a manutenção ou não da referência de tempo pelos relógios dos equipamentos SDH, no caso de alguma falha na rede de sincronismo.

Os fenômenos mais comuns são o *jitter*, relativos às variações discretas de frequência dos sinais digitais ao longo do tempo, e os *loops* de sincronismo em algumas regiões da Rede SDH.

O *jitter* é um fenômeno definido como uma variação de fase do sinal digital com frequência maior do que dez hertz. Já o *loop* de sincronismo acontece quando a lógica de transferência do sinal de sincronismo entre os elementos de um anel SDH é equivocada. Adota-se o esquema de transferência do sinal de sincronismo

unidirecional, ou seja, a partir do elemento com fonte externa de relógio, o sinal de sincronismo é transferido um a um para todos os elementos até retornar novamente ao elemento inicial (*loop*).

BALTSAVIAS (1999) afirma que a possibilidade de determinar a influência dos erros devido às observações do pulso do laser depende principalmente dos seguintes fatores:

- a) a capacidade de selecionar a mesma posição relativa do pulso emitido e recebido para medir o intervalo do tempo, propriedade, via de regra, limitada pelo ruído de emissão e reprodutividade do pulso do dispositivo emissor do sensor. O fator principal envolvido no cálculo da acurácia é a época de ascensão do pulso. Um pulso típico do laser (com uma duração de 10 ns) tem uma ascensão de aproximadamente 1 ns (corresponde ao comprimento de onda de extensão 30 cm ou alcance linear de 15 cm). O tempo de ascensão do pulso (termo em inglês para *steepness*) independe da largura do pulso. Para um detector, o tempo de ascensão depende do comprimento de onda da luz incidente e da resistência da carga. Entretanto, embora o tempo de ascensão pequeno requeira a resistência baixa de carga, a sensibilidade elevada requer o oposto. Assim, o *steepness* do pulso pode ser aumentado segundo a largura de faixa do receptor. WEHR & LOHR (1999) afirmam que a propriedade da medida do afastamento é inversamente proporcional a relação sinal e ruído (S/N);
- b) a imprecisão atribuída ao tempo de espera do sistema, contador de frequência agrava o erro devido à deriva e;
- c) a imprecisão atribuída ao contador do intervalo de tempo (*bit jitter*) tem uma resolução de 0.1 ns (valores típicos praticados de 0.05 a 0.2 ns). Corresponde a resolução da medida do sinal de 1,5 cm.

WEHR & LOHR (1999) asseguram que os efeitos dos elementos ópticos (espelhos, abertura óptica etc.) influenciam na medida do deslocamento. Os efeitos incluem os seguintes componentes: a) reflexão da luz para o sensor, irradiação solar; b) atenuação da luz ao passar por uma janela ou reflexo da luz no espelho; c) espalhamento de luz por uma janela ou espelho (causada também pelas imperfeições na superfície e/ou no

corpo do elemento óptico) ou, devido a d) suavização do raio luminoso através de uma janela.

A janela curva (pode causar falta de focalização do raio transmitido e recebido). O detector do laser é projetado de modo a atender três princípios básicos:

- a. detectar o sinal do comprimento de onda do raio luminoso;
- b. captar possíveis ruídos (luminosos) gerados pelo detector eletrônico;
- c. ter eficácia na velocidade de resposta para o sinal luminoso.

A principal fonte de ruídos nos detectores, a partir da emissão (do sinal e corrente escura) são ruídos termiais (chamados de Johnson), que é proporcional a raiz quadrada da amostra (medida), e o ruído $1/f$ (chamado de ruído adicional, desde que exceda o ruído de baixa frequência). Além do ruído, há outros fatores que afetam a medida de distância. A mais significativa delas é a amplitude do sinal recebido (que também depende da refletividade do alvo e da superfície normal local), mistura de ecos devido à estrutura vertical do alvo (vegetação em terreno descontínuo ou rugoso, para citar um exemplo) ou múltiplos alvos com o ponto projetado do laser (quer dizer, pequenos reflexos de alta intensidade nas bordas do ponto projetado) ou média de ciclos sobre superfícies descontínuas ao adotar o sistema de CW.

O nível de temperatura e luz ambiente pode afetar a qualidade da medição de distância, mas este efeito é geralmente compensado e controlado. Se as precauções para estas propriedades físicas forem devidamente tomadas, a qualidade da medida terá uma dependência discreta sobre a distância ao alvo.

2.5.2 Erro devido a estabilidade do posicionamento do ALS no momento da medição

O erro devido a estabilidade do posicionamento do ALS no momento da medição depende de fatores ligados ao hardware do GPS, comportamento da constelação do GPS durante o aerolevanteamento, número, distribuição, e distância das estações de referência terrestre (devem ser praticados valores entre 10 e 100 km) e os desalinhamentos envolvendo o GPS, a unidade de medição inercial e o laser, e, finalmente, a precisão da direção de varredura do laser.

2.5.3 Erro devido a atitude do ALS

O erro devido a atitude do ALS depende; a) da qualidade das precisões das medições devido a sintonização e sincronização realizadas com a IMU e b) software de pós-processamento e integração com o GPS. O efeito do erro de atitude na precisão 3D aumenta proporcionalmente com a altura de vôo e a dimensão do ângulo de varredura adotado durante o aerolevanteamento.

2.5.4 Erro devido ao registro do tempo

A obtenção da posição 3D acurada, orientação, posição e distância medida deve ser tomado simultaneamente. Se houver um intervalo (**offset**) do registro do tempo relativo a operação simultânea com o GPS, a IMU e o ALS e não for precisamente conhecido. Ocorrerá um erro variável.

2.5.5 Influência de várias fontes de erros na precisão das coordenadas 3D

Admite-se que a superfície é plana e a varredura é realizada no plano vertical voltado para a direção a linha de vôo. A pressuposição é realmente válida exceto para a varredura elíptica realizada com o espelho Palmer. Admite-se, ainda, que os ângulos ω (rotação na direção da linha de vôo) e ψ (a rotação em torno da direção transversal a direção de vôo) são zero; vôo horizontal. A rotação do ângulo κ (a rotação em torno do eixo vertical) pode assumir qualquer valor.

A figura 16 ilustra um sistema dextrógiro para x, y e z centrado na origem da fonte do laser (centro do espelho do laser) e um sistema dextrógiro coordenada para o objeto X, Y e Z com origem no nadir para a origem do sistema de coordenadas. O eixo X é positivo na direção da linha de vôo. O erro de atitude refere-se aos erros $\Delta\omega$, $\Delta\psi$ e $\Delta\kappa$ de rotação em torno dos respectivos eixos do sistema de coordenada local. κ é a rotação de X para o eixo x. β é o ângulo de varredura, $\beta \in \left[\frac{\theta}{2}; -\frac{\theta}{2}\right]$; quer dizer tem valores positivos para varredura da esquerda para a direção da linha de vôo, senão negativa. Além de contar com a influência devido ao afastamento entre o objeto e o sensor (ΔR) e a influência dos erros posicionais (Δx_0 , Δy_0 e Δz_0) devido à origem ao feixe de laser.

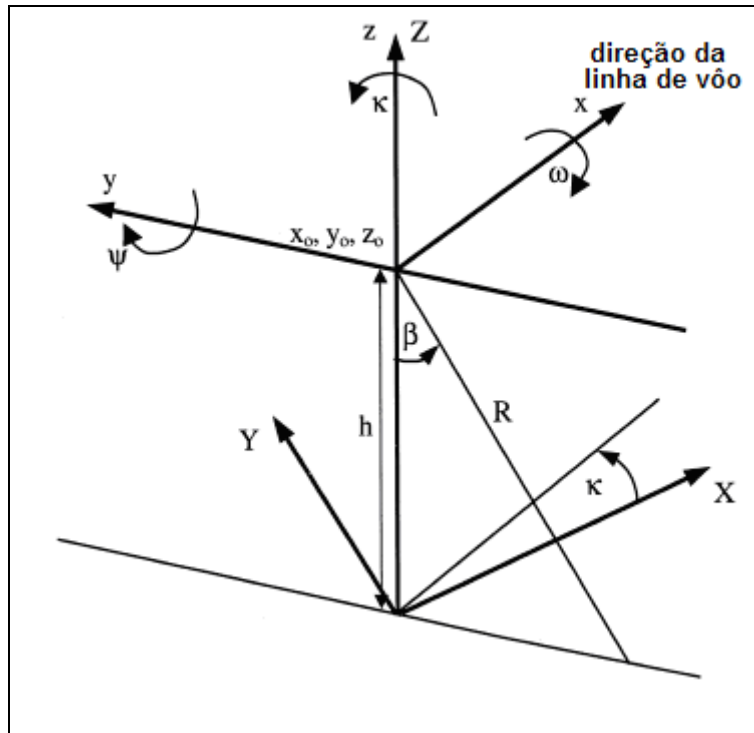


Fig.16 - Os subsistemas do laser
 Fonte: BALTSAVIAS(1999)

É importante assinalar a ocorrência de erros sistemáticos associados à todos os principais componentes do ALS com características e intensidades distintas. O entendimento dos distúrbios que afetam os componentes de um sistema de varredura laser e a quantificação do impacto destes distúrbios sobre as medidas permitem desenvolver estratégias adequadas de coleta e processamento dos dados e assegurar a acurácia, a fidelidade e a completude das informações. SANHUEZA (2007, p.18) sustenta que a principal dificuldade para minorar a influência dos erros sistemáticos nos dados do sensor LASER é a variedade das potenciais fontes de erros devido à integração entre os três componentes posicionais do sistema.

2.6. AJUSTAMENTO DE FAIXAS DE VÔO

O ajustamento de faixas de vôo é um procedimento singular no perfilamento com o ALS, pois não obstante as falhas decorrentes do lapso de tempo de transmissão causado pela falta de sincronia dos sinais emitidos pelo receptor GPS, a unidade de

medição inercial e o emissor/recetor do sensor no instante da emissão do pulso de laser, a varredura da superfície terrestre não prescinde de um modelo de ajustamento apropriado. HABIB & SCHENK (1999) e BURMAN (2002) propõe a modelagem e correção das principais fontes de erros de orientação apontados por BURMAN (2000), CROMBAGH (2000) e MAAS (2000). BURMAN (2000) defende que os erros decorrentes do levantamento com o ALS têm naturezas distintas, porque há objetos que não refletem o feixe do laser, existem falhas na estimativa do comprimento do laser e na orientação do vetor do feixe luminoso.

Por outro lado, atribui-se a existência de erros:

- ✓ ao movimento de varredura do instrumento, particularmente, às falhas do registro do ângulo que o espelho realiza durante o perfilamento;
- ✓ as coordenadas posicionais obtidas com o rastreamento da constelação de satélites, sobretudo, a NAVSTAR - GPS, tradicionalmente são susceptíveis ao atraso atmosférico, erros de ambigüidade, multicaminhamento e perda de sinal e;
- ✓ às rotações, pois são medidas por uma unidade de medição inercial que consiste de três acelerômetros em três eixos ortogonais e três osciloscópios que medem as taxas de rotação em torno dos três eixos. Ambos acelerômetros e giroscópios são afetados pela deriva do tempo. Estes erros causam imprecisões nos ângulos de rotação e, conseqüentemente, na orientação do ALS.

KAGER (2003), KAGER (2004), de outro modo, propõe a correção das discrepâncias verticais nas zonas de sobreposições laterais entre faixa de vôo do sensor laser com algumas medidas; são a correção dos elementos da orientação exterior e interior registrados pelo receptor GPS e pela unidade de medição inercial bem como a estimativa das coordenadas dos pontos de apoio suplementar (similar aos *ties points* na aerofotogrametria) realizados ao longo do perfilamento. RIES et al. (2002) praticaram atividade similar ao substituir as observações terrestres pela imagem de intensidade multiespectral obtida com o ALS.

2.6.1 Equação geral do laser

O modelo matemático é apresentado por LOHMAN (2000) para a transformação dos parâmetros entre os sistemas de referência que integram o ALS:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + R(a, b, c) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

onde:

$$R(a, b, c) = R_3(c).R_2(b).R_1(a)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}$$

coordenadas terrestres do ponto iluminado

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}$$

coordenadas terrestres de origem do referencial local

$$R_1(a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a & -\text{sena} \\ 0 & \text{sena} & \cos a \end{bmatrix} \quad R_2(b) = \begin{bmatrix} \cos b & 0 & \text{senb} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{senb} & 0 & \cos b \end{bmatrix} \quad R_3(c) = \begin{bmatrix} \cos c & -\text{senc} & 0 \\ \text{senc} & \cos c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A equação geral de funcionamento do ALS contempla três sub-sistemas correspondentes aos três principais componentes do equipamento; a IMU, o receptor GPS e o emissor/receptor laser. A figura 17 esclarece a combinação das medições dos componentes internos do ALS e revela a origem do sistema de referência local. O sistema ideal não contempla a existência de erros sistemáticos ou falta de sincronia entre os dispositivos de medição. A equação 2.9, LOHMAN (2000) expressa as observações em função dos seguintes parâmetros;

- a) translação(X_0) - base estacionária terrestre do GPS,

b) matrizes de rotação dos componentes internos do ALS - da IMU, do centro de fase da antena do receptor GPS aeronavegado e o canhão do laser,

Porém, equação 2.10 é mais completa e compreende um número maior de parâmetros para a solução da expressão matemática. São incorporados às incógnitas descritas no itens (a) e (b) os seguintes elementos;

- a) componentes do desvio da vertical
- b) componente devido a atitude combinada da IMU/ALS
- c) fator de escala aliado às atitudes de a, b e ao comprimento do feixe luminoso

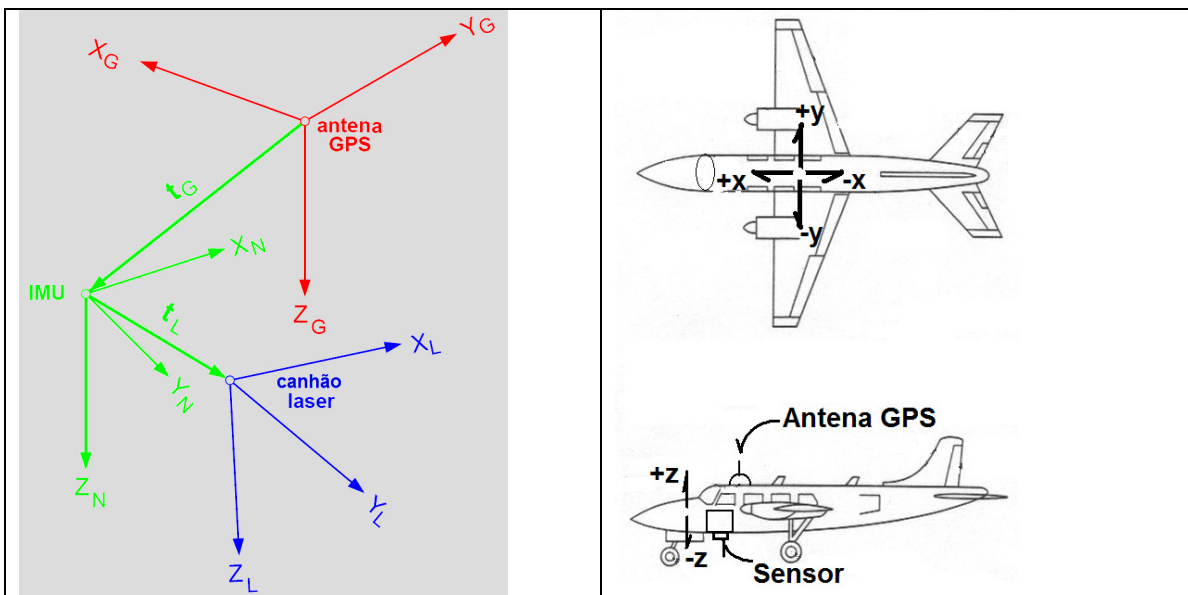


Figura 17 – Três sub-sistemas de funcionamento do ALS e a origem do referencial local
 Fonte: Adaptado de SCHENK (2001)

A equação geral do *laser scanner aerotransportado* é dada por:

$$\begin{aligned}
 X_{Lidar} = & X_{O_{terrestre}} + \\
 & + R(X_{ant.GPS}, Y_{ant.GPS}, Z_{ant.GPS}) \cdot R(r_{IMU}, p_{IMU}, h_{IMU}) \cdot (R(a_{canhão_laser}, b_{canhão_laser}, 0) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ fl \end{bmatrix} + \\
 & -t_l^{ALS_IMU} - t_G^{IMU_GPS})
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Sub-sistemas:

1) O *emissor/receptor laser ALS*:

- comprimento do feixe luminoso(fl)
- atitude do scanner decorrente dos ângulos de inclinação em relação aos eixos $X_{\text{canhão_laser}}(a)$ e $Y_{\text{canhão_laser}}(b)$

2) a *unidade de medição inercial IMU*:

- atitude do scanner decorrente dos ângulos de inclinação em relação aos eixos $X_{\text{IMU}}(r)$ e $Y_{\text{IMU}}(p)$ e $Z_{\text{IMU}}(h)$

3) O *sistema de rastreamento de satélites artificiais GPS*:

- coordenadas da antena do receptor GPS: $X_{\text{ant.GPS}}$, $Y_{\text{ant.GPS}}$, $Z_{\text{ant.GPS}}$ (coordenadas cartesianas) ou $\phi_{\text{ant.GPS}}$, $\lambda_{\text{ant.GPS}}$ (coordenadas geográficas)

Adicionais aos subsistemas:

$t_i^{\text{ALS_IMU}}$ – vetor deslocamento do ALS para a IMU

$t_G^{\text{IMU_GPS}}$ – vetor deslocamento do IMU para a antena do receptor GPS

$R(X_{\text{ant.GPS}}, Y_{\text{ant.GPS}}, Z_{\text{ant.GPS}})$ - matriz de rotação do receptor GPS

$R(r_{\text{IMU}}, p_{\text{IMU}}, h_{\text{IMU}})$ - matriz de rotação da IMU

$R(a, b, 0)$ - matriz de rotação do emissor/receptor laser

X_{Lidar} - coordenada do ponto sobre a superfície iluminada

$X_{\text{O}_{\text{terrestre}}}$ - coordenada da origem do referencial local sobre a superfície física

Equação geral do *laser scanner aerotransportado* – situação real

$$X_{\text{Lidar}} = X_{\text{O}_{\text{terrestre}}} + \Delta X_{\text{O}_{\text{terrestre}}} +$$

$$+ R(X_{\text{ant.GPS}}, Y_{\text{ant.GPS}}, Z_{\text{ant.GPS}}) \cdot R(\Delta\eta, \Delta\zeta, 0) \cdot R(r_{\text{IMU}} + \Delta r, p_{\text{IMU}} + \Delta p, h_{\text{IMU}} + \Delta h) \cdot$$

$$R(m_r, m_p, m_h) \cdot (R((a_{\text{canhão_laser}} + \Delta a) \cdot s_a, (b_{\text{canhão_laser}} + \Delta b) \cdot s_b, 0) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (fl + \Delta fl) \cdot S_{fl} \end{bmatrix}) +$$

$$-(t_l^{ALS_IMU} + \Delta t_l^{ALS_IMU}) - (t_G^{IMU_GPS} + \Delta t_G^{IMU_GPS})) \quad (2.10)$$

Parâmetros de calibração:

ΔX_0	Variação da componente posicional do GPS
$R (\Delta\eta, \Delta\zeta, 0)$	Variação das componentes do desvio da vertical
$\Delta r, \Delta p, \Delta h$	Variação dos componentes angulares (atitude) da IMU
m_r, m_p, m_h	Componente dos sistemas IMU/ALS
$\Delta a, s_a$	Variação de a e fator de escala
$\Delta b, s_b$	Variação de b e fator de escala
$\Delta f_l, s_{f_l}$	Variação do comprimento do feixe luminoso e fator de escala
$\Delta t_l^{ALS_IMU}$	Variação vetor deslocamento do ALS para a IMU
$\Delta t_G^{IMU_GPS}$	Variação vetor deslocamento do IMU para a antena do receptor GPS

2.6.2 Análise sobre os métodos voltados para o ajustamento

Os métodos de ajustamento permitem, em última análise, estimar a influência dos resíduos nas observações realizadas pelo LIDAR. Um ajustamento simultâneo do bloco de faixas de aerolevante, desde que acrescido com injunções de posição, paralelismo e distância ou, expedientes assemelhados, permite recuperar os parâmetros geométricos necessários à reconstrução matemática da geometria perspectiva. O pressuposto básico para a correta parametrização matemática dos mesmos nas equações praticadas é a eliminação de todos os erros sistemáticos durante a calibração do sensor, etapa que antecede a cobertura aérea. FILIN & VOSSSELMAN (2004), WU et al. (2008), MORIN & EL-SHEIMY (2002), PFEIFER (2005) são exemplos na literatura que se debruçaram sobre o tema e alcançaram sucesso na produção de conhecimento voltado para a correção de resíduos que afetam as

medições decorrentes do perfilamento com o sensor laser. A seguir serão detalhados métodos distintos de ajustamento.

2.6.2.1 Método de ajustamento de Kornus e Ruiz

KORNUS & RUIZ (2003) relatam uma técnica para o ajustamento do bloco de faixas de aerolevanteamento que prevê o registro de localidades que recebem o termo *áreas de controle* – zonas com características planas tais como campo de futebol e pátio de estacionamentos e, sugerem ao planejamento de vôo, faixas transversais para aumentar a rigidez geométrica do bloco. A quantidade de pontos de apoio terrestre é definida em função do tamanho e o formato do bloco.

Admite que o processo de ajustamento corrija apenas o vetor de distorção vertical ao considerar a única fonte de variância no processo de varredura. As observações são detalhadas para três agrupamentos:

- a) grupo 1: vetor vertical decorrente da diferença entre as observações residentes nas áreas comuns às faixas de varredura transversal e longitudinal;
- b) grupo 2: vetor vertical decorrente da diferença entre as observações residentes nas faixas longitudinais de varredura e àquelas correspondentes às *áreas de controle*;
- c) grupo 3: vetor vertical decorrente da diferença entre as observações residentes nas pseudo-observações com os receptores GPS e àquelas correspondentes às *áreas de controle*.

O procedimento submetido ao primeiro grupamento cria uma malha regular de pontos para gerar o modelo digital de terreno com as observações geradas nas faixas transversal e longitudinal. A diferença vertical é estatisticamente analisada, os resíduos eliminados e a diferença média de altura é estimada.

Quanto ao segundo grupamento é análogo ao primeiro. Forma-se um malha regular e são obtidas as médias da diferenças verticais decorrente das observações geradas nas

áreas de controle e os respectivos pontos interpolados gerados pelo MDT. O sigma “à priori” do vetor peso é definido em função do desvio-padrão da média da diferença de altura e ao desvio-padrão dos pontos de apoio.

O procedimento dedicado ao terceiro grupamento estabelece como referência vertical a cota dos pontos que repousam sobre a área de controle. O sigma “à priori” do vetor segue o mesmo destino atribuído ao grupamento 2 (o exemplo de KORNUS & RUIZ (2003) oscilou entre 1 e 3cm). O modelo matemático adotado no ajustamento não é citado na fonte. A área do projeto de 200 km² de extensão compreende dois blocos A e B.

A amplitude da variação do vetor vertical alcançado por KORNUS & RUIZ (2003) subtrai uma importante revelação. A complexidade das mudanças de comportamento do sensor laser influenciado na realização de medições ora sob interferência da constelação GPS, ora pela intensidade do canhão emissor/receptor do laser, o reflexo nas medições é decorrente destas fragilidades do processo de varredura.

KORNUS & RUIZ (2003) advertem que os erros sistemáticos que afetam os resultados são provenientes, sobretudo, ao movimento de varredura do espelho do sensor e o intervalo de tempo dedicado à varredura. Por outro lado, o movimento de zig-zag identificado no bloco A é atribuído à problemas relacionados à falha na calibração do instrumento.

2.6.2.2 Método de ajustamento de Maas

A precisão de observações decorrentes da varredura realizada com o ALS segundo MAAS (2001) é influenciada, sobretudo, pela capacidade de integração do sistema GPS/IMU. Posto de outra forma, os erros de transmissão da correção diferencial do receptor GPS podem interferir com imprecisões que variam de 10 a 20 cm e, inevitavelmente, se propagam na estimativa da coordenada vertical. A precisão planimétrica das coordenadas no espaço-objeto são decorrentes também dos receptores GPS e devido a efeitos da deriva no sistema de navegação inercial.

Vários autores (KILIAN, 1996; CROMBAGHS et al., 2000; BURMAN, 2000; VOSSSELMAN & MAAS, 1999), sustentam que a geração da modelagem digital de superfície de pontos gerados do levantamento com o ALS, combinado com tratamento espectral da imagem de intensidade promove uma relativa melhoria na qualidade das medições. A figura 18, ilustra uma localidade onde repousam três faixas de varredura.

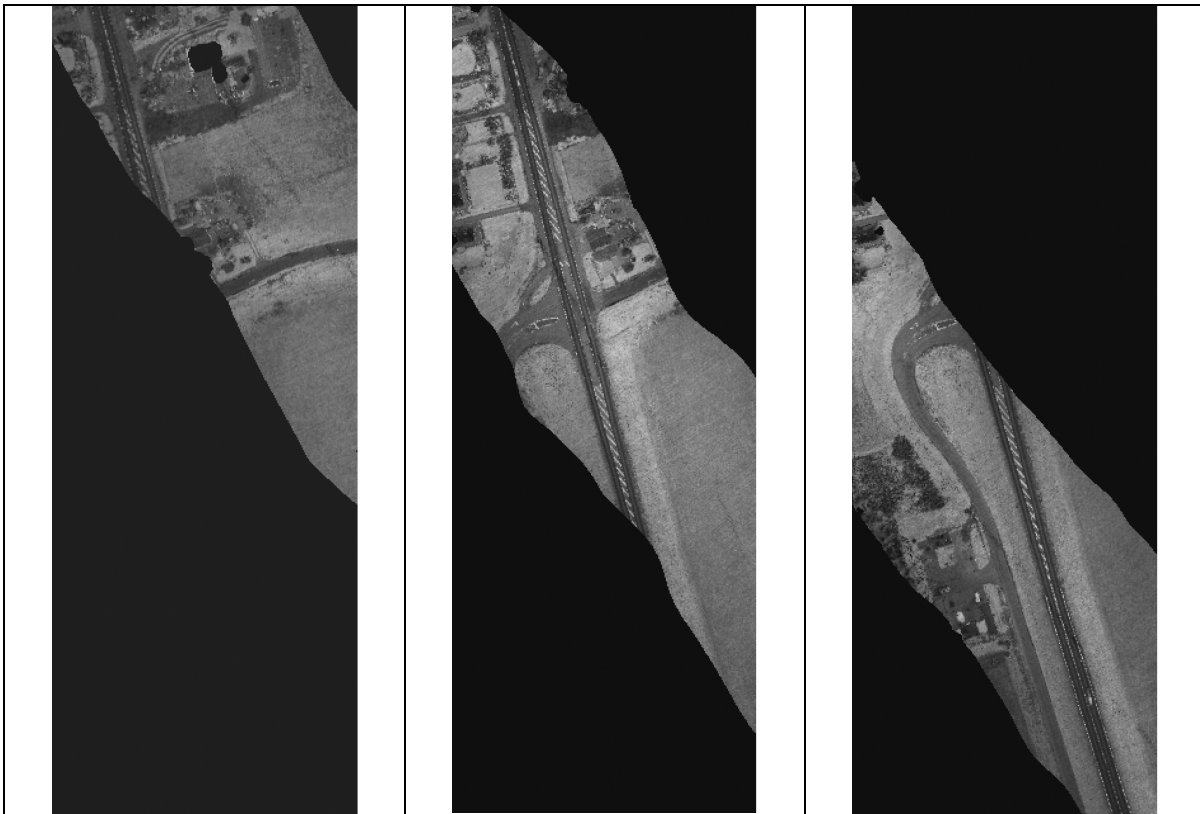


Figura 18 – Reflectância da imagem de intensidade de uma rodovia em três faixas
Fonte: MAAS (2001)

MAAS (2001) não detalha qual o modelo de ajustamento praticado ou rotina de filtro destinado a selecionar quais os pontos que repousam sobre a faixa de sobreposição lateral. O método é singular e deixa algumas arestas sem solução.

1. O registro de locais ou zonas selecionadas por MAAS (2001) dão margem à fragilidade do método, pois a imagem de intensidade gerada pelo sensor laser embora mostre eficiência na apuração de alvos espectrais, segundo citações na literatura; BEHAN, MAAS & VOSSSELMAN (2000) é pobre para revelar objetos discretos pontuais;

2. O equipamento registrou algumas medidas da varredura sem o funcionamento do IMU. Logo, a atitude do instrumento no momento da emissão não foi registrada.
3. O método é eficiente, se couber na cena digital; contraste e superfícies planas ou moderadamente movimentadas no recorte (círculo de aproximadamente 50m de diâmetro submetido ao ajustamento).
4. Não há conhecimento do equipamento usado para realizar a conferência no campo. Ou, de outra forma, não traz com clareza como identificar na figura 19, um detalhe no terreno ou ponto que possa para levantar com métodos independentes.
5. Aponta para a redução do desvio-padrão nas distorções planimétricas de 40-50 cm para 10cm aproximadamente, no entanto não revela o comportamento da matriz variância-covariância sobre a tendência ou correlação entre as medidas apuradas.

2.6.2.3 Método de ajustamento de kager

O método é um dos mais criativos e traz na literatura diversos seguidores (ROTTENSTEINER, et al. (2002), SCHENK (2001), VOSSSELMAN, (1999), TEMBA e PHILIPS (2007) para citar alguns exemplos) e possibilitou a patente ORIENT (URL; http://www.ipf.tuwien.ac.at/produktinfo/orient/html_hjk/orient_e.html). O projeto, realizado anterior ao ano de 1995, foi idealizado com o propósito de reduzir as discrepâncias acentuadas, sobretudo, nas zonas de sobreposição lateral dos aerolevantamentos com o ALS por um processo que busca ajustamento simultâneo de todas as faixas. Contava com um bloco de 56 faixas com 1000 m de largura e 1495 planos homólogos. Ao final do ajustamento apurou um desvio-padrão de $\pm 10,7$ cm. Os planos homólogos são trechos que ocupam as bordas das faixas laterais de um aerolevantamento, com lados iguais a 20m de extensão.

A figura 19 ilustra a varredura do sensor laser e destaca os planos homólogos, os centros dos planos homólogos e os pontos de controle nas bordas das faixas de vôo.

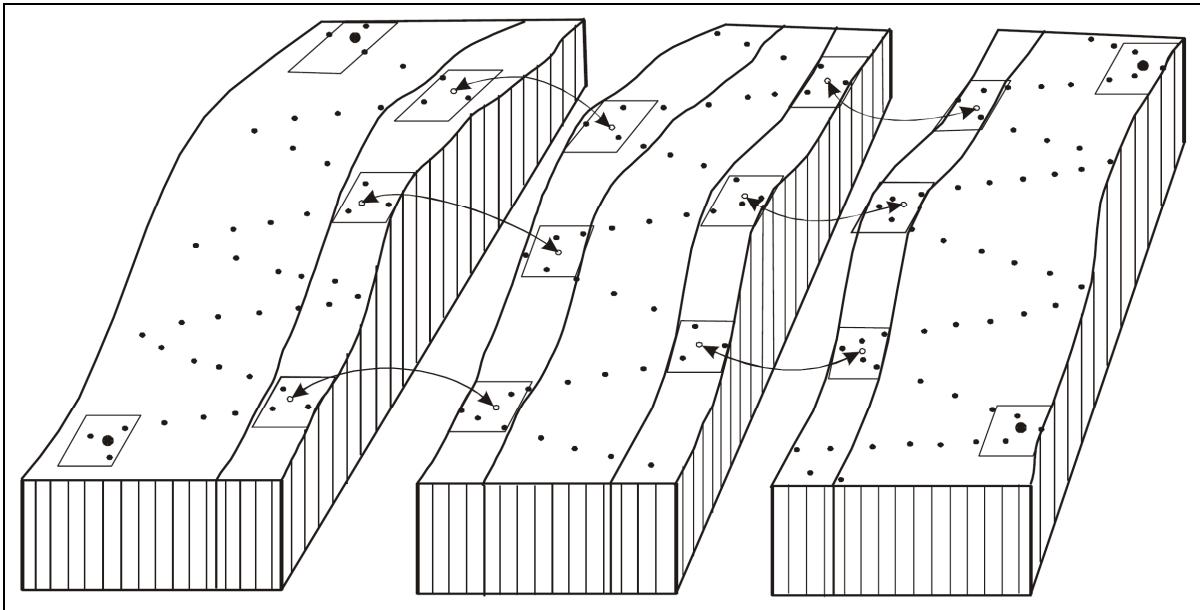


Figura 19 - Planos homólogos
Fonte: KAGER (2004)

$$v_{t,s,p} = a_t (\bar{X}_{t,s,p} - X_t) + b_t (\bar{Y}_{t,s,p} - Y_t) + Z_t + dZ_s (c_{sij}, X_{ts}, Y_{ts}) - \bar{Z}_{t,s,p} \quad (2.11)$$

- $P_{t,s} = \bar{X}_{t,s,p}, \bar{Y}_{t,s,p}, \bar{Z}_{t,s,p}$ coordenadas do ponto de controle no *patch* (plano ou recorte) t da faixa s , medida com GPS ou assemelhados
- X_t, Y_t coordenadas do centro do *patch* t
- Z_t parâmetro relativo à coordenada vertical do centro do *patch* t
- a_t, b_t parâmetro relativo à deriva do *patch* t
- X_{ts}, Y_{ts} coordenadas do centro do **patch** t na faixa s , para a qual $X_s = X_t - X_{0s}, Y_s = Y_t - Y_{0s}$
- $dZ_s (c_{sij}, X_{ts}, Y_{ts})$ correção polinomial da faixa s
- c_{sij} parâmetro relativo ao coeficiente de correção polinomial
- $v_{t,s,p}$ resíduo da componente vertical decorrente do ajustamento pelo método dos mínimos quadrados
- $x_s - x_0(t, a_s) = R^T [\vartheta(t, K_\vartheta)] [X - X_0(t, K_0)]$
- $X = (X_w Y_w Z_w)^T$ coordenada de um ponto no referencial terrestre (espaço-objeto)

$x_s = (x_s, y_s, z_s)$	coordenada de um ponto no referencial ALS (espaço-scanner)
$x_o(t, a_s)$	coordenada de origem do referencial ALS
$R = R[(\vartheta(t, K_\vartheta))]$	Matriz de rotação dos ângulos ϑ no tempo t
$X_0(t, K_0)$	coordenada do centro de fase da antena do receptor GPS terrestre no momento t

O procedimento dedicado a determinar parâmetros de orientação interior do ALS requer os seguintes dados:

1. registro da correção diferencial de coordenadas do receptor GPS estacionário para todos os pontos medidos ao longo da faixa de vôo;
2. registro da atitude do IMU (rotação ângulos $\vartheta = (\text{Roll}, \text{Pitch}, \text{Yaw})^T$);
3. as observações do sensor laser, ou seja, a distância d e os ângulos de deflexão τ_i para cada um dos pontos ALS e um registro tempo voltado para estimar a sincronização com o GPS e a IMU;
4. registro de coordenadas de pontos distribuídos espacialmente nas faixas de vôo, incluindo os de apoio suplementar nas zonas de sobreposição lateral.

Dentre os métodos abordados é o mais afinado com a pesquisa pois;

1. trata da espacialização similar aos métodos tratados na aerofotogrametria;
2. usa o princípio da geometria que define um ponto a partir da interseção de três planos concorrentes;
3. registra igualmente os pontos de apoio suplementar nas zonas de sobreposição lateral e faz a validação com pontos de apoio terrestre com GPS de dupla frequência com o método RTK;
4. faz o ajustamento simultâneo do bloco decorrentes da estimativa dos parâmetros alcançado com o método MMQ (método dos mínimos quadrados).
5. compartilha o mesmo foco, reduzir as discrepâncias verticais na zona de sobreposição lateral.
6. define com estratégia de ajustamento a distribuição de planos homólogos, particularmente, na zona de sobreposição lateral.

Por outro lado, traz diferenças de caráter operacional que distanciam os métodos praticados nesta pesquisa, são eles;

1. o modelo matemático para o ajustamento dos pontos é o conforme isogonal de Helmert no espaço;
2. o método armazena e processa informações de registro do laser, tais como; distância até o objeto iluminado e a atitude do sensor;
3. o formato dos **patches** contemplam uma quantidade definida de pontos, geralmente varia de 20 a 150 unidades enquanto que a metodologia praticada privilegia um formato circular de quarenta metros de diâmetro; independente do número de observações que houver neste espaço.

A principal diferença entre os métodos praticados nesta pesquisa e KAGER (1995) é a complexidade da rotina e o tratamento dos dados. Basta citar os módulos destinados a processar a distância entre o sensor e o objeto iluminado e a atitude do sensor (matriz de rotação com os ângulos α). A rotina de KAGER (2006) se destina a ajustar todos os objetos que possam estar inseridos no MDE enquanto a pesquisa tem o foco voltado apenas para as observações que ocupam a superfície física.

De outro modo, o ORIENT é capaz tanto de interpretar o formato dos arquivos gerados pelo sensor, quanto estabelecer uma biblioteca de arquivos. Um operador matemático, atua como um filtro, é capaz de selecionar todas as observações que são realizadas pelo sensor mas, que por algum motivo, não é processada pelo equipamento.

2.6.2.4 Método de ajustamento de Burman

BURMAN (2000) afirma que o funcionamento do sensor laser é dependente de duas operações; o rastreamento da constelação artificial por satélite para o posicionamento e da navegação por inércia da IMU para dar orientação a cada pulso emitido pelo sensor. Relaciona o multicaminhamento e a influência da ionosfera e a troposfera ao elenco de erros que afetam o processo de posicionamento por satélites e, analogamente, aos desvios de acelerômetros e osciloscópios ao sistema inercial de navegação. BURMAN

(2000) defende que o efeito dos erros sobre o processo de medição apresenta características assemelhadas a erros sistemáticos e, portanto, podem ser modelados e subtraídos da influência sobre as observações tomadas pelo ALS. A equação 2.12 expressa uma proposta para modelar e corrigir a influência dos erros decorrentes da operação com o receptor GPS e a IMU.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + R_{IMU} R_{IMU}^{laser} R_{laser} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ l \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

onde:

l distância compreendida entre a plataforma de suporte do ALS e a superfície iluminada

$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}$ coordenadas terrestres do ponto iluminado

$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}$ coordenadas terrestres de origem do referencial local

R_{IMU} matriz de rotação da IMU

R_{IMU}^{laser} matriz de rotação devido a falta de interpolação entre o IMU e o emissor laser(*)

R_{laser} matriz de rotação do emissor laser

(*)erro de interpolação é causado pela divergência entre a frequência de pulsos emitidos pelo ALS e a frequência do sinal produzido pelo receptor GPS.

O método propõe uma estratégia para estimar a discrepância vertical nas zonas de sobreposição lateral. Desenvolveu-se um procedimento de interpolação baseado numa estruturação dos pontos de apoio em forma de triangulação – TIN (acrônimo para o termo em inglês; *triangulated irregular network*) voltado para a modelagem digital de terreno. Nas grades irregulares, ou TIN, todos os polígonos são do mesmo tipo (possuem o mesmo número de lados), mas não, necessariamente, todos iguais.

O princípio pratica a propriedade do circuncírculo, comum à triangulação de Delaunay; dado um círculo que passa por três pontos que formam um triângulo, se não existe nenhum outro ponto amostrado dentro deste círculo, triângulo é usado no TIN.

$$R = R_{laser} R_{IMU}^{laser}$$

A função de interpolação da coordenada altimétrica (Z) pode ser dada por;

$$Z = f_{z'}(x', y') \quad (2.13)$$

$$Z'_{x'} = \frac{\partial f_{z'}}{\partial x'} \quad (2.14)$$

$$Z'_{y'} = \frac{\partial f_{z'}}{\partial y'} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} \lambda_z = & Z'_{x'} \cdot dx_0 + Z'_{y'} \cdot dy_0 - dZ_0 + (Z'_{x'} \cdot \frac{\partial R_{x'}}{\partial r} + Z'_{y'} \cdot \frac{\partial R_{y'}}{\partial r} - \frac{\partial R_{z'}}{\partial r}) \begin{pmatrix} l_{x'} \\ l_{y'} \\ l_{z'} \end{pmatrix} dr + \\ & + (Z'_{x'} \cdot \frac{\partial R_{x'}}{\partial r} + Z'_{y'} \cdot \frac{\partial R_{y'}}{\partial r} - \frac{\partial R_{z'}}{\partial r}) \begin{pmatrix} l_{x'} \\ l_{y'} \\ l_{z'} \end{pmatrix} dp + + (Z'_{x'} \cdot \frac{\partial R_{x'}}{\partial r} + Z'_{y'} \cdot \frac{\partial R_{y'}}{\partial r} - \frac{\partial R_{z'}}{\partial r}) \begin{pmatrix} l_{x'} \\ l_{y'} \\ l_{z'} \end{pmatrix} dh \end{aligned} \quad (2.16)$$

λ_z discrepância entre a observação medida pelo ALS e o valor interpolado

r, p, h Ângulos devido a atitude do sensor em relação aos eixos y,x e z, respectivamente

$l_{x'}$ componente do eixo x da distância compreendida entre a plataforma de suporte do ALS e a superfície iluminada

$l_{y'}$ componente do eixo y da distância compreendida entre a plataforma de suporte do ALS e a superfície iluminada

$l_{z'}$ componente do eixo z da distância compreendida entre a plataforma de suporte do ALS e a superfície iluminada

Há alguns pontos que cabem reflexão na metodologia. Em primeiro lugar, os modelos de correção dos erros sistemáticos devido ao receptor GPS são matematicamente definidos e o método RTK realiza um filtro de resíduos, sobre as coordenadas transmitidas para a aeronave durante o aerolevantamento, de modo que as observações estão isentas da influência destes erros. Embora, tenha inserido a matriz de rotação devido à falta de interpolação entre o IMU e o emissor laser não ocorre a

mesma intenção em relação ao erro de sincronização, igualmente, entre os dois componentes do sensor, citado por SCHENK (2001).

2.7 CALIBRAÇÃO DO ALS

BRANDALIZE (2004) e WEHR & LOHR (1999) afirmam que toda calibração é realizada por meio de procedimentos que servem para identificar e eliminar erros sistemáticos a fim de validar o processo de coleta de dados por um determinado sistema. Além disso, sustentam que não existem procedimentos padrões para a calibração do sistema. Assim, a impossibilidade de estabelecer uma relação entre os pontos laser coletados e uma feição específica da superfície do terreno, levou cada fabricante, a desenvolver seu próprio método ou procedimento de calibração.

A IMU, segundo BRANDALIZE (2004), é o dispositivo mais crítico da calibração e, se sua posição na aeronave for segura, este pode permanecer estável por alguns meses. No entanto, se sua posição for suscetível a interferências, o sistema deve ser calibrado a cada novo projeto.

SCHENK (2001) aponta para erros atribuídos ao emissor/receptor laser, tais como falhas na estimativa da distância entre o sensor e o objeto iluminado, bem como relacionado ao ângulo de varredura percorrido pelo sensor ao realizar o perfilamento; ao tempo de sincronização e interpolação devido aos sinais do GPS e da IMU são, igualmente, previstos, incluindo, ainda, erros devido ao desvio da vertical. Porém, MORIN (2002) elenca dois principais elementos, modelados matematicamente, para corrigir a influência de erros sistemáticos que afetam o funcionamento do ALS, são a refração atmosférica e o atraso do relógio do sensor.

2.7.1 Refração atmosférica

O deslocamento do feixe de laser pela atmosfera sofre refração. O montante da refração é função do comprimento de onda, atitude do sensor, ângulo de varredura do

scanner e condições atmosféricas. Segundo MORIN (2002), os fabricantes praticam um modelo padrão, porém as correções são similares aos padrões atmosféricos adotados para a fotogrametria, a figura 20 ilustra a trajetória do raio sob o efeito da refração atmosférica.

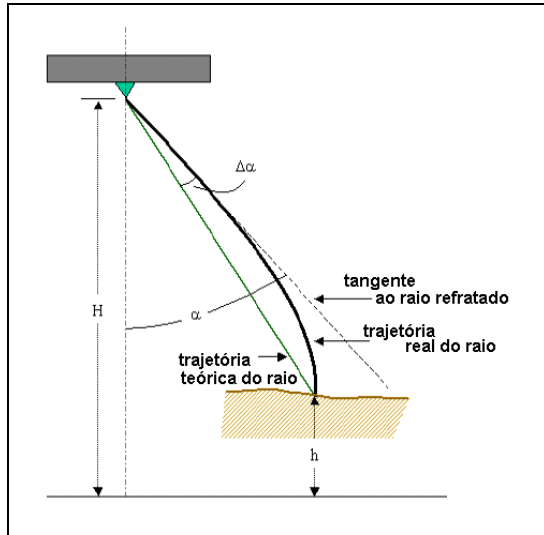


Figura 20 – Trajetória do raio luminoso
Fonte: MORIN(2002)

$$\Delta\alpha = K \operatorname{tg}(\alpha)$$

$$K = \left(\frac{2410H}{H^2 - 6H + 250} - \frac{2410H}{h^2 - 6h + 250} \left(\frac{h}{H} \right) \right) 10^{-6} \quad (2.17)$$

seja,

K influência da refração atmosférica

h altitude

H altura de vôo

α FOV

2.7.2 Atraso do relógio

Um persistente problema de atraso acompanha o relógio do sistema ALS. Para uma distância de 1500m (750m transmitido e retorno do sinal), o tempo de espera se aproxima de $5 \cdot 10^{-6}$ s e, conseqüentemente, está agregado um erro de 1% no relógio que resulta em 7,5 m. As fabricantes comerciais dos sensores ALS praticam índices mais

acurados, algo em torno de 0,05 ns e 0,2 ns. Qual seja, faz referência a erros de 1,5 cm.

A depender da influência da taxa de pulso, deriva do relógio e bias devem ser contemplados na contagem. Se couber, deverá ser modelado durante o processo de calibração. A resolução do pulso é determinado pela habilidade de medir o tempo de retorno do pulso, i.e.:

$$d_r = 0,5c\Delta t \quad (2.18)$$

seja;

d_r alcance do sinal emitido

Δt intervalo do tempo de pulso

MORIN (2002) afirma que após a remoção dos erros sistemáticos a acurácia dos pontos medidos podem atingir valores compreendidos entre 1,5 e 2 cm para 500m medidos acima da superfície física.

O vôo dedicado à calibração do sensor laser é realizado sobre locais controlados. Quer dizer, sobre superfícies planas que compreendem objetos ou feições muito bem definidas, como edificações de grande porte, pequenas áreas vegetadas, áreas de estacionamento e algumas estradas, não raro, são usado locais ou elementos pré-sinalizados ao aerolevanteamento. Além disso, devem ser levantados por meio de técnicas independentes que favoreçam melhor acurácia que aquela esperada para os dados ALS.

O modelo matemático para a estimativa dos parâmetros de calibração interna segundo LOHMAN (2000), BURMAN (2004), FILIN (2002), BEHAN et al. (2001), VOSSELMAN & MAAS (1999) e MORIN & EL-SHEIMY (2002) é traduzido para a seguinte expressão:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}_{ALS} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}_{GPS} + R_{GPS} \cdot R_i \cdot R_{IMU} \cdot R_{IMU / ALS} \cdot R_L \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_L - t_{IMU} - t_{GPS} \quad (2.19)$$

Se:

x', y', z'	coordenadas finais do ALS
x_0, y_0, z_0	coordenadas do GPS
R_{GPS}	matriz de rotação devido ao atitude da antena do receptor GPS
R_i	matriz de rotação devido ao desvio da vertical
R_{IMU}	matriz de rotação devido ao atitude da unidade de medição inercial
$R_{IMU/ALS}$	matriz de rotação devido ao atitude combinado da unidade de medição inercial e o emissor/receptor laser
R_L	matriz de rotação devido ao atitude do emissor/receptor laser
z	coordenada vertical parcial do ALS
$x=y=0$	coordenadas posicionais parciais do ALS

Logo, deduz-se que a calibração do ALS é de fundamental importância para a determinação da precisão do sistema, pois, se por um lado minimiza a influência dos erros sistemáticos que afetam a qualidade das observações, por outro, estimam os parâmetros de orientação interna do sensor ao praticar equações e/ou procedimentos técnicos que levam a um controle de qualidade definitivo e estável.

RESUMO DO CAPÍTULO

Foi abordado a arquitetura e o funcionamento dos principais componentes que integram o laser scanner aerotransportado. Mereceram destaques; a descrição da unidade de medição inercial que responde pela atitude do sensor no momento que realiza a medição, o receptor GPS instalado na aeronave que após receber a correção da base (receptor) terrestre envia em tempo real as correções diferenciais ao instrumento e, finalmente, o emissor/receptor do sinal laser responsável pela geração, direcionamento e captação do pulso de laser direcionado à superfície de medição. Em seguida, foram discutidos os termos atribuídos ao perfilamento, movimento singular do traçado realizado pelo sensor laser assemelhado ao zig-zag. São comentados e ilustrados com gráficos e figuras a relação entre a refletância do alvo e a relação com o alcance que o sinal pode atingir. Atribui ao elenco de equações o funcionamento do ALS que traduz, ao mesmo tempo, a capacidade produtiva de gerar arquivos de coordenadas tridimensionais e imagem de intensidade, como as limitações que acompanham o processo de medição, seja pela limitação da superfície iluminada de reagir ao pulso seja pela limitação do equipamento atender a necessidade de densidade sugerida para a realização de um determinado projeto. Além disso, foi descrito os traços de varredura que o canhão do sensor laser pode gerar a depender das características do espelho e especificações técnicas. A influência que os erros sistemáticos podem interferir na qualidade da medição foi assinalado. Faz considerações sobre o ajustamento de faixas decorrentes do aerolevanteamento com o ALS e discute a influência que o erros inerentes ao processo de medição podem comprometer a acurácia das observações. Em minúcias, o texto reproduz a equação de funcionamento da tecnologia ALS – equação geral do laser, e explica como o modelo matemático contempla as atividades interativas do sub-sistema dos três principais componentes do sensor. Relaciona os principais métodos correntes na literatura dedicados ao ajustamento de observações, faz críticas e compara com a técnica abordada na tese. E, por fim, avalia a equação destinada à calibração do sensor laser, ressalta os principais erros sistemáticos e as respectivas equações e destaca a importância de corrigí-los.

3 MATERIAIS E MÉTODO PARA O AJUSTAMENTO SIMULTÂNEO DO BLOCO

3.1 MATERIAIS

O tópico encerra três componentes que tornaram possível a conclusão da pesquisa; os equipamentos, os dados para processamento e os aplicativos usados.

3.1.1 Equipamentos

Os receptores GPS são usados para duas finalidades; a primeira é voltada para o levantamento dos pontos responsáveis pela transmissão das correções diferenciais para os demais pontos envolvidos em todo o método de ajustamento, o método estático com o instrumento da THALES NAVIGATION é indicado para esta finalidade. A segunda finalidade, atende a locação dos demais pontos, praticado com o método RTK com o uso do LEICA 1200. A câmera é um aparelho que tem função complementar à primeira fase, pois realiza nas etapas de campo o registro de cenas de locais, equipamentos ou ambos. O notebook serve para processar os dados, editar as informações, digitar os textos e demais atividade de redação. A tabela 3.1 detalha características dos equipamentos utilizados.

Tabela 3.1 - Equipamentos

Equipamento	Unidade	Fabricante	Modelo	Precisão
Receptor GPS (frequência L1)	2	THALES Navigation	PROMARK II(*)	Método Estático • Horizontal: 0.005 m + 1 ppm • Vertical: 0.01 m + 2 ppm
Receptor GPS (frequência L1 e L2) + rádio-link	2	Leica	SÉRIE GPS 1200 GX1230(*)	Método RTK Planimetria: 5 mm + 0.5 ppm, Altimetria: 10 mm + 0.5 ppm.
Equipamento	Unidade	Fabricante	Modelo	Capacidade
Máquina fotográfica digital	1	Nikon(3,21 Mpixel)	CoolPix 885	CompactFlash memory – 16 MB
notebook	1	PC Chips Desknote	A907	80 Gb HD, 256 MB ram, processador Pentium 4 de 1,0 GHz, tela 14”

(*) as especificações completas estão no anexo 02

3.1.2 Dados para processamento

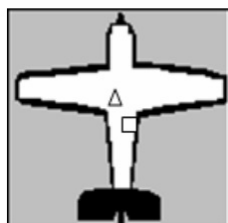
A pesquisa contou com dois arquivos digitais para dar prosseguimento à pesquisa;

- arquivos brutos (sem edição) de coordenadas dos pontos amostrados do levantamento realizado com o ALS OPTECH 2035 sobre a cidade de Curitiba em 11/2006 contendo dez faixas, formato ASCII. Os detalhes técnicos sobre o plano de vôo é ilustrado na figura 21;
- mapa vetorial de ruas da cidade de Curitiba, formato DWG.

Foram selecionadas dentre as dez faixas relativas aos arquivos gerados pelo sensor laser apenas três faixas de varredura, a base cartográfica do município de Curitiba foi crucial para o planejamento e distribuição espacial dos marcos adotados no ajustamento de observações.

OPTECH 2025

		X (in flight)	Y (Cross Flight)	Z (Elevation)
PT-VDO	R.P TO GPS	-0.038	0.005	-0.515
	USER TO R.P.	-0.051	-0.027	-0.500
	USER TO GPS	-0.089	-0.022	-1.015



△ GPS antenna
□ Sensor Head

FICHA TÉCNICA DE PLANO DE VÔO

Cliente:	Teste	Serviço:	720-00
Ministério da Defesa:	097/2002	Sensor:	ALTM 2025
Altura do Vôo (m):	1000	Repetição do Laser (Hz):	25,000
Ângulo Abertura (°):	9	Frequência Scanner (Hz):	38

Graus em Radiano:	0.0175	Máxima Frequência (580):	342
Abertura Total do Scanner (°):	18		
Largura da Faixa (m):	317		
Área Recobrimento Lateral (m):	63		
Distância entre eixos (m):	253		

Recobrimento Lateral:	20	Total km Faixas:						
N.º de Faixas:	10							
Aeroporto Base:								
Localidade:	Bairro Água Verde							
Faixa	Comprimento (Km)	Altura do Vôo (m)	Altitude Média do Solo (m)	Altitude do Vôo (m)	Altitude do Vôo (pés)	Freq. (Hz)	Ângulo Scanner	Altura (m)
1	3.0	1,000.0	900	1,900.0	6,233.6			
2	3.0	1,000.0	900	1,900.0	6,233.6			
3	3.0	1,000.0	900	1,900.0	6,233.6			
4	3.0	1,000.0	900	1,900.0	6,233.6			
5	3.0	1,000.0	900	1,900.0	6,233.6			
6	3.0	1,000.0	900	1,900.0	6,233.6			
7	3.0	1,000.0	900	1,900.0	6,233.6			
8	3.0	1,000.0	900	1,900.0	6,233.6			
9	3.0	1,000.0	900	1,900.0	6,233.6			
10	3.0	1,000.0	900	1,900.0	6,233.6			

Fig. 21 – Plano de vôo

Fonte: Esteio Engenharia e Aerolevantamento S/A

3.1.3 Aplicativos usados

Os aplicativos usados na pesquisa são diversificados. O *Ashtech Solutions 2.6* é um software que acompanha o receptor da THALES NAVIGATION com o objetivo de realizar o pós-processamento das informações armazenadas ao fim de um determinado intervalo de rastreo. O *MicroStation V8* atende não apenas à visualização e edição da base cartográfica como também serve de plataforma para os módulos *TerraScan* e *TerraMatch* destinados a editar, classificar e suavizar feições de observações geradas pelo sensor laser. O *MATLAB v. 704* é um software com sub-aplicativos inseridos que permitem muito agilidade ao usuário para a concepção de rotinas voltadas para o ajustamento. O *Office da Microsoft* atende, sobretudo, ao propósito de redação.

3.2 MÉTODO: INTRODUÇÃO

O processo dedicado ao ajustamento simultâneo de pontos gerados pelo ALS é relativamente recente, se comparado com as técnicas verificadas para as aerofotos; MITISHITA (1986), LUGNANI e TOMMASELLI (1988), ANDRADE (1998), MAYR (1995), SCHENK (2004) e para as imagens orbitais; GRODECKI et al. (2003), DIAL & GRODECKI (2004). O processo de ajustamento tem a capacidade de submeter todas as observações realizadas pelo sensor ao mesmo referencial local.

A figura 22 faz uma analogia com as propriedades do ajustamento, pois os homens que sustentam a lona devem conduzir cada localidade definida por um ponto negro sobre o tecido, residente da borda, para o respectivo ponto de apoio enquanto os demais pontos que ocupam o espaço interior poderão sofrer acomodações livremente de modo a repousar adequadamente sobre o relevo. A distribuição espacial dos marcos nas bordas e os marcos no interior do bloco realizam função análoga à cena reproduzida.

O caráter dos sensores é um diferencial importante, pois o ALS é um sensor ativo. Porém, a metodologia encontra similaridades no tratamento das observações e no princípio adotado para os sensores passivos (imagens aéreas e orbitais).

Esta pesquisa, entre outros, investiga a metodologia possível e controlada dos pontos iluminados no bloco de ajustamento de faixas decorrentes do aerolevanteamento realizado com a tecnologia ALS. O modelo dedicado ao ajustamento é a transformação conforme de Helmert no espaço.

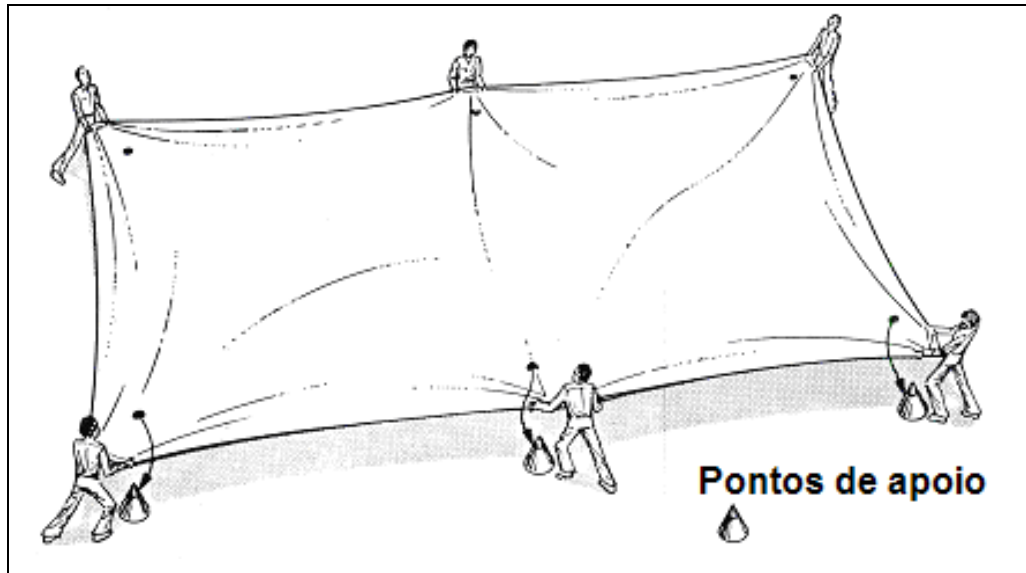


Fig. 22 – Ajustamento do bloco

A *estimativa por intervalo* em detrimento da *estimativa pontual* no ajustamento de observações diretas, afirma GEMAEL (1994), implica no conceito de probabilidade e todo o tratamento estatístico dos dados para avaliar efetivamente um conjunto de medições.

O conjunto de observações redundantes decorrentes do levantamento aéreo está sujeito a flutuações probabilísticas e de uma estimativa de precisão, o ajustamento tem por objetivos:

- a. estimar o valor atribuído aos parâmetros de modelos matemáticos com o método dos mínimos quadrados e,
- b. estimar a precisão de tais incógnitas e eventual correlação entre elas.

O método proposto para execução da pesquisa está sintetizada na forma de fluxograma conforme apresentado na Figura 23.

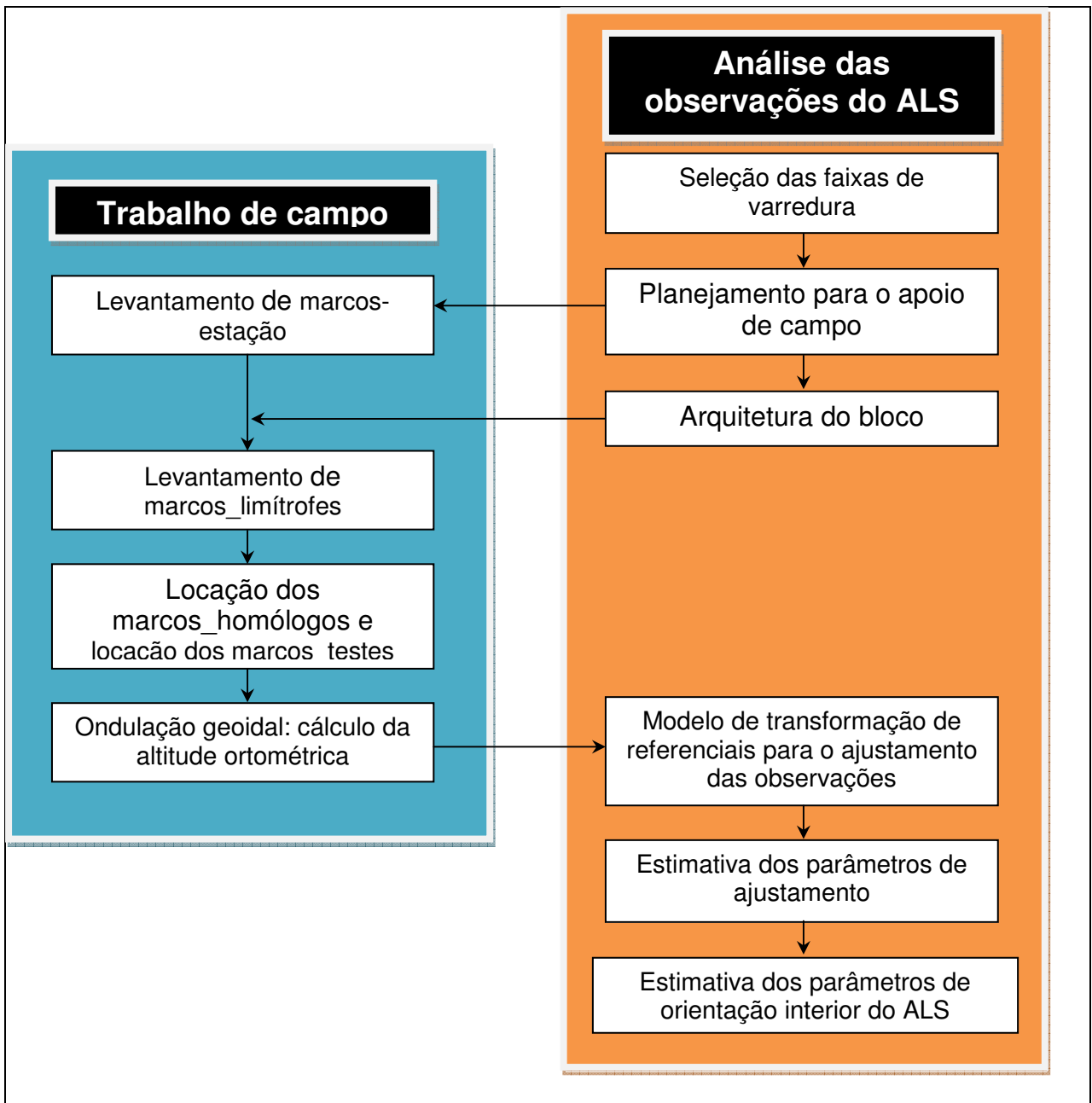


Fig.23 – Fluxograma do método praticado na pesquisa

3.2.1 Projeto Água Verde – seleção de faixas

O projeto Água Verde contou com dez faixas de aerolevante realizado no centro da cidade de Curitiba pela Esteio Engenharia e Aerolevante S/A com o propósito de testar a capacidade do sensor OPTECH 2035. O material do perfilamento foi gentilmente cedido para a realização das pesquisas e apresentavam a seguinte disposição; cinco faixas longitudinais e igual número no sentido transversal. Dentre o total de faixas houve a seleção de três por dois motivos;

- ✓ a seleção de uma localidade que contasse com a cobertura de um número de faixas que contivesse a zona de sobreposição lateral, importante para verificar as características da discrepância vertical e, ao mesmo tempo, tornasse possível a locação de pontos realizados com o receptor GPS,
- ✓ a seleção das faixas contempladas na pesquisa deveriam ter a mesma direção, porque a faixa transversal incorpora variáveis à geometria do bloco de faixas que a metodologia não teria capacidade de avaliar o impacto na realização do ajustamento das observações.

3.2.1.1 Módulo TERRASCAN – Classify ground

O módulo TERRASCAN dispõe de uma rotina que reconhece o formato dos arquivos gerados pelo LIDAR e permite realizar uma filtragem, ou seleção, das observações que interessam ao projeto. No caso, o objeto da pesquisa se volta para as medições amostradas que repousam sobre a superfície física compreendidas entre as faixas 01 e 03.

É necessário empreender, no âmbito do TERRASCAN, um procedimento dedicado a seleção dos pontos medidos pelo ALS que descartam todos os pontos que estão acima da superfície terrestre. O termo em inglês atribuído a rotina que realiza esta operação recebe o nome de *classify ground* (ou classificação terrestre para a tradução livre).

3.2.1.2 Gradiente do relevo

O princípio que norteia o funcionamento do módulo é o da declividade – inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal. Ao considerar a nuvem de pontos altimétrica medida pelo sensor laser o *classify ground* filtra os pontos ao traçar um plano tangente à superfície terrestre a partir de um ponto P. A declividade é explicada matematicamente por duas variáveis; o gradiente e o azimute de direção. A figura 24 ilustra com o menu do TERRASCAN uma representação da declividade e o azimute. O gradiente é a taxa máxima de variação no valor da elevação, pode ser medido em grau (0 a 90°) ou em porcentagem e o azimute de direção é o ângulo contado a partir de um meridiano adotado como referência, varia de 0 a 360°.

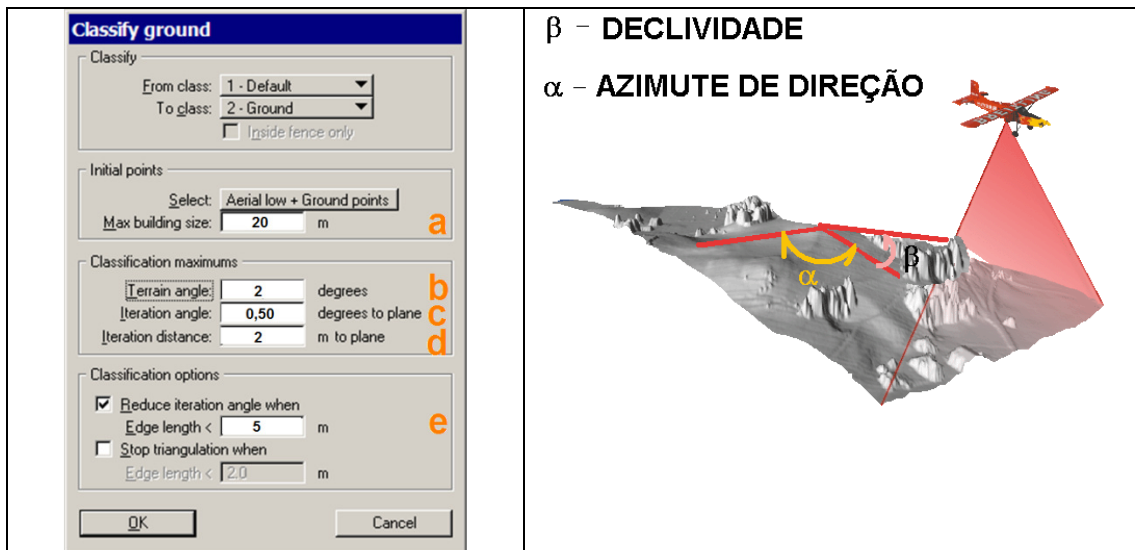


Fig. 24 – Registro do classify ground

- a – tamanho máximo do segmento paralelo ao plano do horizonte
- b – gradiente máximo de inclinação a partir do plano do horizonte
- c – ângulo máximo de iteração
- d – distância máxima de iteração
- e – comprimento mínimo dispensável de iteração

Logo, o módulo *classify ground* inicia a partir do registro de um ponto, assinalado pelo usuário, que se localiza sobre a superfície terrestre. Em seguida, o aplicativo realiza uma varredura de busca com 360° de amplitude segundo as iterações de distância e ângulo previamente estabelecidos conforme os itens (c) e (d) da figura 24. A tabela 3.2 revela a diferença entre a dimensão do arquivo de coordenadas de toda a faixa sobre

todos os objetos iluminados e em relação ao segmento recortado de trinta e seis quilômetros quadrados dedicados apenas aos pontos iluminados que repousam sobre a superfície física.

Tabela 3.2 – Classificação dos arquivos de coordenadas

Nome	Arquivo antes da seleção	Arquivo depois da seleção
Faixa 01	139148 Kb	6241 Kb
Faixa 02	52984 Kb	6899 Kb
Faixa 03	15125 Kb	6704 Kb

3.2.2 Planejamento para o apoio de campo

A etapa dedicada à execução da aerotriangulação de um levantamento prescinde fundamentalmente de um planejamento estruturado.

A primeira etapa consiste na submissão de um filtro no âmbito do ALS com o programa de processamento de dados - o TERRASCAN, sobre a nuvem de pontos gerada pelo ALS. Segundo o qual foi selecionado um trecho de três faixas de varredura com aproximadamente 36km² de extensão sobre a capital paranaense.

O planejamento do apoio de campo foi idealizado para setenta pontos distribuídos da seguinte forma;

- a. Seis marcos-estação para cobertura de todo o bloco;
- b. Oito marcos de duplo apoio (planimétrico e altimétrico) nas bordas do bloco,
- c. Na zona de sobreposição lateral foram posicionados oito marcos dedicados à avaliação final do ajustamento e, finalmente,
- d. Quarenta e oito marcos de apoio simples, puramente altimétrico.

A distribuição dos pontos de apoio foi realizada regularmente em quatro alinhamentos.

Com o propósito de dar uma visão global da distribuição espacial dos pontos de apoio na figura 25 consta um esboço das posições relativas das faixas de varredura com

todos os pontos de apoio. A legenda atribui aos pontos de apoio altimétrico e planimétrico (ou duplo apoio) aqueles situados na borda do bloco das três faixas, enquanto no interior do bloco são comuns a denominação de apoio simples, ou altimétrico e prevalece a distribuição sequencial de números pares. Houve o cuidado de posicionar ao lado do marco que recebe uma numeração dois marcos *espelhados*, ou seja, um marco à este outro à oeste. O objetivo desta operação é assegurar às condições ao operador do receptor GPS a realização das locações em razão do planejamento de campo. Logo, é uma estratégia preventiva à eventualidades que possam vir a criar obstáculos a plenitude da atividade de campo, tais como impedimento associado à existência de equipamentos urbanos, obras ou mesmo tráfego intenso de veículos. Assim o operador do receptor GPS pode contar com duas outras alternativas.

MITISHITA et al. (1988) admite um número menor de pontos para a atividade de ajuste, porém desta feita foi deliberadamente distribuído uma superabundância de pontos para atender, dentre outros, ao ajustamento que usa o modelo polinomial, tradicionalmente com um número de incógnitas mais elevado do que os modelos matemáticos da transformação afim geral no espaço e modelos assemelhados.

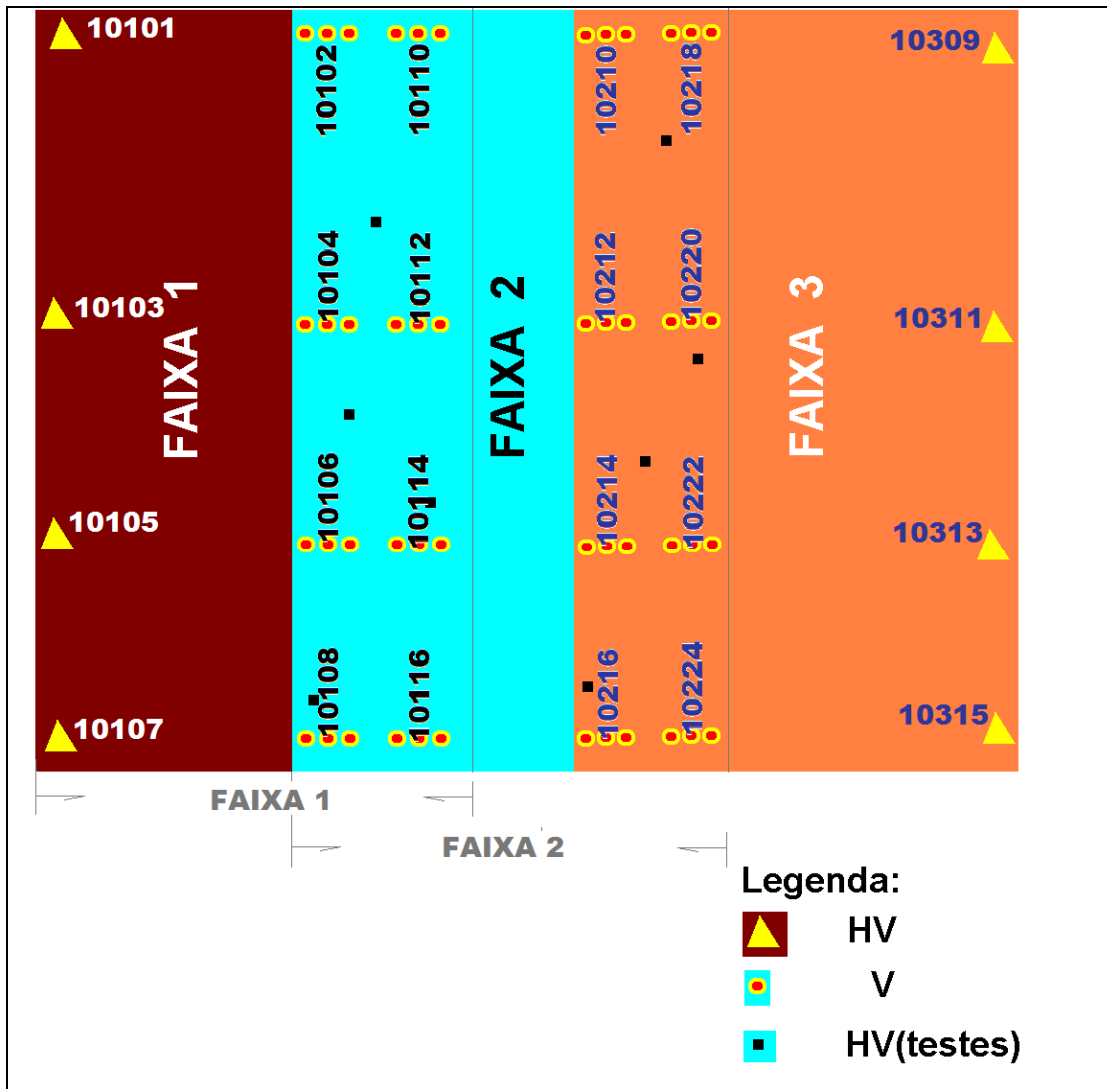


Fig. 25 – Faixas do aerolevanteamento e os pontos de apoio

A distribuição de pontos de apoio para a aerotriangulação na aerofotogrametria e, pode ser adotado no aerolevanteamento realizado com a tecnologia ALS. Deve haver um ponto mínimo HV em cada canto do bloco. Os pontos de apoio vertical (Vs) são distribuídos ao longo das linhas formadas pelos pontos HVs, perpendicularmente às linhas de vôo. Eles devem ser posicionados na superposição lateral entre modelos pertencentes a duas faixas.

ANDRADE (1998) afirma que a propagação de variância é mais severa no sentido transversal às faixas de recobrimento fotogramétrico do que ao longo das mesmas, particularmente, devido ao percentual de recobrimento. Trata-se, pois de um problema de rigidez geométrica.

Propõe-se um critério de codificação dos pontos de apoio assemelhado ao adotado pela Diretoria do Serviço Geográfico do Exército (DSG) acompanhada por várias instituições entre as quais o próprio IBGE.

É importante que a padronização de registros de pontos seja compartilhada por empresas voltadas para a cartografia que reconhecem uma codificação universal para os pontos de apoio terrestre, acompanhe na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Codificação dos pontos de apoio

Código	Atributos do ponto
1XXYY	Ponto de apoio
4XXYY	Pontos de ligação de faixa
5XXYY	Pontos de ligação de bloco
6XXYY	RRNN
7XXYY	Pontos de lago
8XXYY	Vértices
XX – número da faixa	
YY – número do ponto da faixa	

3.2.2.1 Espacialização dos alinhamentos e escolha dos marcos-estação sobre o bloco

Os quatro alinhamentos foram distribuídos com intervalos regulares em dupla, na extremidade superior do bloco e na extremidade inferior do bloco, a ilustração na figura 26, sobre o bloco acompanhado de marcos-estação. Os marcos-estação são aqueles marcos de coordenadas medidas antecipadamente ao restante dos marcos que

atenderão ao apoio de campo. O objetivo é servir de base de um receptor GPS para a transmissão por rádio-comunicação das coordenadas corrigidas para outro receptor, pois as coordenadas inseridas permitirão a propriedade de locação.

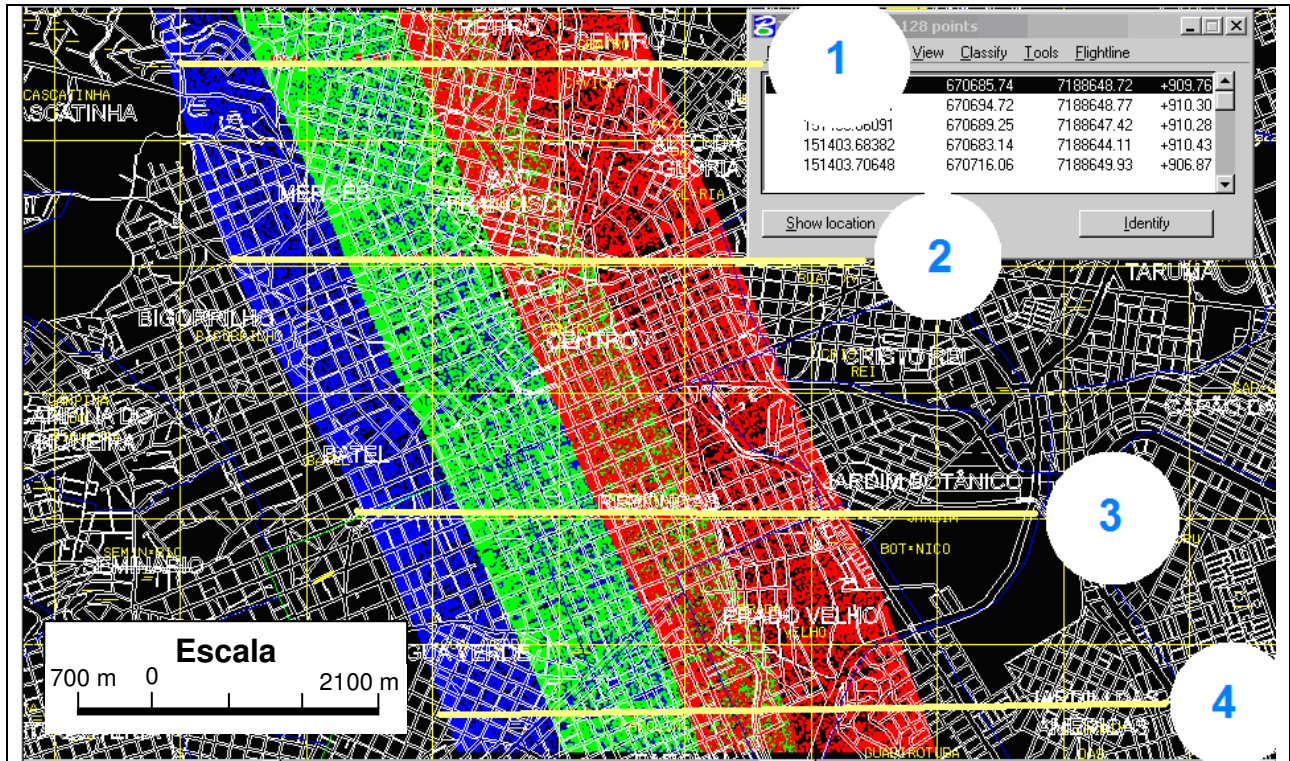


Fig. 26 – Planejamento do alinhamento de pontos de apoio sobre o bloco

A disposição espacial dos marcos-estação atende a limitação de transmissão das correções diferenciais por rádio-comunicação entre os receptores GPS. A especificação técnica do fabricante do equipamento sustenta que a transmissão deverá ocorrer no raio de dois quilômetros de extensão. A figura 27 ilustra a área de abrangência de cada marco-estação que ocupa o centro de cada círculo. Foram necessários seis marcos-estação para cobrir a zona de cobertura do aerolevanteamento. Os levantamentos de todos os marcos-estação foram realizados com receptor GPS PROMARK II de uma frequência com intervalo de rastreamento de uma hora de duração e resumidos no quadro 3.1.

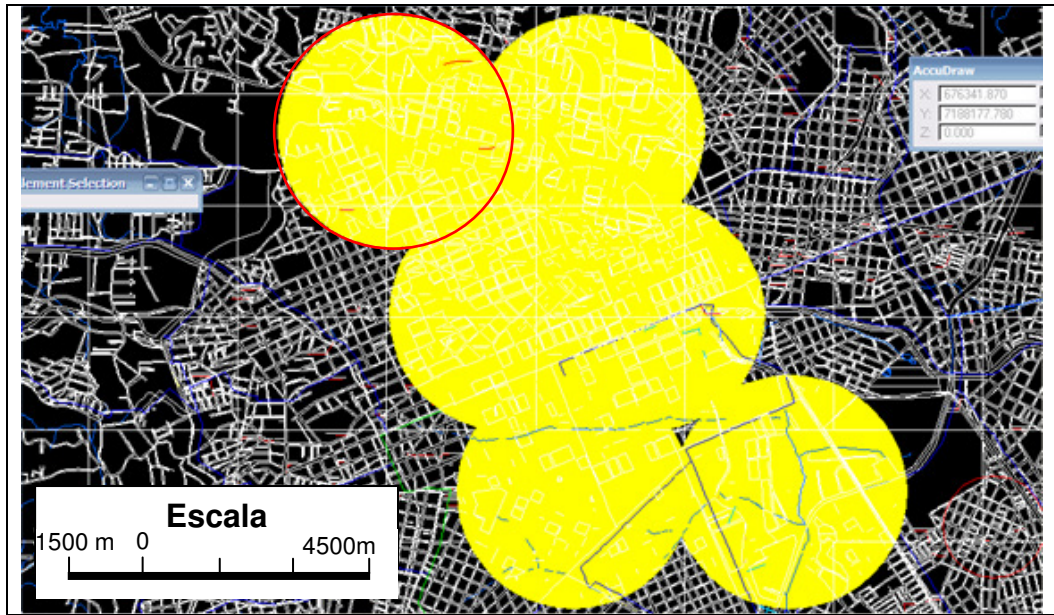


Fig. 27 – Área de abrangência dos marcos-estação, numerado sequencialmente da esquerda para a direita e de cima para baixo

Quadro 3.1 – Bases para o apoio do levantamento com receptores GPS

Estações homologadas pelo IBGE adotadas para correção diferencial – SIRGAS		
	Manfra - Unicemp	UFPR – Campus
Latitude	25°26'50,8424" S ± 0,001 m	25° 26' 54,1269" S ± 0,001 m
Longitude	49°21'33,4463" W ± 0,001 m	49° 13' 51,4373" W ± 0,002 m
Altitude geométrica	960,15 m ± 0,011 m	925,77 m ± 0,002 m
Altitude ortométrica	956,73 m Fonte: GPS/MAPGEO2004	924,3213 m Fonte: Nivelamento Geométrico
UTM(N)	7.184.489,440 m	7.184.223,310 m
UTM(E)	664.973,186 m	677.878,513 m
MC	-51	- 51
Marcos – estação ajustados – SAD 69 (modelo transformação IBGE: aplicativo TCGEO)		
	marco_estacao_01	marco_estacao_02
Latitude	25° 25' 07,46327"S	25° 24' 53,53859"S
Longitude	49° 17' 34,07367"W	49° 16' 23,95087"W
Altitude geométrica	954,8840m	912,1150m
x	671.701,56m	673.666,531m
y	7.187.576,555m	7.187.979,788m
z	953,435m	910,666m
	marco_estacao_03	marco_estacao_04
Latitude	25° 26' 09,21585"S	25° 26' 10,23844"S
Longitude	49° 16' 53,28145"W	49° 16' 2,88466"W
Altitude geométrica	910,2900m	901,4200m
x	672.816,931m	674.224,554m
y	7.185.661,882m	7185612,200m
z	908,841m	899,971m
	marco_estacao_05	marco_estacao_06
Latitude	25° 27' 11,06285"S	25° 27' 10,80860"S
Longitude	49° 16' 23,53714"W	49° 14' 41,02746"W
Altitude geométrica	920,4490m	902,4940m
x	673.623,306m	676487,027m
y	7183748,191m	7183718,606m
z	919,000m	901,045m

3.2.3 Arquitetura do bloco

Os marcos usados na metodologia se dividem em seis grupos;

- ✓ Seis *marcos-estação* para transmitir as correções diferenciais de um receptor para outro receptor GPS;
- ✓ Oito *marcos limítrofes* que ocupam as zonas fronteiriças do bloco;
- ✓ Quarenta e oito *marcos de apoio*, são imprescindíveis para o planejamento, pois dão sustentação geográfica para a determinação dos *marcos parciais homólogos*, de igual número;
- ✓ *Marcos homólogos*, são decorrentes da localização geográfica dos *marcos de apoio*, portanto compreendem quarenta e oito unidades. São obtidos da interseção dos planos de igual nome nas ZSL e;
- ✓ finalmente, oito *marcos de teste*, objetivam avaliar o comportamento do conjunto da coleção de pontos após o processo de ajustamento.

3.2.3.1 Marcos limítrofes

São marcos de duplo apoio (HVs) localizados nas bordas das faixas 1 e 3 e garantem ao ajustamento rigidez nas bordas, veja o tabela 3.4

Tabela 3.4 – Marcos limítrofes rastreados com GPS nas zonas limítrofes do bloco

FAIXA 1								
marco	coordenadas(m)				desvio-padrão(m)			
	X	Y	Z _(geom)	Z _(ortom)	δ_x	δ_y	$\delta_{z(geom)}$	$\delta_{z(ortom)}$
10101	670817,988	7188263,454	916,416	911,853	0,002	0,002	0,005	0,432
10103	671414,595	7186682,811	936,316	931,753	0,011	0,009	0,045	0,434
10105	672335,777	7184642,004	932,466	927,903	0,088	0,024	0,029	0,433
10107	673053,068	7183116,087	908,804	904,241	0,010	0,003	0,008	0,432

FAIXA 3								
marco	coordenadas(m)				desvio-padrão(m)			
	X	Y	Z _(geom)	Z _(ortom)	δ_x	δ_y	$\delta_{z(geom)}$	$\delta_{z(ortom)}$
10309	674471,567	7188325,921	924,245	919,682	0,005	0,007	0,016	0,432
10311	675195,247	7186751,355	915,597	911,034	0,003	0,003	0,010	0,432
10313	676029,381	7184571,735	899,239	894,676	0,005	0,007	0,017	0,432
10315	676764,012	7183058,110	924,972	920,409	0,004	0,007	0,017	0,432

Os alinhamentos devem ser posicionados no sentido transversal à linha de vôo. A escolha dos *marcos limítrofes* deve prevalecer em localidades livres de obstáculos e a sinuosidade do relevo pode variar de plana a suave de modo a não interferir nos valores médios obtidos, acompanhe na figura 28 o exemplo do rastreamento de um ponto.

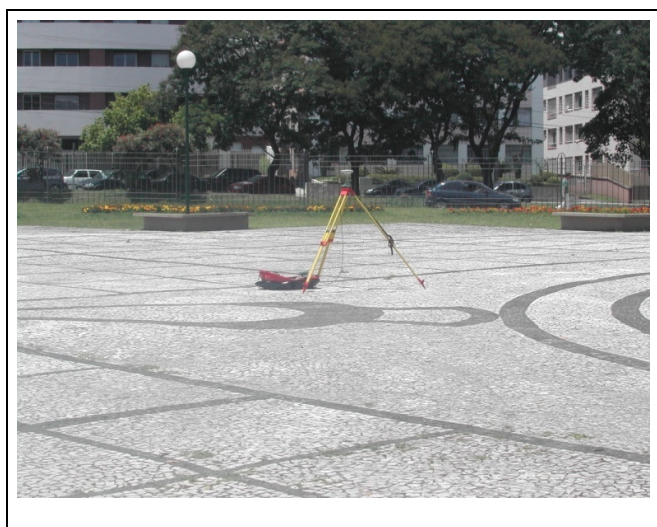


Fig. 28 – Localização ideal de um marco-limítrofe

Os *marcos limítrofes* são pontos de duplo apoio localizados nas bordas das faixas 1 e 3 e, portanto, coincidentes com as extremidades dos alinhamentos, as posições impõem ao ajustamento rigidez nas bordas.

modelo de ajustamento contempla três parâmetros;

$$Xa = [xa, ya, za]^T \quad 3.1$$

Xa valores ajustados dos parâmetros

O vetor das coordenadas ajustadas de parâmetros e por valores observados (lineares e angulares) ajustados são expressos por;

$$l_{i(\text{linear})}^2 = (x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 + (z_i - z_c)^2 \quad 3.2$$

$l_{i(\text{linear})}$ distância ao centróide
n número de pontos iluminados pelo sensor, contemplados no raio do círculo de 5 m para cada um dos oito marcos limítrofes medidos com o receptor GPS.

(i=1,2..n),
(c=1,2..8),

$l_{(\text{angular})}$ azimute plano, definido pelo meridiano de direção (segmento compreendido entre o centróide e o primeiro ponto lido(p) pela rotina adotada no Matlab) e os pontos restantes iluminados pelo sensor

$$l_{(\text{angular})} = \arctan g\left(\frac{x_{i+1} - x_c}{y_{i+1} - y_c}\right) - \arctan g\left(\frac{x_p - x_c}{y_p - y_c}\right) \quad 3.3$$

p – ponto que define o meridiano adotado como referência

O ponto que mais se aproxima do centróide é o local da ocupação do receptor GPS, pois é o centro da irradiação. Invariavelmente, a média do raio de medição se aproxima deste ponto. Logo, uma estratégia para obter l_o (vetor das observações aproximadas) é adotar a rotina do vizinho mais próximo.

A figura 29 ilustra o efeito que a rotina de cálculo exerce sobre a nuvem de observações no entorno do centro ocupado pelo receptor GPS. O raio de cinco metros é o limite de abrangência que contempla todas as observações inscritas no círculo. Para a operação de cálculo uma direção particular, entre o marco central e o primeiro ponto lido no processo de busca, é definida como meridiano. Ao final são medidas as distâncias euclidianas para todos os pontos que compreendem o círculo limite.

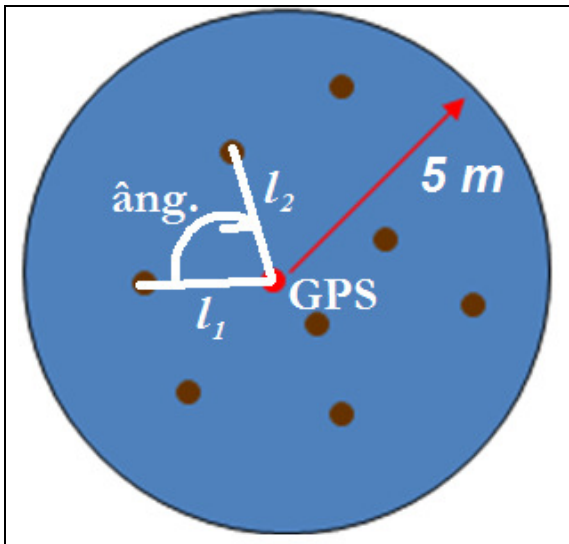


Fig. 29 – círculo de abrangências das observações

$$L = L_o - L_b = F(X_o) - L_b$$

3.4

$$L = \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \dots \\ l_n \end{pmatrix}$$

3.5

A matriz das derivadas parciais em relação aos parâmetros é descrita da seguinte forma;

$$A = \frac{\delta F}{\delta X_a} \Big|_{x_0} = \begin{vmatrix} \frac{\delta_{1a}}{\delta x_a} & \frac{\delta_{1a}}{\delta y_a} & \frac{\delta_{1a}}{\delta z_a} \\ \frac{\delta_{2a}}{\delta x_a} & \frac{\delta_{2a}}{\delta y_a} & \frac{\delta_{2a}}{\delta z_a} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\delta_{na}}{\delta x_a} & \frac{\delta_{na}}{\delta y_a} & \frac{\delta_{na}}{\delta z_a} \end{vmatrix} \quad 3.6$$

derivadas parciais de caráter linear;

$$\frac{\delta i_a}{\delta x_a} = \frac{-(x_i - xc)}{[(x_i - xc)^2 + (y_i - yc)^2 + (z_i - zc)^2]^{1/2}} \quad 3.7$$

i=1, 2, 3...n

$$\frac{\delta i_a}{\delta y_a} = \frac{-(y_i - yc)}{[(x_i - xc)^2 + (y_i - yc)^2 + (z_i - zc)^2]^{1/2}} \quad 3.8$$

i=1, 2, 3...n

$$\frac{\delta i_a}{\delta z_a} = \frac{-(z_i - zc)}{[(x_i - xc)^2 + (y_i - yc)^2 + (z_i - zc)^2]^{1/2}} \quad 3.9$$

i=1, 2, 3...n

derivadas parciais de caráter angular para dois pontos da nuvem de observações medidas pelo ALS. Atendem ao caráter de orientação e posicional do centróide. O tabela 3.5 resume as coordenadas obtidas do ajustamento dos pontos.

$$\frac{\delta i_a}{\delta \alpha} = \frac{-(y_{i+1} - yc)}{l_{i+1}^2} + \frac{(y_i - yc)}{l_i^2} \quad 3.10$$

$$\frac{\delta l_i}{\delta y_a} = \frac{-(x_{i+1} - xc)}{l_{i+1}^2} + \frac{(x_i - xc)}{l_i^2} \quad 3.11$$

Tabela 3.5 – Marcos limítrofes ajustados

FAIXA 1			
marcos	x(m)	y(m)	z (m)
marco_10101	670817,961	7188263,365	911,564
marco_10103	671414,650	7186682,840	932,552
marco_10105	672335,834	7184642,031	928,650
marco_10107	673052,996	7183116,039	904,122
FAIXA 3			
marcos	x(m)	y(m)	z (m)
marco_10309	674471,575	7188325,932	919,815
marco_10311	675183,562	7186745,982	912,052
marco_10313	676031,220	7184573,042	812,033
marco_10315	676764,012	7183058,109	920,529

3.2.3.1.1 Marcos limítrofes – rotina de processamento

O processo de cálculo destinado a obter a coordenada dos marcos residentes nas bordas da faixa um e faixa três é obtido por uma aproximação da média de um círculo de 5 m de extensão. A rotina adota um programa modulado, cada sub-

rotina desempenha uma operação específica. Foram adotados quatro módulos; *ajust_marco_limitrofe*, *busca_marco_limitrofe*, *parametrico_marco_limitrofe* e *iteracao_marc_limitrofe*. Acompanhe pelo fluxograma na figura 30.

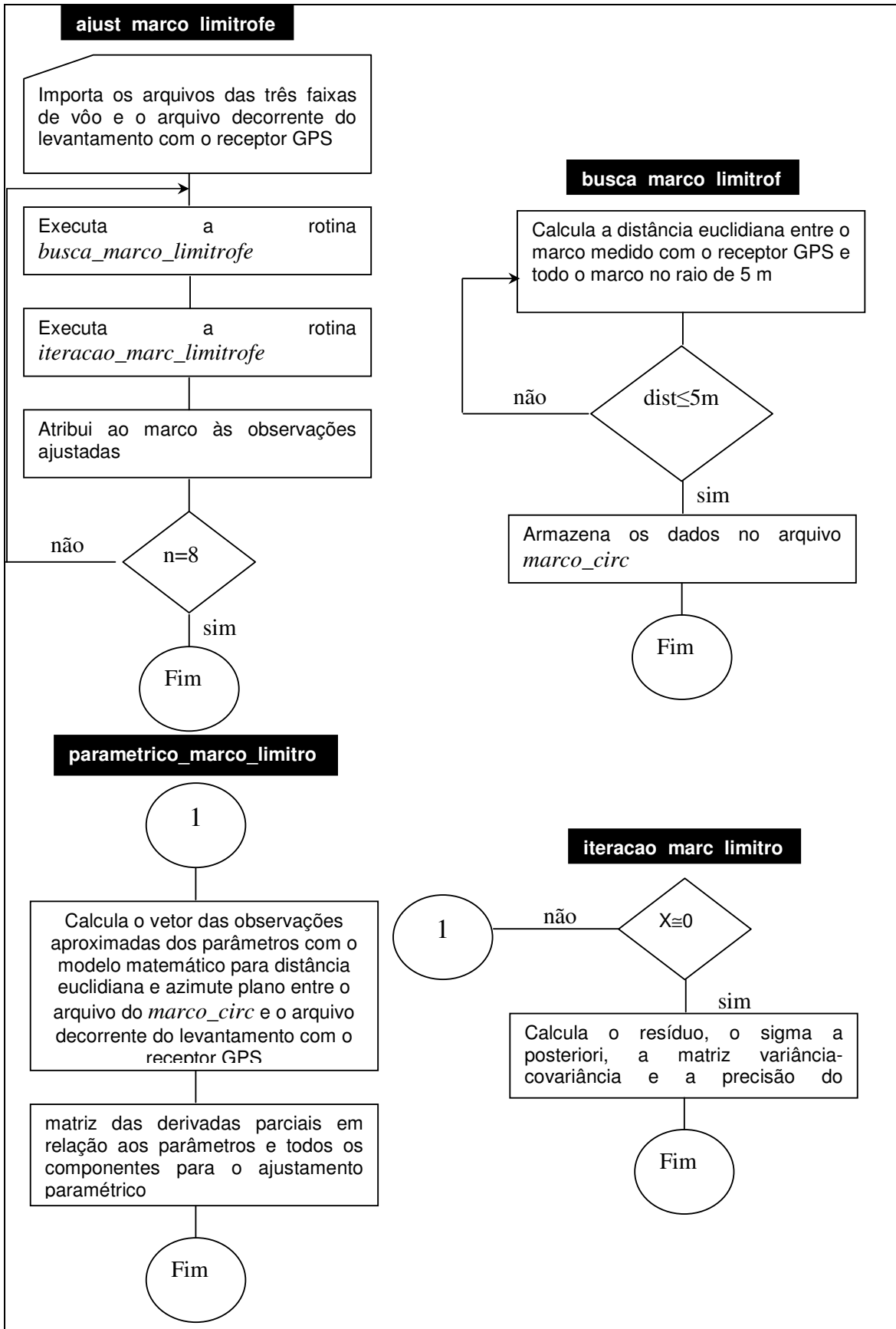


Fig. 30 – fluxograma do cálculo do marco_limitrofe

3.2.3.2 Marcos de apoio

O bloco de três faixas formado pela varredura do ALS faz evidenciar a presença de pontos notáveis (interseção de cruzamentos na malha viária, canto de cerca etc.), A ilustração na figura 31 traz a identificação do marco_10318 sobre a carta do município de Curitiba/PR, os pontos azuis representam os pontos que recaem sobre a superfície física. Os marcos de apoio não estão diretamente relacionados ao processo de ajustamento, mas constituem o arcabouço de todos os marcos diretamente relacionados ao sucesso da metodologia.

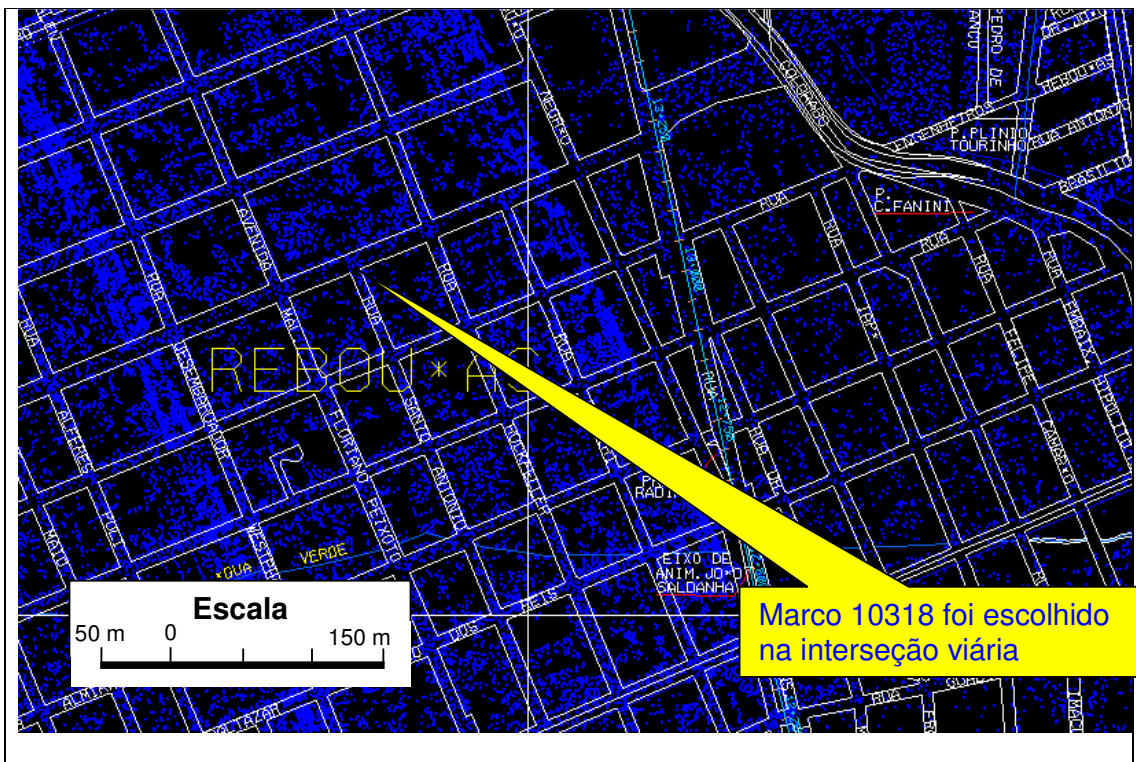


Fig. 31 – Registro do marco parcial sobre a malha viária

Os pontos que definem a localização dos marcos (preliminares) responsáveis pela materialização dos planos homólogos residem nas faces de cada faixa que delimitam as zonas de sobreposição lateral detalhados na tabela 3.6 e 3.7, são posicionados nas proximidades dos alinhamentos traçados sobre o bloco.

Tabela 3.6 Marcos de apoio: marcos da borda do bloco e marcos da ZSL_1(*)

Marcos do Bloco	Coordenadas Plano-Cartesianas	
	E(m)	N(m)
marcos da borda do bloco		
marco_10101	670821,260	7188253,450
marco_10309	674485,328	7188350,137
marco_10103	671433,057	7186671,433
marco_10311	675126,790	7186760,912
marco_10105	672411,894	7184691,893
marco_10313	676091,579	7184648,009
marco_10107	673034,170	7183114,670
marco_10315	676744,606	7183063,679
marcos nas ZSL_1		
marco_10102W	671625,254	7188274,867
marco_10102	671.688,65	7188276,564
marco_10102E	671791,99	7188279,301
marco_10110E	672526,755	7188298,882
marco_10110	672430,499	7188296,318
marco_10110W	672297,622	7188292,778
marco_10104W	672343,65	7186696,637
marco_10104	672478,337	7186700,225
marco_10104E	672589,448	7186703,185
marco_10112E	673106,874	7186716,968
marco_10112	672977,241	7186713,515
marco_10112W	672771,738	7186708,041
marco_10106W	673116,632	7184684,479
marco_10106	673266,150	7184682,426
marco_10106E	673518,339	7184678,96
marco_10114W	673831,293	7184674,658
marco_10114	673966,566	7184672,802
marco_10114E	674173,309	7184669,847
marco_10108W	673826,573	7183103,78
marco_10108	673988,587	7183101,557
marco_10108E	674092,875	7183100,121
marco_10116E	674826,099	7183090,045
marco_10116	674609,751	7183093,017
marco_10116W	674472,721	7183094,9

(*)ZSL_1 - Zona de Sobreposição Lateral entre a primeira faixa e a segunda faixa de varredura

Tabela 3.7 Marcos de apoio: marcos da ZSL_2(*), marcos para testes nas ZSL_1 e marcos para testes nas ZSL_2

Marcos do Bloco	Coordenadas Plano-Cartesianas	
	E(m)	N(m)
marcos nas ZSL_2		
marco_10216W	674959,172	7183088,216
marco_10216	675060,857	7183086,819
marco_10216E	675196,218	7183084,958
marco_10224W	675417,253	7183081,921
marco_10224	675533,321	7183080,326
marco_10224E	675635,385	7183078,923
marco_10214W	674287,818	7184668,385
marco_10214	674430,463	7184666,424
marco_10214E	674585,258	7184664,297
marco_10222W	674776,939	7184661,663
marco_10222	674922,515	7184659,662
marco_10222E	675037,884	7184658,077
marco_10212W	673401,389	7186724,814
marco_10212	673484,682	7186727,033
marco_10212E	673643,677	7186731,268
marco_10220W	673852,427	7186736,829
marco_10220	673953,892	7186739,531
marco_10220E	674083,486	7186742,984
marco_10210W	672796,242	7188306,061
marco_10210	672955,660	7188310,307
marco_10210E	673034,005	7188312,394
marco_10218W	673133,821	7188315,053
marco_10218	673259,296	7188318,396
marco_10218E	673373,742	7188321,444
marcos para testes nas ZSL_1		
marco_teste_01	672600,329	7187070,320
marco_teste_02	673469,857	7185985,689
marco_teste_03	673242,052	7185061,261
marco_teste_04	673966,601	7184063,310
marcos para testes nas ZSL_2		
marco_teste_05	673429,190	7187595,621
marco_teste_06	673757,838	7186194,914
marco_teste_07	674488,310	7185372,390
marco_teste_08	675040,180	7183447,791

(*)ZSL_2 - Zona de Sobreposição Lateral entre a segunda faixa e a terceira faixa de varredura

3.2.3.3 Marcos parciais homólogos de apoio nas zonas de sobreposição lateral

São aqueles marcos residentes sobre as ZSLs, veja na tabela 3.8 e 3.9, e tem o propósito de registrar a localização do centro dos nove planos homólogos que são gerados. As coordenadas dos marcos são obtidas da varredura criada pelo ALS ora sobre a faixa esquerda ora sobre a faixa direita. O principal critério que norteia a seleção da faixa sobre o qual o marco será calculado é a proximidade com o centro de cada faixa. É uma alternativa para minimizar a contaminação de distorções severas sobre medições existentes nas bordas.

Os marcos posicionados sobre as faixas seguem um critério; sempre que o marco estiver na borda de uma das faixas, a rotina de cálculo dos planos homólogos vai iniciar sobre a região da faixa de levantamento que estiver mais próxima do centro da faixa. A exemplo, os marcos 10102, 10104, 10106 e 10108 estão na borda da faixa dois, logo o cálculo dos marcos parciais homólogos inicia sobre a faixa um. Ao contrário, os marcos 10218, 10220, 10222 e 10224 próximo a borda da faixa dois serão calculados sobre a faixa três.

A programação estruturada foi adotada na rotina dedicada ao ajustamento das observações no ambiente computacional do MATLAB versão 7.04, pois contrapõe a programação linear em dois aspectos cruciais;

- ✓ todos os programas podem ser reduzidos a apenas três estruturas: seqüência, decisão e iteração e;
- ✓ a capacidade de usar as sub-rotinas e as funções independentes na criação de estruturas simples em seus programas.

Dentre as diversas rotinas modulares usadas no ajustamento a determinação do marco parcial homólogo se deu com o uso do algoritmo do vizinho mais próximo. Segundo BOTELHO et al., 2005, o algoritmo aplicado assegura que o valor interpolado seja um dos valores originais da varredura com o ALS, ou seja, não gera novos valores.

A obtenção das coordenadas planialtimétricas devida aos marcos parciais homólogos de apoio são estimadas em razão da submissão dos marcos de apoio à rotina do vizinho mais próximo.

Tabela 3.8 – Marcos parciais homólogos: marcos parciais e marcos parciais à este

Marcos parciais da ZSL	Coordenadas do Terno Cartesiano		
	x(m)	y(m)	z(m)
marco_parc_10102	671.683,440	7.188.276,300	965,610
marco_parc_10104	672.476,450	7.186.698,100	914,700
marco_parc_10110	672.434,620	7.188.303,500	926,630
marco_parc_10112	672.981,470	7.186.707,700	919,230
marco_parc_10210	672.953,740	7.188.310,200	915,680
marco_parc_10212	673.486,380	7.186.722,100	932,050
marco_parc_10218	673.255,520	7.188.317,500	910,600
marco_parc_10220	673.954,710	7.186.739,200	906,550
marco_parc_10106	673.262,470	7.184.685,000	924,400
marco_parc_10108	673.988,280	7.183.107,500	912,590
marco_parc_10114	673.968,730	7.184.670,200	905,560
marco_parc_10116	674.611,630	7.183.097,000	906,980
marco_parc_10214	674.427,920	7.184.662,800	894,960
marco_parc_10216	675.065,410	7.183.085,800	916,050
marco_parc_10222	674.926,360	7.184.660,300	890,850
marco_parc_10224	675.532,830	7.183.083,000	889,460
marco_parc_10102E	671.785,350	7.188.279,900	959,680
marco_parc_10104E	672.591,830	7.186.705,200	913,120
marco_parc_10110E	672.525,180	7.188.298,400	925,210
marco_parc_10112E	673.106,060	7.186.714,900	924,780
marco_parc_10210E	673.040,230	7.188.313,100	914,870
marco_parc_10212E	673.642,580	7.186.730,200	920,440
marco_parc_10218E	673.378,180	7.188.322,400	910,990
marco_parc_10220E	674.079,640	7.186.754,400	901,920
marco_parc_10106E	673.519,410	7.184.680,800	917,500
marco_parc_10108E	674.094,670	7.183.102,600	914,390
marco_parc_10114E	674.175,140	7.184.668,300	902,0100
marco_parc_10116E	674.831,760	7.183.093,000	905,980
marco_parc_10214E	674.583,110	7.184.662,300	893,390
marco_parc_10216E	675.194,360	7.183.088,800	907,920
marco_parc_10222E	675.045,820	7.184.663,300	890,500
marco_parc_10224E	675.636,270	7.183.081,100	885,330

Tabela 3.9 – Marcos parciais homólogos: marcos parciais à oeste e marcos parciais para testes

Marcos parciais da ZSL	Coordenadas do Terno Cartesiano		
	x(m)	y(m)	z(m)
marco_parc_10102W	671.626,700	7.188.276,200	961,810
marco_parc_10104W	672.342,470	7.186.691,200	919,310
marco_parc_10110W	672.294,350	7.188.298,200	933,450
marco_parc_10112W	672.773,330	7.186.708,800	915,350
marco_parc_10210W	672.792,920	7.188.306,800	919,050
marco_parc_10212W	673.399,030	7.186.720,300	934,510
marco_parc_10218W	673.128,870	7.188.314,800	912,200
marco_parc_10220W	673.850,390	7.186.738,300	910,770
marco_parc_10106W	673.120,330	7.184.689,700	926,840
marco_parc_10108W	673.827,710	7.183.104,000	913,030
marco_parc_10114W	673.830,740	7.184.676,700	911,310
marco_parc_10116W	674.476,590	7.183.092,300	917,440
marco_parc_10214W	674.288,060	7.184.659,900	897,190
marco_parc_10216W	674.957,640	7.183.086,600	912,700
marco_parc_10222W	674.778,590	7.184.661,400	891,880
marco_parc_10224W	675.419,770	7.183.082,700	894,830
marco_teste_parc_01	672.604,100	7.187.068,700	934,320
marco_teste_parc_02	673.469,570	7.185.985,700	900,620
marco_teste_parc_03	673.239,720	7.185.062,800	924,890
marco_teste_parc_04	673.967,080	7.184.062,000	902,130
marco_teste_parc_05	673.428,660	7.187.594,500	925,080
marco_teste_parc_06	673.758,750	7.186.194,700	899,300
marco_teste_parc_07	674.491,220	7.185.372,600	896,120
marco_teste_parc_08	675.042,290	7.183.447,800	901,260

3.2.3.3.1 Marcos parciais – rotina de processamento

O processo de cálculo destinado a obter a coordenada dos marcos parciais no interior do bloco, novamente, adota um programa modulado, segundo o qual interagem um programa mestre e outro programa escravo, *ajustamento_geral_101107* e *busca_marco_limitrofe*, respectivamente. Observe a rotina na figura 32.

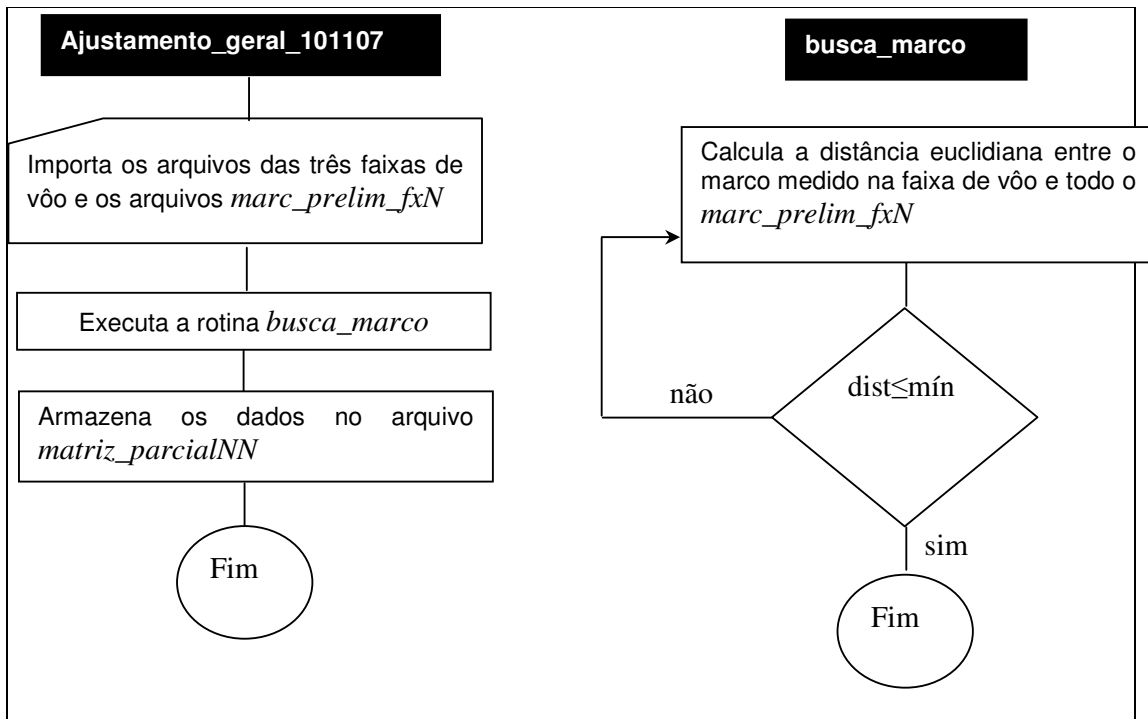


Fig .32 – fluxograma do cálculo do marcos_parciais

3.2.3.4 Determinação dos planos homólogos sobre a superfície física

Foi proposta uma metodologia alternativa para o ajustamento praticado por KAGER (2004), KAGER (2006) e RIES et al. (2002) que encerra o mesmo princípio, intitulado *princípio dos planos homólogos*. Em função da limitação física e operacional de associar pontos homólogos nas faixas de sobreposição lateral à nuvem de pontos criada pelo ALS, a metodologia adota um plano, i.é, um *plano homólogo* que seja comum a duas faixas contínuas de varredura. Em última análise, realiza função assemelhada aos pontos de ligação (pontos de passagem) de faixas tradicionalmente adotados nas atividades de aerotriangulação. A figura 33 ilustra a localidade que ocorre a zona de sobreposição lateral e, conseqüentemente, região de distribuição dos planos homólogos. Há nas três faixas dedicadas ao perfilamento com o sensor laser duas zonas de sobreposição lateral; entre a primeira faixa e a segunda e, ao fim, entre a segunda e a terceira faixa.

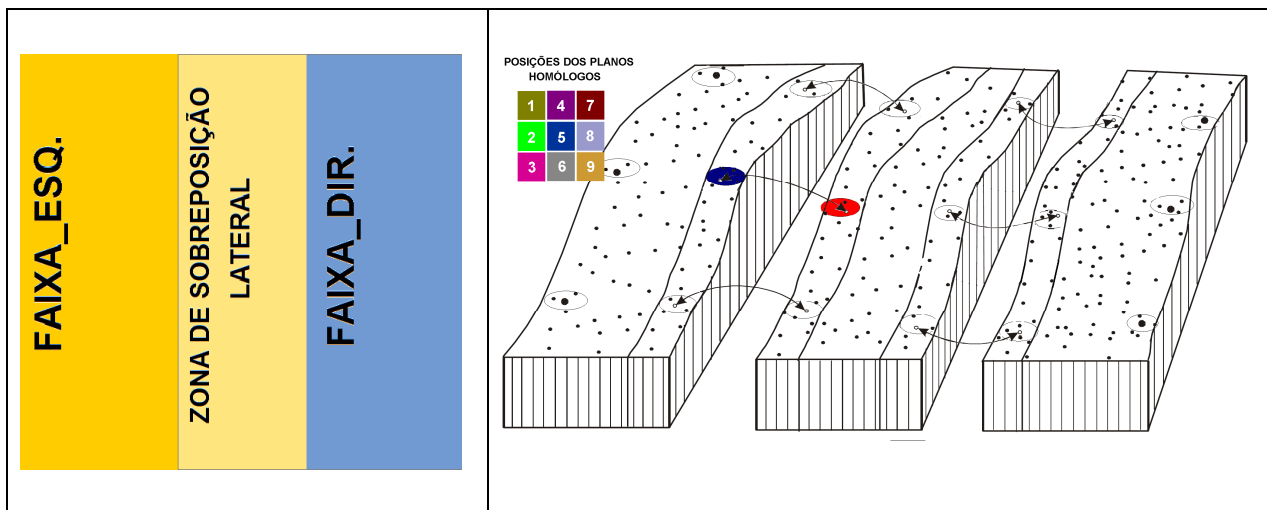


Fig. 33 – Localização da zona de sobreposição lateral
Fonte: Adaptado de KAGER (2004)

A pesquisa discorda, ao menos na semântica, do conceito direcionado para *faixa homóloga* (termo original para *strip tie*) sustentada por KAGER (2003), KAGER (2004), KAGER (2006). O motivo é a forma de interpretação. A tese corrobora o entendimento que a faixa homóloga é por concepção decorrente do planejamento do aerolevanteamento. Logo, não depende da existência de planos homólogos para se estabelecer.

O registro dos planos homólogos inicia com as coordenadas atribuídas aos marcos parciais relacionados na tabela 3.6. O marco parcial é o centro de uma figura circular com vinte metros de raio reúne todos os pontos medidos (iluminados) pelo ALS. Após o qual são sorteados aleatoriamente três pontos não colineares que possam subsidiar os parâmetros necessários à geração de um plano e, conseqüentemente, a equação.

Não coube, nesta etapa, desenvolver qualquer iniciativa de ajustar os pontos dedicados aos parâmetros para determinação do plano com uma superabundância de medições, pois as tentativas que se voltaram para esta atividade se mostraram inconsistentes. Pelo fato de todas as operações de cálculo, contemplados na metodologia, prescindirem de uma validação de pontos medidos com o receptor GPS, as medições alcançadas com o processo de ajustamento resultaram em localidades muito distantes daquelas previstas pela distribuição parcial de marcos elencada na tabela 3.7. É um detalhe muito importante, porque as locações realizadas com o receptor GPS são realizadas no centro de uma capital densamente ocupada e, sobretudo, por esta razão, se houver um distanciamento acentuado dos locais previstos no planejamento, pode ocorrer situações indesejáveis para o projeto. Pontos situados no centro de vias públicas de trânsito de veículos, centro de condomínios de edifícios, telhados de prédios, lâminas d'água entre outros, tais como os testes preliminares realizados apontaram. Logo, a utilização da equação do plano, figura 34, na forma mostrada aponta para uma solução que são necessárias três observações.

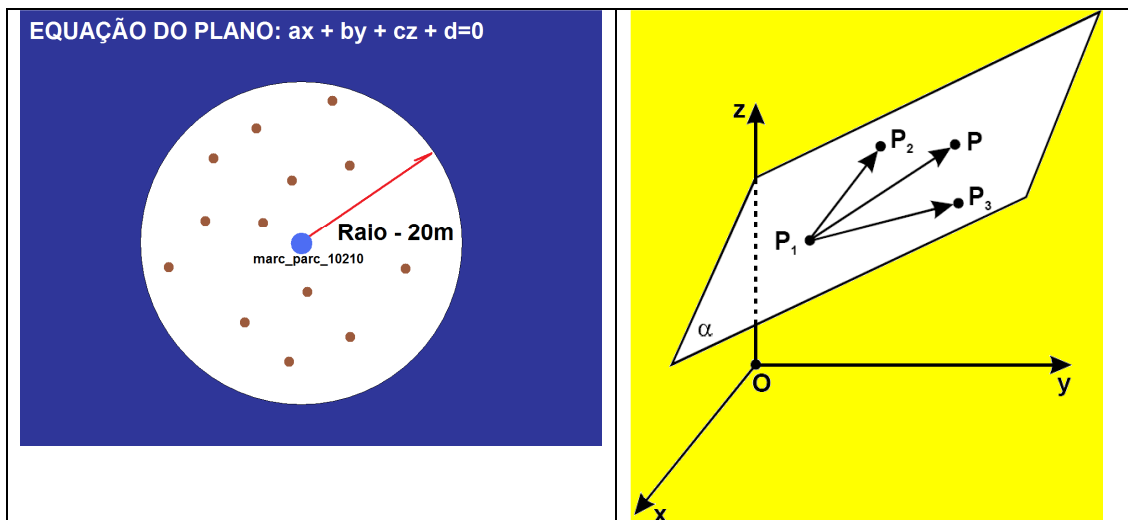


Figura 34 – Plano homólogo, a ilustração sugere o círculo criado entorno do marc_parc_210

O processo é repetido para todos os oito planos (ou zonas) criados, na razão de um afastamento de vinte por cento do diâmetro contado o marco inicial no sentido transversal e longitudinal a direção da linha de vôo. Significa dizer, cada marco parcial homólogo relacionado na tabela 3.7 é vinculado a nove planos. O arranjo espacial dos planos permite a concepção de verificação em toda a extensão do círculo de 20 m à estimativa do ponto homólogo e, ao mesmo tempo, supera as barreiras do formato idealizado por KAGER (2005), que prevê disposição de de 20 a 150 unidades de um plano homólogo, independente da localidade geográfica.

A figura 35 mostra a área comum entre duas zonas circulares, ao lado direito são dispostos a posição de cada centro de círculo. O fato permite afirmar que os oito círculos geram uma faixa de sobreposição em relação ao círculo central maior do que a área original.

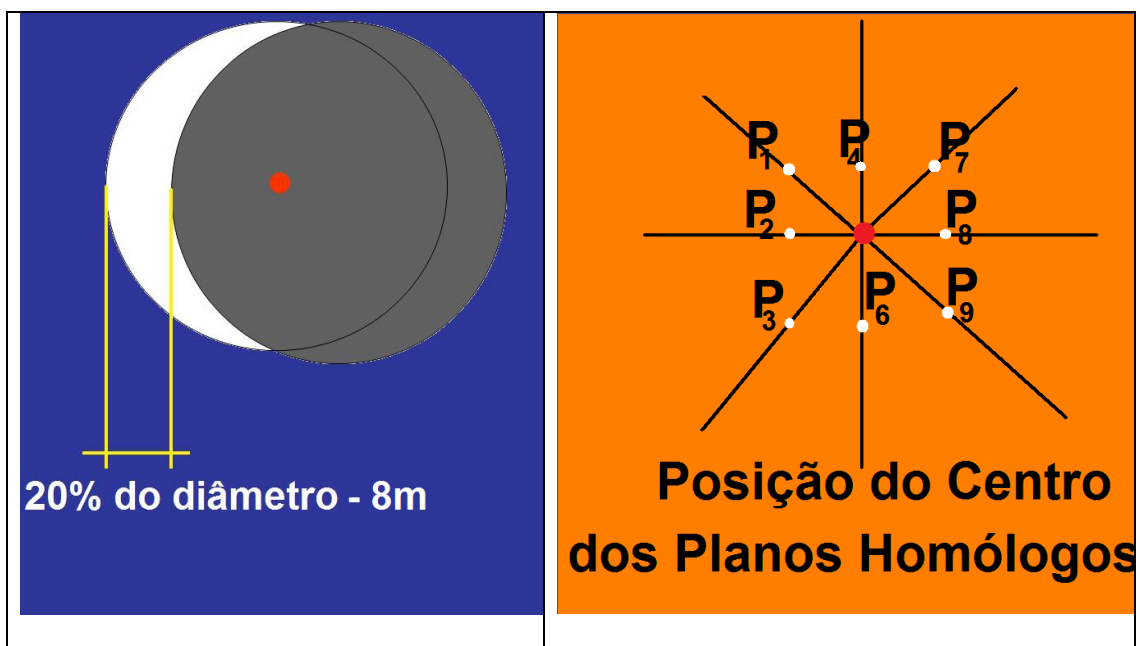


Fig. 35 – Zona de sobreposição entre os planos homólogos e a disposição dos centros de planos homólogos

A equação geral do plano, acompanhe as equações 3.9, é determinada por três pontos não colineares. Seja:

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0 \\ a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0 \\ a_3x + b_3y + c_3z + d_3 = 0 \\ a_4x + b_4y + c_4z + d_4 = 0 \\ a_5x + b_5y + c_5z + d_5 = 0 \\ a_6x + b_6y + c_6z + d_6 = 0 \\ a_7x + b_7y + c_7z + d_7 = 0 \\ a_8x + b_8y + c_8z + d_8 = 0 \\ a_9x + b_9y + c_9z + d_9 = 0 \end{cases} \quad 3.12$$

$$P_1 = (x_1, y_1, z_1)$$

$$P_2 = (x_2, y_2, z_2)$$

$$P_3 = (x_3, y_3, z_3)$$

O plano α , figura 34, é definido geometricamente pelos pontos P_1 , P_2 e P_3 . Um ponto genérico $P=(x,y,z)$ pertence ao plano α se, e somente se, os vetores $(P-P_1)$, (P_2-P_1) e (P_3-P_1) forem coplanares:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (3.13)$$

O determinante representado pela expressão matemática (3.10) conduz a uma equação linear com três variáveis – a expressão do plano que contém os três pontos. A equação geral do plano é definida pela expressão (3.14):

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (3.14)$$

A dificuldade de obter a verdadeira dimensão da variável independente d da expressão (3.14) é solucionada resgatando o *princípio do produto vetorial*, pois se os dois vetores $\overrightarrow{P_1P_2}$ e $\overrightarrow{P_1P_3}$ ilustrados na figura 34 são pertencentes ao espaço R^3 o produto vetorial $\overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_3}$ é um terceiro vetor \vec{N} , ortogonal ao

plano que faz evidenciar integralmente todas as variáveis da expressão matemática.

3.2.3.5 Cálculo dos pontos homólogos

SCHENK (2001) destaca a ocorrência de uma distorção, de difícil solução, que afeta as bordas das faixas de aerolevantamento e recebe o nome de discrepância vertical. Apesar do cuidado no processo de calibração do ALS, a discrepância afeta a todas as observações amostradas sobre a superfície iluminada que ocupam as bordas laterais das faixas. A discrepância vertical (Δz), na figura 36, é causada pelo erro angular na orientação do feixe de laser. A imagem evidencia a diferença vertical atribuída a dois pontos que apesar de compartilharem as coordenadas geográficas divergem em relação a coordenada altimétrica.

A técnica de interpolação analítica descrita pela pesquisa minimiza a influência da discrepância vertical nas ZSL.

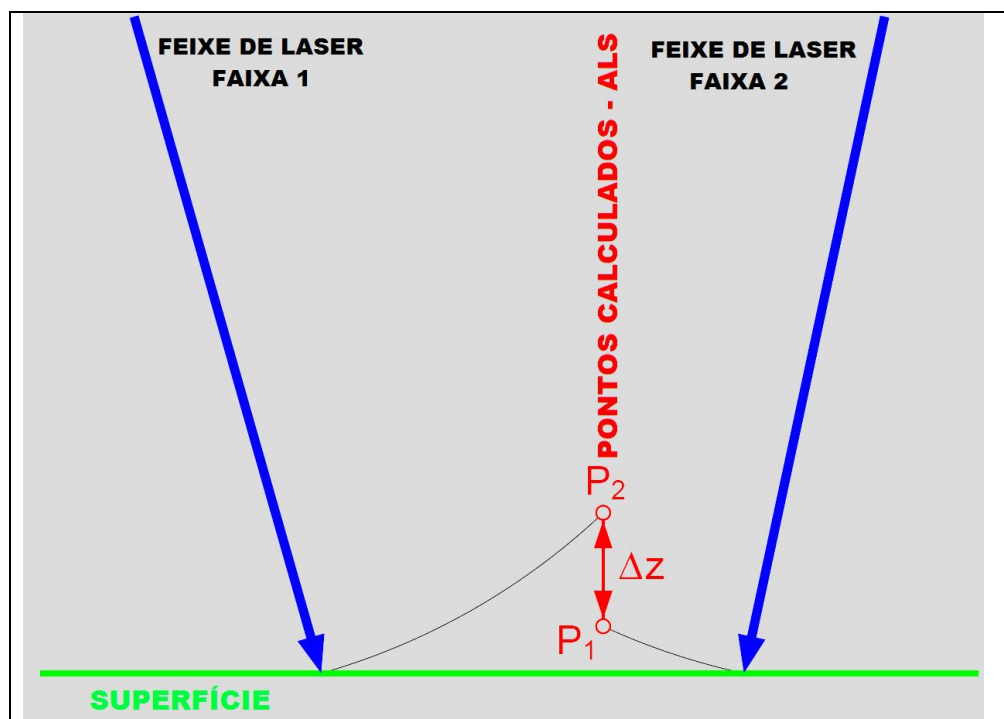


Fig. 36 – Perfilamento com a discrepância vertical (ΔZ)
Fonte: SCHENK (2001)

Três planos concorrentes e convergentes se interceptam segundo um ponto P, a figura 37 mostra a propriedade. A solução do sistema de equações propõe o

método de Cramer para determinar as coordenadas do marco que expressa a interseção entre as os planos que pertencem a duas faixas contíguas.

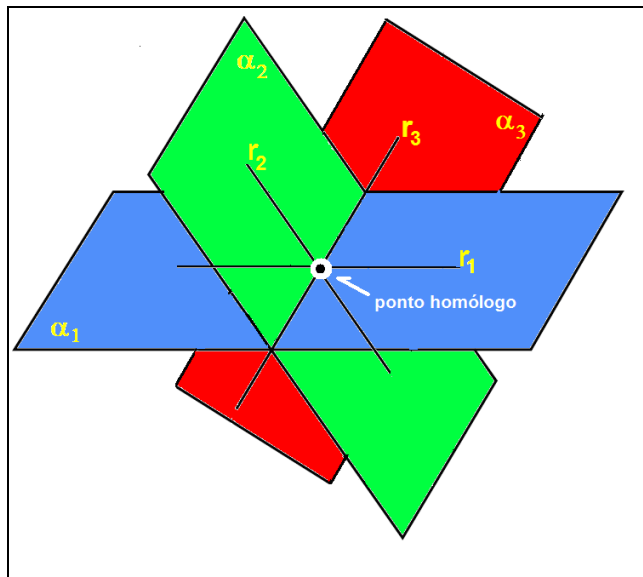


Figura 37 – Evidência do *ponto - homólogo*

Se o sistema linear genérico (eq. 3.15) é assemelhado a equação do plano, o elenco correspondente às três equações dos planos homólogos pode ser solucionado pelo método.

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \dots \dots \dots = \dots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + \dots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases} \quad 3.15$$

Os coeficientes $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{nn}$ são números reais ou complexos, os termos independentes b_1, b_2, \dots, b_n , são números reais ou complexos e x_1, x_2, \dots, x_n são as incógnitas do sistema $n \times n$.

A notação matricial pode ser expressa por; $AX=B$. Seja;

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} = A \quad \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix} = X \quad \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{pmatrix} = B$$

As três faixas de aerolevante abordadas na pesquisa revelam duas ZSLs e, particularmente, neste setor será criado para cada nove planos concorrentes um ponto homólogo. Os nove planos se distribuem da seguinte forma; os cinco primeiros planos são posicionados sobre a faixa esquerda e os quatro restantes sobre a faixa à direita. A figura 38 ilustra a distribuição dos planos sobre as faixas de levantamento correspondentes. Cabe lembrar que o círculo é apenas uma forma de representação dos planos homólogos, pois são definidos pelo modelo matemático apurado com a regra de Cramer.

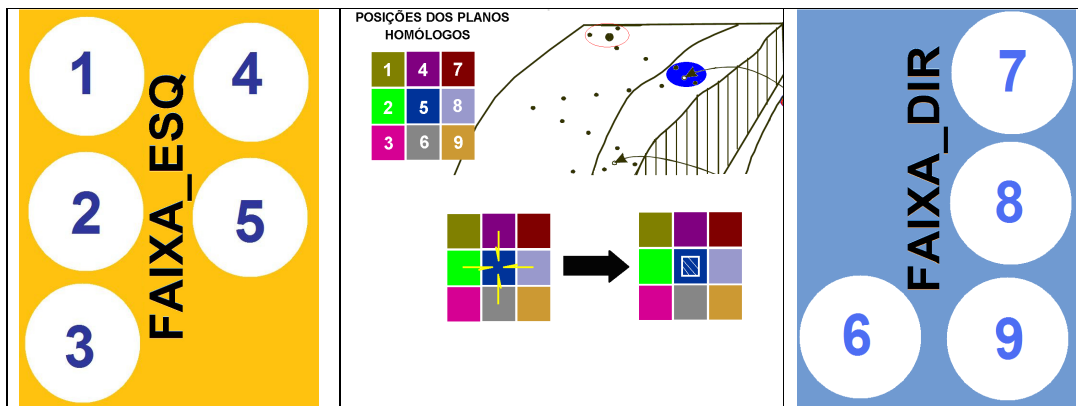


Figura 38 – Posicionamento de um dos polígonos que abrigam o plano homólogo sobre a ZSL

Para calcular o ponto homólogo é crucial a seleção de três planos concorrentes que possam atender a condição geométrica de corrigir a discrepância vertical. O efeito é obtido, acompanhe pela figura 39, quando as coordenadas calculadas pelo método de Cramer estimam a localização de um ponto sobre a superfície amostrada decorrente da combinação de três planos concorrentes, sendo dois planos de uma faixa e o terceiro da faixa vizinha.

O ponto de interseção entre os três planos concorrentes criados é o **ponto de apoio suplementar - ponto homólogo**. O processo destinado ao cálculo do ponto homólogo é repetido nas duas ZSLs residentes no interior do bloco de faixas e recebem uma seqüência de números pares. Inicia no 10102 e termina no 10224, a figura 26 traz a distribuição espacial dos marcos no bloco.

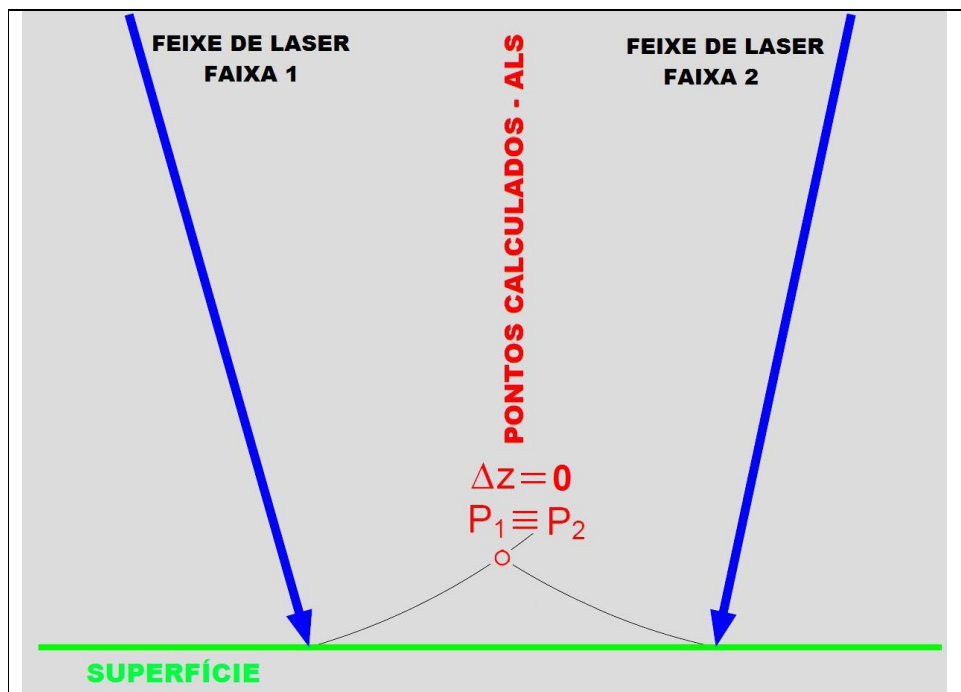


Fig. 39 – Perfilamento sem a discrepância vertical (ΔZ)
 Fonte: Adaptado de SCHENK (2001)

Foram criadas com o MATLAB duas rotinas modulares que agem como filtros; o primeiro dedicado a criar todas as combinações possíveis de três planos dentre os nove gerados e, por fim, outro instrumento de filtragem que visa garantir que as combinações praticadas para o cálculo do ponto – homólogo fosse híbrida. Quer dizer, pelo menos um deles pertença à faixa homóloga (à esquerda ou à direita) diferente daquela que abriga os dois outros planos.

Não obstante, a preocupação com a obtenção de medidas que levem a determinação da matriz dos coeficientes quadrada e não singular, houve um condicionante adicional incorporado a rotina do MATLAB. Todas as coordenadas calculadas para o ponto homólogo não podem convergir para um valor que se fizesse superior a 8m do marco parcial homólogo, pois as atividades de campo dedicadas ao levantamento de coordenadas com receptores GPS nos logradouros públicos se tornam mais ágeis do que a realização em propriedades particulares que, inexoravelmente, demandam de solicitações e trâmites burocráticos para acesso.

A tabela 3.10 e 3.11 resume os valores obtidos para todos os pontos homólogos nas ZSLs.

Tabela 3.10 – Marcos homólogos: Marcos homólogos da ZSL_1

Marcos homólogos da ZSL	Coordenadas do Terno Cartesiano		
	x(m)	y(m)	z(m)
marcos da ZSL_1 (entre a faixa 1 e a faixa 2)			
tie_point_10102W	671.622,040	7.188.274,700	961,752
tie_point_10102	671.686,635	7.188.280,684	966,488
tie_point_10102E	671.781,780	7.188.282,300	959,735
tie_point_10104W	672.348,880	7.186.692,200	919,409
tie_point_10104	672.482,806	7.186.690,739	914,182
tie_point_10104E	672.590,860	7.186.706,900	913,160
tie_point_10106W	673.128,030	7.184.685,400	925,952
tie_point_10106	673.260,309	7.184.682,072	924,428
tie_point_10106E	673.518,980	7.184.687,065	917,092
tie_point_10108W	673.825,830	7.183.102,300	912,465
tie_point_10108	673.987,405	7.183.103,966	913,983
tie_point_10108E	674.100,180	7.183.100,700	915,939
tie_point_10110E	672.520,578	7.188.296,853	925,747
tie_point_10110	672.434,840	7.188.287,400	927,989
tie_point_10110W	672.293,985	7.188.305,435	933,181
tie_point_10112E	673.105,197	7.186.715,674	927,398
tie_point_10112	672.984,458	7.186.701,840	922,022
tie_point_10112W	672.771,842	7.186.711,465	916,104
tie_point_10114W	673.827,905	7.184.677,676	911,582
tie_point_10114	673.967,335	7.184.661,682	905,238
tie_point_10114E	674.180,354	7.184.660,194	902,466
tie_point_10116W	674.479,247	7.183.091,044	916,682
tie_point_10116E	674.828,450	7.183.094,002	906,035
tie_point_10116	674.613,420	7.183.102,100	907,981
tie_point_01	672.435,832	7.188.307,133	923,074
tie_point_02	672.528,570	7.188.302,790	925,488
tie_point_03	673.232,560	7.185.062,500	925,947
tie_point_04	672.301,831	7.188.298,789	929,620

Tabela 3.11 – Marcos homólogos: Marcos homólogos da ZSL_2

Pontos homólogos da ZSL	Coordenadas do Terno Cartesiano		
	x(m)	y(m)	z(m)
marcos da ZSL_2(entre a faixa 2 e a faixa 3)			
tie_point_10210W	672.795,630	7.188.301,000	917,393
tie_point_10210	672.961,476	7.188.313,676	915,231
tie_point_10210E	673.048,480	7.188.317,656	914,745
tie_point_10212W	673.399,050	7.186.726,300	934,867
tie_point_10212	673.486,370	7.186.725,900	931,932
tie_point_10212E	673.637,197	7.186.736,418	917,907
tie_point_10214W	674.292,062	7.184.665,126	897,124
tie_point_10214	674.425,160	7.184.673,900	894,514
tie_point_10214E	674.575,910	7.184.657,000	896,422
tie_point_10216W	674.954,237	7.183.079,481	913,309
tie_point_10216	675.074,080	7.183.086,700	915,858
tie_point_10216E	675.196,041	7.183.096,873	901,513
tie_point_10218W	673.130,650	7.188.317,200	911,401
tie_point_10218	673.260,446	7.188.318,349	910,621
tie_point_10218E	673.379,220	7.188.322,500	911,134
tie_point_10220W	673.847,765	7.186.731,487	911,176
tie_point_10220	673.950,590	7.186.735,483	907,030
tie_point_10220E	674.075,566	7.186.759,315	902,064
tie_point_10222W	674.780,630	7.184.644,300	891,972
tie_point_10222	674.936,31	7.184.659,800	890,843
tie_point_10222E	675.042,614	7.184.670,322	892,196
tie_point_10224W	675.417,450	7.183.089,000	894,544
tie_point_10224	675.535,120	7.183.078,000	890,763
tie_point_10224E	675.637,810	7.183.081,900	885,583
tie_point_05	675.125,417	7.186.764,370	936,49109
tie_point_06	673.767,390	7.186.194,600	898,989
tie_point_07	676.083,847	7.184.648,679	897.88136
tie_point_08	675.038,800	7.183.455,000	900,575

3.2.3.6 Observações de campo

As medidas voltadas para estimar as coordenadas dos marcos - estação, marcos limítrofes nas bordas do bloco, marcos testes e os marcos parciais nas ZSLs revelam uma característica peculiar – a necessidade de validar com os receptores GPS as observações de campo. As medições são os insumos necessários e suficientes para suprir as equações adotadas para o ajustamento. Os marcos – estação cumprem função de fundamental importância no levantamento topográfico – a transmissão das correções diferenciais. As atividades dedicadas à locação de pontos foram realizadas com o par de receptores GPS de dupla frequência acompanhados de rádio – transmissão. O propósito da locação, acompanhe ilustração na figura 40, dos pontos homólogos elencados na tabela 3.8 é estimar a diferença, se houver, entre a medida apoiada pelo ALS em comparação com as medições apontadas pelo receptor GPS com o método RTK.

O monitoramento da constelação artificial GPS é contínuo, o sistema operacional responsável pela recepção do sinal dos satélites calcula e exibe nas telas dos equipamentos novas posições com ambigüidades resolvidas e completamente independentes. As posições tornam-se disponíveis com precisão centimétrica e com uma taxa de atualização de até 20 Hz, segundo especificação técnica do fabricante.

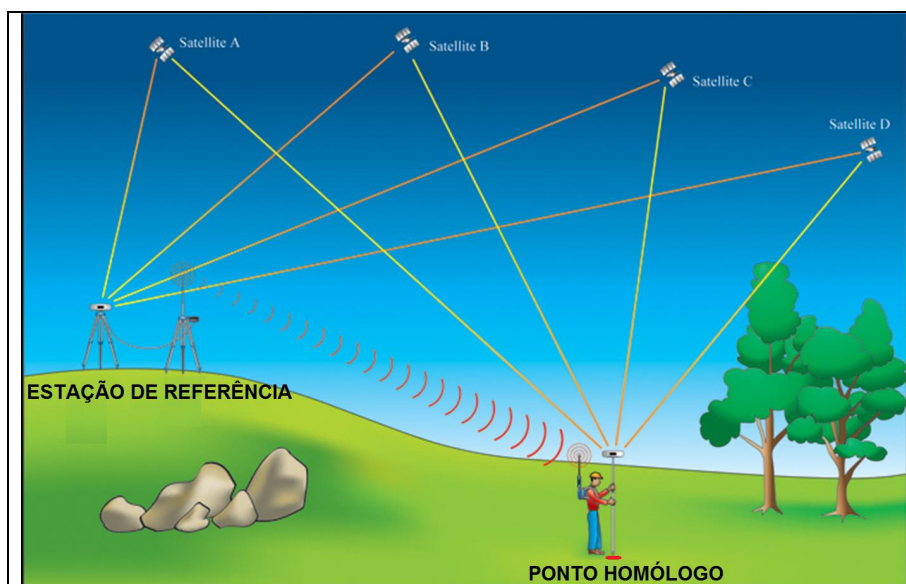


Fig. 40 – Locação do ponto homólogo
Fonte: LEICA (2001)

Se o receptor GPS ocupa um dos seis marcos–estação a coordenada posicional é inserida no gestor de dados do equipamento e se torna referência de todo o processo de locação dos levantamentos realizados ao alcance daquele marco–estação. O método cinemático em tempo real (sigla em inglês para RTK) favorece a transmissão continuamente e abrevia o procedimento conhecido como pós-processamento dos dados rastreados. A operação com o segundo receptor GPS consiste na localização das coordenadas analíticas, estimadas pela rotina praticada na plataforma computacional MATLAB, atribuídas ora a marcos limítrofes ora a marcos residentes nas ZSLs. Em um levantamento em Tempo Real, o GPS remoto recebe os dados transmitidos pela referência e combina-os com os seus próprios dados para calcular as coordenadas continuamente.

A escolha dos referenciais topográficos ou geodésicos adotados para materializar os pontos na superfície física é imprescindível para atender as demandas necessárias que se prestam ao restabelecimento legítimo da geometria projetiva. Embora na prática, as superfícies referenciais sejam híbridas, pois adotam dois sistemas; posicional (para coordenadas planas ou geográficas) e altimétrico.

3.2.3.6.1 Ondulação geoidal

A altura geoidal ou ondulação geoidal é o termo atribuído ao afastamento entre o elipsóide de referência e o geóide, contado sobre a normal ao elipsóide que passa pelo ponto. Em função da rapidez e precisão na obtenção de coordenadas, a tecnologia GPS revolucionou as atividades que necessitam de posicionamento. Isto tem gerado um crescente interesse por um modelo de ondulação geoidal mais acurado e preciso para aplicações nas áreas de mapeamento e engenharia, onde há necessidade do conhecimento de uma altitude com significado físico, a altitude ortométrica, veja figura 41. É importante lembrar que todas as atividades destinadas a conferir as medições realizadas com o ALS expresso pelos marcos_homólogos, marcos_limítrofes e marcos_testes foram realizados com o receptor GPS, logo o cuidado na apuração da ondulação geoidal está diretamente relacionado às coordenadas altimétricas, fundamentais à validação das medidas.

A locação das coordenadas que sustentam a metodologia destinada ao ajustamento atribui ao geóide a referência para o vetor vertical - componente z das coordenadas. Porém, é uma medição que encontra restrição com o uso dos receptores GPS. GENRO (2006) e GOLDANI (2006) fizeram estudos voltados para modelar o comportamento da ondulação geoidal no estado do Paraná e LOBIANCO (2005) realizou um modelo para o território brasileiro, o aplicativo está disponibilizado no portal do IBGE - o MAPGEO. E, conseqüentemente, permite a aproximação das coordenadas levantadas pelo receptor GPS às medidas que fazem referência ao geóide.

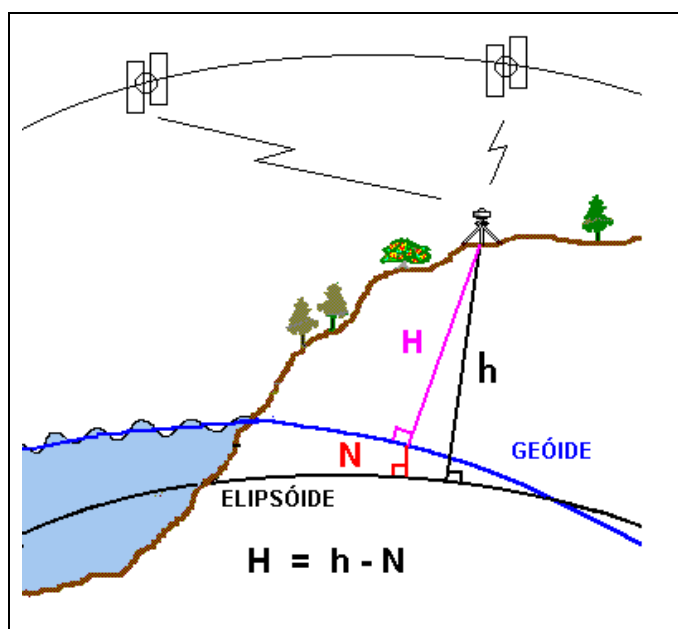


Figura 41 – Ondulação geoidal
Fonte: LOBIANCO (2004)

GENRO (2006) sustenta que as ondulações geoidais, também conhecida por alturas geoidais, extraídas de um modelo geoidal com as altitudes geométricas fornecidas pelos receptores da GPS é uma alternativa viável na obtenção de altitudes ortométricas. GOLDANI (2006), por sua vez, admite que é indiscutível a contribuição da determinação de modelos geoidais para a estimativa da altitude ortométrica decorrente do levantamento realizado com receptores GPS.

Para a pesquisa foi adotada a rede de RRNN ocupada por GENRO (2006) destinada a subsidiar as observações voltadas para a modelagem da ondulação geoidal.

A precisão das altitudes ortométricas calculadas a partir da conjunção de modelos geoidais com medidas obtidas do rastreamento de satélites artificiais estará

sempre em função não somente da precisão dos próprios modelos geoidais, como também da precisão das altitudes geométricas. A estimativa da altitude ortométrica é obtida pela expressão:

$$H_{ORT} = H_{GEOM} - N \quad 3.16$$

$$\delta_{Hort} = \sqrt{(\delta_{elip})^2 + (\delta_N)^2} \quad 3.17$$

onde:

H_{ORT}, H_{GEOM}	altitudes ortométrica e geométrica, respectivamente
N	ondulação geoidal
δ_{Hort}	desvio-padrão da altitude ortométrica
δ_{elip}, δ_N	desvio-padrão da altitude geométrica e desvio-padrão da ondulação geoidal

O modelo matemático (3.16) é importante, pois revela componentes que são inseridos nas rotinas de cálculo para o devido ajustamento, sobretudo, para a matriz peso e redução das distorções que afetam as medições com o ALS. São a altitude geométrica, a ondulação geoidal e os respectivos desvios-padrão.

A estimativa da altitude ortométrica praticada na pesquisa foi obtida da rede de estações, quadro 3.2, criada por GENRO (2006) e a estação LAPA, a RN de referência e a tabela 3.12 expõe as coordenadas obtida com o receptor GPS.

QUADRO 3.2 - Rede altimétrica do Paraná

ESTAÇÃO	COORDENADAS GEODÉSICAS [SIRGAS2000]			ALTITUDE ORTOMÉTRICA	ALTURA GEOIDAL (h-H)	ALTURA GEOIDAL (INTERPOLADOR)	RESÍDUO ALTURA
	λ [°]	ϕ [°]	h [m]	H [m]	$N_{GPS_{niv}}$ [m]	$N_{GEOID_{EPR2006}}$ [m]	v
PARAN	-52,4701118000	-23,0671635000	408,931	410,549	-1,618	-1,850	-
CORNP	-50,6510887000	-23,1825275000	676,950	681,031	-4,081	-4,036	-
ICARA	-53,6222496000	-23,3961143000	363,169	362,593	0,576	0,068	-
CIANO	-52,6055527000	-23,6551743000	542,474	542,983	-0,509	-0,932	-
SIQUE	-49,8335266000	-23,6882267000	622,631	624,410	-1,779	-2,311	-
ORTIG	-50,9249191000	-24,2097301000	785,153	783,959	1,194	0,869	-
CURIU	-50,4464912000	-24,0036411000	868,042	867,763	0,279	0,317	-
92700	-49,9863694000	-24,7249366000	1041,600	1037,521	4,079	3,657	-
UBIRT	-52,9985390000	-24,5570793000	487,051	485,507	1,544	1,227	-
CANDI	-51,3375359000	-24,5665512000	537,393	536,356	1,037	0,837	-
PALME	-48,9554939000	-24,5811634000	698,626	697,724	0,902	-0,545	-
IPORG	-48,5939865000	-24,5853844000	93,609	93,883	-0,274	-1,739	-
TOLED	-53,7218170000	-24,7199764000	564,349	560,884	3,465	3,279	-
PARNG	-48,5066147000	-25,5170727000	3,776	3,539	0,237	-0,942	-
IMBIT	-50,5993042000	-25,2265835000	879,518	875,275	4,243	3,452	-
MATEL	-53,9791031000	-25,2426414000	553,765	549,239	4,526	3,856	-
VIRMO	-52,2014008000	-25,3816185000	743,051	739,962	3,089	2,589	-
DOISV	-53,0950851000	-25,7693806000	536,894	533,748	3,146	2,612	-
LAPA	-49,7204514000	-25,7701130000	921,244	916,799	4,445	3,331	-
UNVIB	-51,0768394000	-26,2092762000	951,774	946,143	5,631	4,736	-
CLEVE	-52,3708839000	-26,4130936000	987,126	981,196	5,930	5,312	-
						MÉDIA	-
						DESVIO PADRÃO	-
						MÁXIMO	-
						MÍNIMO	-

Fonte: GENRO(2006)

Tabela 3.12 – Marcos rastreados com GPS no interior e nas cabeceiras do bloco de faixas

Marco	Coordenadas(m)				desvio-padrão(m)			
	x	y	Z _(geom)	Z _(ortom)	δ_x	δ_y	$\delta_{z(\text{geom})}$	$\delta_{z(\text{ortom})}$
10102W	671621,9523	7188274,8398	966,6559	962,093	0,0068	0,0067	0,0149	0,432257
10104	672482,8190	7186690,6903	919,0687	914,506	0,0094	0,0072	0,0265	0,432812
10106	673260,2440	7184682,0419	929,2142	924,651	0,0158	0,0229	0,0508	0,434977
108W	673825,8346	7183102,2857	917,3799	912,817	0,0109	0,0072	0,0198	0,432454
10110	672437,6598	7188312,3121	930,2207	925,658	0,0086	0,0189	0,0210	0,432510
10112W	672771,8762	7186711,4906	920,1069	915,544	0,0056	0,0058	0,0171	0,432338
10114W	673827,8451	7184677,6183	912,9181	908,355	0,0214	0,0225	0,0405	0,433894
10116W	674479,1615	7183091,0329	921,3821	916,819	0,0074	0,0080	0,0303	0,433061
10210	672961,4641	7188313,6996	920,5180	915,955	0,0060	0,0063	0,0175	0,432354
10212W	673399,0997	7186726,2531	939,0869	934,524	0,0128	0,0102	0,0239	0,432661
10214E	674575,7990	7184657,5556	897,9203	893,357	0,0089	0,0086	0,0260	0,432782
10214W	674292,0282	7184665,1483	902,0939	897,531	0,0116	0,0080	0,0290	0,432972
10216	675074,0185	7183086,6787	919,3262	914,763	0,0068	0,0084	0,0223	0,432575
10218E	673379,2041	7188322,5957	915,5165	910,954	0,0064	0,0071	0,0164	0,432311
10220W	673858,2912	7186731,4749	915,1908	910,628	0,0057	0,0071	0,0157	0,432285
10222	674936,2975	7184659,7650	895,4096	890,847	0,0127	0,0100	0,0331	0,433266
10224E	675637,7972	7183081,9027	889,8375	885,275	0,0128	0,0185	0,0409	0,433932
10101	670817,9880	7188263,4540	916,4160	911,853	0,0020	0,0019	0,0047	0,432026
10103	671414,5950	7186682,8110	936,3160	931,753	0,0109	0,0086	0,0446	0,434296
10105	672335,7770	7184642,0040	932,4660	927,903	0,0882	0,0236	0,0291	0,432979
10107	673053,0680	7183116,0870	908,8040	904,241	0,0101	0,0031	0,0083	0,432080
10309	674471,5672	7188325,9209	924,2446	919,682	0,0054	0,0067	0,0161	0,432300
10311	675195,2470	7186751,3550	915,5970	911,034	0,0034	0,0031	0,0104	0,432125
10313	676029,3810	7184571,7350	899,2390	894,676	0,0052	0,0075	0,0172	0,432342
10315	676764,0120	7183058,1100	924,9720	920,409	0,0045	0,0070	0,0178	0,432367
TESTE01	675408,6927	7183590,8636	895,1393	890,576	0,0057	0,0064	0,0158	0,432289
TESTE02	674583,3231	7185182,1046	898,6634	894,100	0,0121	0,0127	0,0366	0,433548
TESTE03	674193,5541	7184176,6439	904,4702	899,907	0,0077	0,0076	0,0231	0,432617
TESTE04	673540,9993	7184970,7979	922,3349	917,772	0,0112	0,0076	0,0280	0,432906
TESTE05	674073,9402	7183507,6828	922,9506	918,388	0,0100	0,0076	0,0254	0,432746
TESTE06	672222,4500	7187722,9696	950,7506	946,188	0,0062	0,0080	0,0240	0,432666
TESTE07	673066,7971	7187744,5152	936,9342	932,371	0,0091	0,0124	0,0474	0,434593
TESTE08	672651,3291	7186335,4673	911,7625	907,200	0,0070	0,0066	0,0173	0,432346
TESTE09	673542,1428	7186408,4736	910,3748	905,812	0,0071	0,0069	0,0169	0,432330
TESTE10	673575,7664	7187421,0449	930,0755	925,513	0,0078	0,0083	0,0188	0,432409

Um dos principais focos na pesquisa foi encontrar uma técnica que propiciasse a redução da imprecisão na estimativa do vetor vertical – componente que recai sobre a coordenada z. A estimativa da coordenada z decorrente da locação dos marcos coube especial atenção. Foi analisada a altitude ortométrica dos marcos em relação à posição do geóide sob a égide de três técnicas. O módulo

MAPGEO disponibilizado no site do IBGE foi um modelo geoidal idealizado por LOBIANCO (2005), o aplicativo *GEOIDEPR06-FFT* concebido pelo GOLDANI (2006) na realização do mestrado na UFPR, similar ao *MAPGEO* o modelo de ajustamento foi a transformada rápida de Fourier e, finalmente, o modelo *GEOIDEPR* adotado pelo GENRO (2006) idealizado como argumento da dissertação, o autor adotou o método dos mínimos quadrados como ajustamento. A tentativa de selecionar um dos três modelos para o geóide com o intuito de obter as altitudes ortométricas a partir das medições realizadas com o GPS não surtiu o efeito desejado, pois se verificou uma diferença expressiva entre as coordenadas verticais e as medidas atribuídas ao sensor laser. Logo, adotou-se a estação Lapa, RN ocupada por GENRO (2006), aquela que mais se aproximava da área do projeto. Uma breve rotina foi criada para estimar o valor da ondulação ótima praticada para a correção de todos os marcos ao contemplar a altura geoidal, veja no quadro 3.2, igual a $4,445\text{m} \pm 0,432$ estimou-se a ondulação final para o projeto igual 4,563 m. A figura 42 representa com um gráfico a variação dos valores das coordenadas altimétricas em função do modelo matemático para a ondulação geoidal praticado.

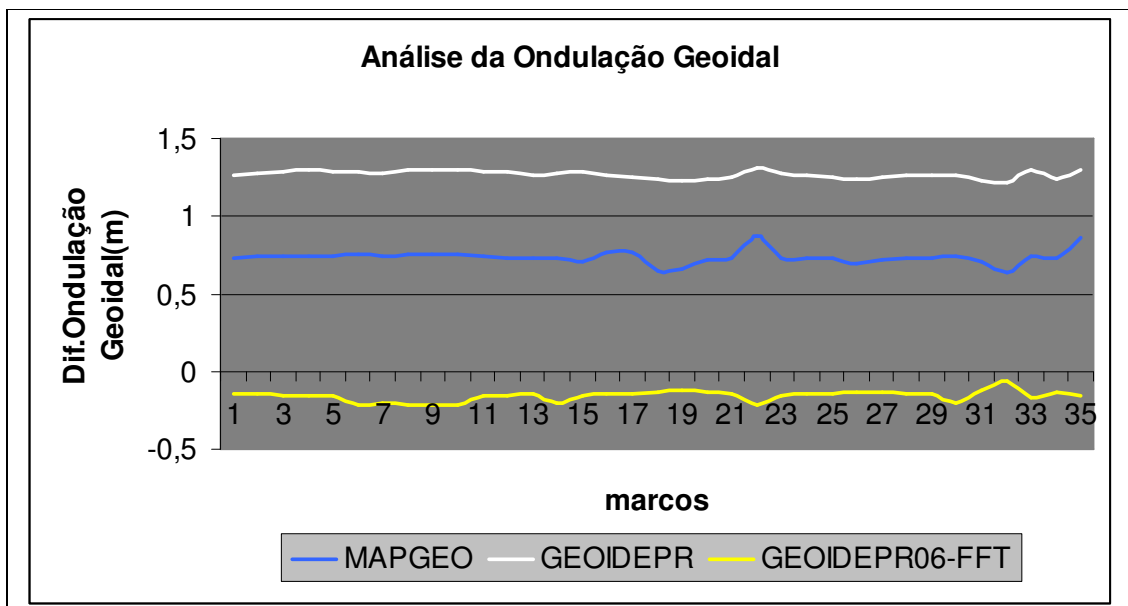


Fig. 42 – Variação da ondulação geoidal

O encadeamento de atividades dedicadas ao rastreamento de satélites e o processamento de coordenadas destinadas ao ajustamento de observações

decorrentes da varredura realizada pelo sensor laser é resumida por um fluxograma na figura 43.

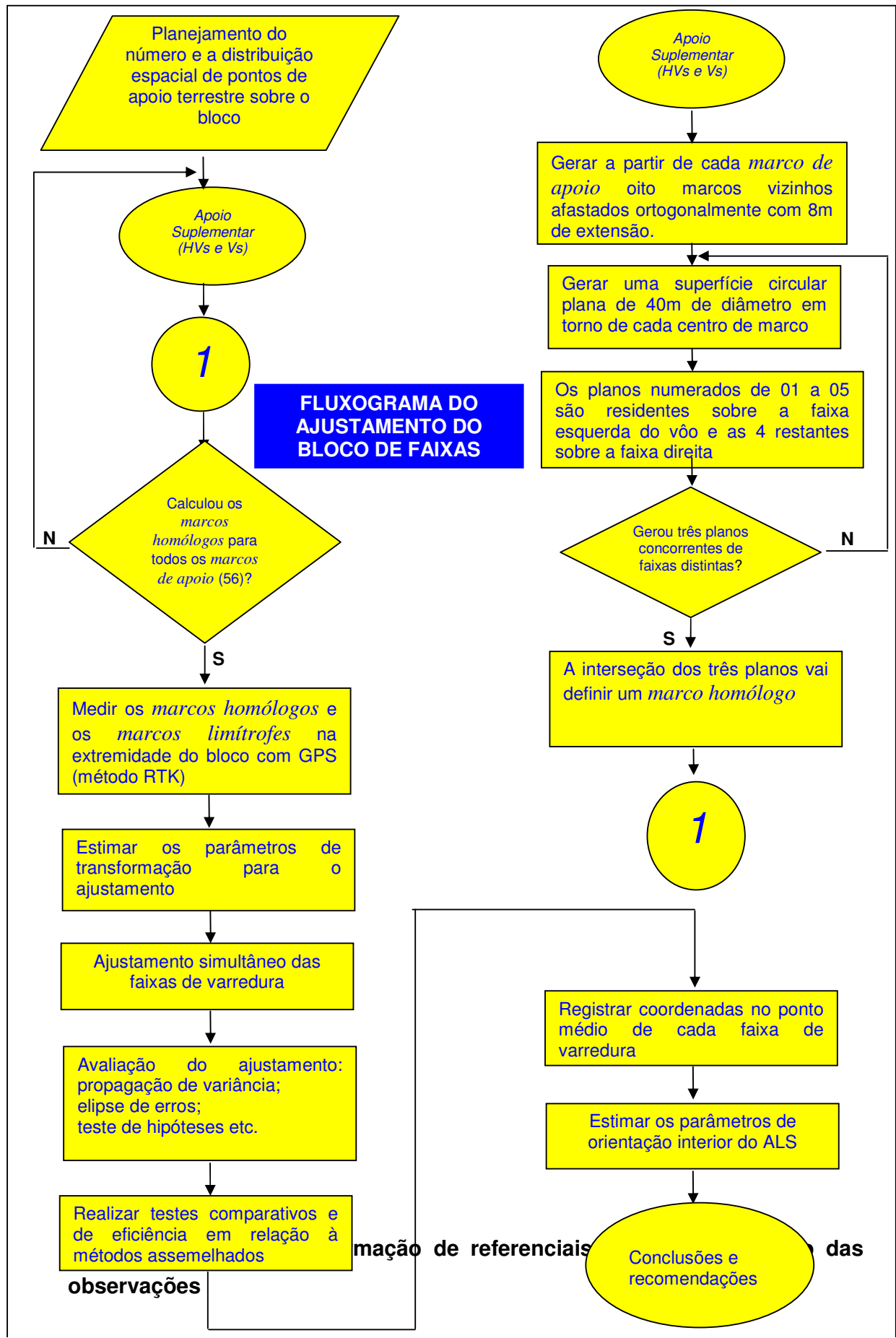


Fig.43 – Fluxograma do ajustamento do bloco de faixas de aerolevantamento

A transformação projetiva é usada na realização do registro de cenas digitais e, indiretamente, revela as limitações para atender as adequações e complexidades do relevo topográfico. Por outro lado, a atividade matemática com o uso do polinômio do terceiro grau ou de ordem superior não é eficiente nas localidades sem pontos de apoio terrestre, afirma MITISHITA (1988), pois além dos pontos de apoio de campo é necessário ao ajustamento usar imagens orbitais para as quais a altura devido ao relevo é pouco expressivo. Porém, o modelo isogonal é o mais adotado; FILIN & VOLSSEMAN (2004), LICHTI et al. (2000), BURMAN (2002), BEHAN et al. (2000) são autores que usaram o modelo isogonal no espaço para o ajustamento e, em alguns casos como LICHTI et al. (2000) para a calibração do sensor laser.

Logo, a adoção do modelo isogonal tem o propósito de ajustar as observações amostradas da superfície realizadas pelo sensor ALS e, em decorrência, reduzir a influência dos resíduos que afetam as medições.

3.2.3.7.1 Transformação isogonal ou conforme de Helmert

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \lambda M \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Xo \\ Yo \\ Zo \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

ou

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Xo \\ Yo \\ Zo \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

seja:

x', y', z' coordenadas de pontos no referencial terrestre local – espaço-objeto

a_1, \dots, a_n, Xo, Yo e Zo parâmetros (12) de transformação do sistema no referencial do ALS para o sistema no referencial geodésico local

X, Y, Z coordenadas para o referencial de pontos iluminados – espaço-scanner

λ Fator de escala, contemplado na matriz de rotação

A transformação isogonal executa um fator de escala, três rotações, três translações. É também conhecida como transformação conforme de Helmert ou de similaridade. É uma transformação adequada para avaliações de qualidade geométrica de dados vetoriais e matriciais. Os pontos homólogos de passagem – comuns entre o referencial dos pontos iluminados e o referencial terrestre medido com GPS - permitem estimar os parâmetros de transformação entre os referenciais e ponderar sobre o comportamento estatístico das observações. Além disso, cabem as técnicas de ajustamento pelo método paramétrico para resolver o sistema de equações, pois os valores observados ajustados podem ser expressos explicitamente como uma função dos parâmetros ajustados. LICHTI et al. (2000) praticaram um modelo assemelhado para avaliar o comportamento das coordenadas tridimensionais geradas por um emissor laser em plataforma terrestre.

3.2.3.8 Modelo matemático de ajustamento

Considerando-se como observações as medidas geradas pelo ALS pode-se matematicamente impor a seguinte condição:

$$La = F(Xa) \quad (3.20)$$

qual seja, as observações ajustadas podem ser expressas como uma função explícita dos parâmetros ajustados. Após a linearização de Taylor, resulta no seguinte modelo:

$$V = AX + L \quad (3.21)$$

Conhecido como modelo linearizado do método paramétrico, tem em conjunto as seguintes fórmulas para o cálculo dos parâmetros:

$$X = -(A^T PA)^{-1} A^T PL \quad (3.22)$$

$$Xa = Xo + X \quad (3.23)$$

$$L = Lo - Lb \quad (3.24)$$

$$L_o = F(X_o) \quad (3.25)$$

Se:

Ajustamento paramétrico com injunção de posição – $L_a = F(X_a)$

- A matriz das derivadas parciais em relação aos parâmetros
- X_o valores aproximados dos parâmetros
- L_b valores observados
- X_a valores ajustados dos parâmetros
- X correções aos parâmetros aproximados
- V vetor dos resíduos
- U Vetor dos parâmetros
- L_a valores observados e ajustados dos parâmetros
- L_o função dos valores aproximados dos parâmetros
- P matriz peso das observações instrumentais com precisões iguais e não correlacionadas
- N matriz dos coeficientes das equações normais

$$N = A^T P A \quad A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{x_o} \quad X_a = X + X_o$$

$$L = L_o - L_b \quad U = A^T P L \quad X = -(N)^{-1} U \quad L_a = L_b + V$$

Após o ajustamento que determina os valores mais prováveis dos parâmetros será necessário avaliar a precisão dos valores ajustados, poderá ser analisado pela interpretação da matriz de variância-covariância.

Ajustamento paramétrico com injunção de posição – $L_a = F(x_a)$

$\hat{\sigma}_0^2$ variância da observação de peso unitário a posteriori

n-u graus de liberdade (diferença entre número de observações e o correspondente de parâmetros).

ΣX_a Matriz variância-covariância dos parâmetros ajustados

$$\Sigma X_a = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A)^{-1} \quad \hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{n - u}$$

Como se trata de modelo matemático não linear em que os valores aproximados X_o e L_b são aproximações para os valores ajustados X_a e L_a , pratica-se a linearização pela fórmula de Taylor com o cuidado de desprezar os termos de

ordem igual e superior à segunda. O modelo aproximado necessita de iterações para se chegar aos valores mais prováveis das incógnitas.

As iterações, acompanhe na figura 44, conduzem para a convergência desejada, ou seja X tende para zero e o vetor dos resíduos tende a se estabilizar. O procedimento é explicado a seguir;

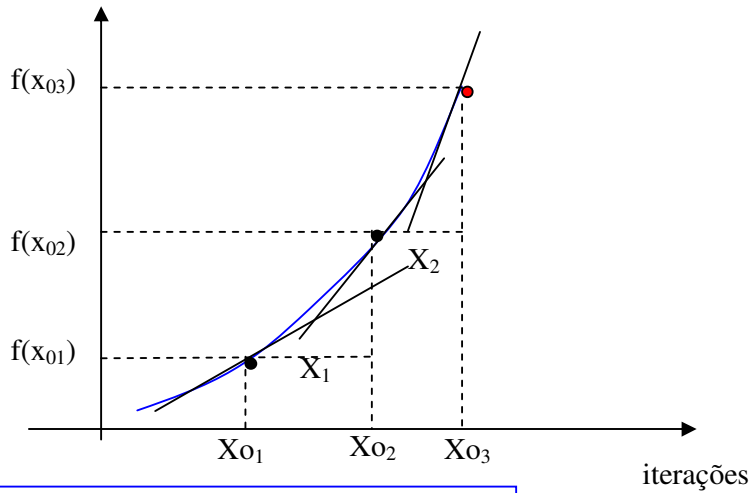


Fig.44- Exemplo: convergência na segunda iteração - $f(x_{03})=f(x_{02})+X_2= f(x_a)$

1ªEtapa

$$La = F(Xa);$$

$$AX + L = V;$$

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial Xa} \right|_{x_0}$$

$$L = Lo - Lb$$

$$L = F(Xo) - Lb$$

$$X = -(A^T PA)^{-1} A^T PL$$

$$Xa = Xo + X$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T PV}{n - u}$$

$$\Sigma Xa = \hat{\sigma}_0^2 (A^T PA)^{-1}$$

As iterações seguintes serão semelhantes à primeira iteração. É repetido seguidamente até se obter a convergência idealizada. São destaques duas observações;

- ✓ as componentes do vetor X diminuem aproximando-se de zero e
- ✓ a forma quadrática $V^T PV$ e ΣXa tende a se estabilizar

O método praticado criou um obstáculo. A singularidade da matriz dos coeficientes das equações normais(N) decorrente da deficiência de posto. Os elementos da matriz de coeficientes e do vetor independente de um sistema de equações lineares são na grande maioria das aplicações inexatas. Esta falta de exatidão pode ser originada porque os dados são resultantes de experimentos ou computados através de operações que carregam erros de arredondamento, ou mesmo do próprio armazenamento dos elementos em uma aritmética finita. A questão ocorre quando a perturbação introduzida em elementos do sistema podem alterar a resposta.

O algoritmo de eliminação de Gauss com pivoteamento pode ser considerado numericamente estável, o que pode-se assegurar que, para um sistema bem comportado, acompanhe ilustração na figura 45, produzirá pequenos resíduos, mesmo para pequenas perturbações nos elementos do sistema. Portanto, alterações na resposta do sistema está associada ao comportamento do sistema. Este comportamento é medido pelo número de condição (condicionamento) da matriz. SILVA (1997) atribui ao mal condicionamento do sistema, sobretudo, à diversidade de tecnologias envolvidas na obtenção de observações, a exemplo, poligonização eletrônica combinada com tecnologia GPS. Por outro lado, é possível realizar uma analogia com a tecnologia praticada com o ALS. Pois, o sensor combina a tecnologia GPS, a unidade de medição inercial e um emissor receptor de laser. É sabido que a matriz N é singular (com deficiência de posto) e mal-condicionada.

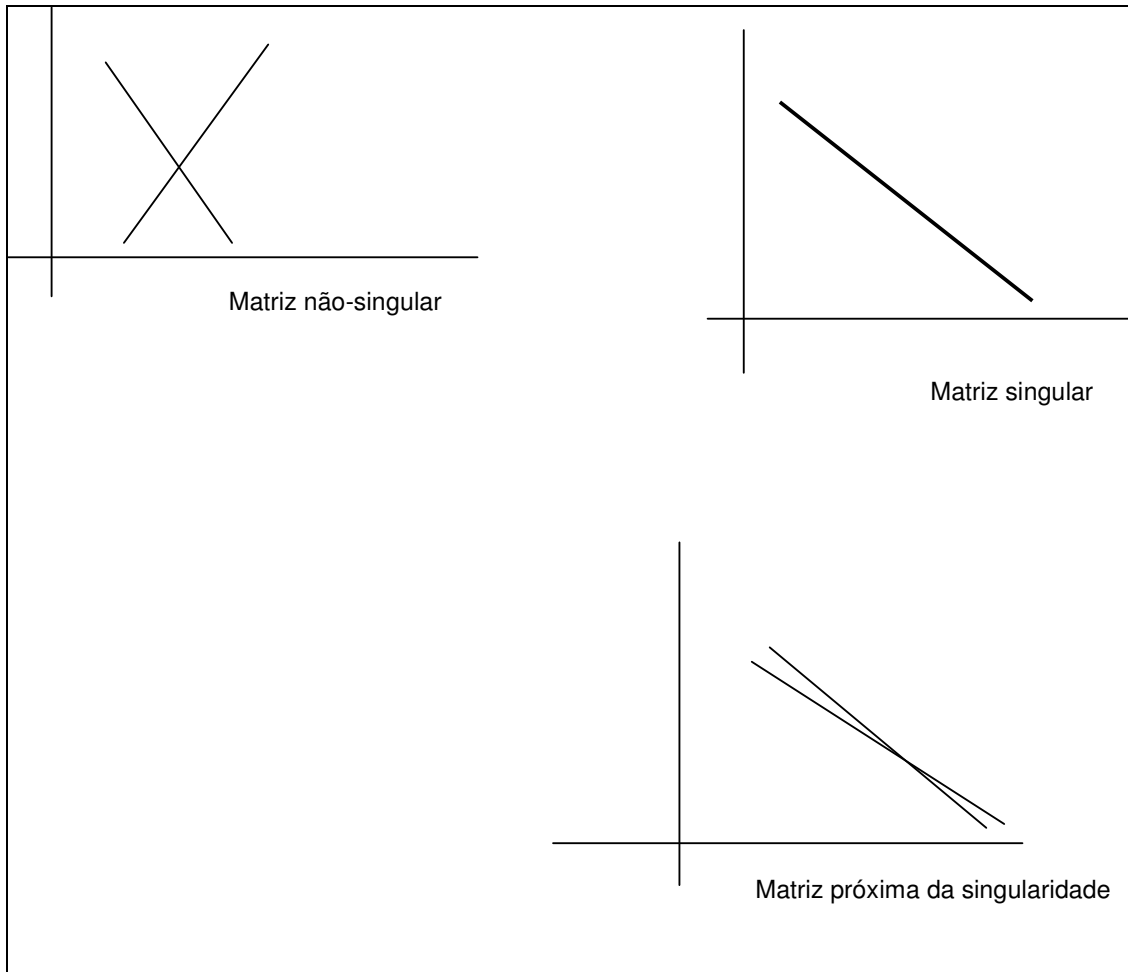


Fig. 45 – Gráficos do mal condicionamento de um sistema bidimensional

Para encontrar uma solução inversa viável para a matriz N é necessária otimização e regularização. Como o sistema é mal condicionado a regularização é necessária para a obtenção uma resposta aceitável e evitar a amplificação do ruído.

A proposta para corrigir a singularidade apontada nas observações submetidas ao modelo de Helmert é atendida de duas formas; a) o método da pseudo-inversa - a

matriz de Moore-Penrose e b) o método das injunções posicionais - matriz das equações de injunções.

A pseudo-inversa de uma matriz é tal que A é uma matriz com colunas linearmente independentes, invertível, a pseudo-inversa de A é a matriz A^+ dada por:

$$A^+ = (A^T A)^{-1} A^T \quad 3.26$$

Acompanha algumas propriedades, ou condições de Penrose para A ;

- a) $AA^+A = A$;
- b) $A^+AA^+ = A^+$;
- c) AA^+ e A^+A são simétricas

O *método Moore-Penrose* resolve a pseudo-inversa da matriz dos coeficientes das equações normais(N). Logo, a solução do sistema é obtida com a expressão 3.27;

$$X = N^+ * (A^T PL) \quad 3.27$$

N^+ – pseudo-inversa da matriz N ;

X - correções aos parâmetros aproximados.

Por outro lado, o *método das injunções posicionais* é uma alternativa ao ajustamento livre submetido à nuvem de pontos iluminados pelo ALS. O procedimento se assemelha ao praticado por MAROTA et al.(2007), SILVA e ROMÃO (2002) e SILVA (1996) difere ao se dedicar ao referencial no espaço, enquanto adotam uma superfície plana.

O número de parâmetros que definem um datum de uma rede de levantamento depende da dimensão desta rede (se uma, duas ou três dimensões). Para uma rede de três dimensões este número é 7 (três posições , uma escala e três orientações). Porém, é importante frisar um detalhe, com a adoção do modelo isogonal no espaço; os parâmetros estimados pelo método de ajustamento contemplam doze unidades. A aeronave no momento da emissão do pulso realiza

movimentos que, inexoravelmente, afetam o sensor e recebe o nome de atitude. A atitude é decorrente de movimentos combinados de asa e bico, asa e deriva ou demais combinações que somente os registros dos cossenos diretores, inseridos na matriz de rotação, podem matematicamente traduzir. Logo, salvo a transformação isogonal ou transformação de corpo rígido no plano, há limitações de calcular a influência que o movimento em relação a um dos eixos pode transferir para o sensor laser.

Para remover a singularidade da matriz, é necessário adicionar um conjunto de equações denominadas de *equações de injunção (inj)*. Esta abordagem tem como base um conjunto de equações de injunções mínimas que descrevem relações funcionais entre as correções das coordenadas aproximadas.

Para elaborar as equações de injunções internas será adotada metodologia similar praticada por SILVA (1997) e considerar o levantamento em estudo, de três dimensões e portanto uma rede espacial. As injunções internas de posição, orientação e escala são aplicadas em relação ao centróide da superfície definida pelos pontos medidos pelo ALS. Para definição desse centróide é necessário que os valores aproximados das coordenadas sejam conhecidos. Assim se X_c , Y_c e Z_c são as coordenadas do centróide e são calculadas por:

$$X_c = \frac{\sum X_i}{n} \quad Y_c = \frac{\sum Y_i}{n} \quad Z_c = \frac{\sum Z_i}{n} \quad 3.28$$

A injunção para translação é que a posição do centróide permaneça constante. Para isso a derivada de X_c , Y_c e Z_c são nulas, ou:

$$dX_c = 0 \quad dY_c = 0 \quad dZ_c = 0 \quad 3.29$$

e para que isso aconteça as derivadas dos numeradores da equação 3.30 serão iguais a zero.

$$\sum dX_i = 0 \quad \sum dY_i = 0 \quad \sum dZ_i = 0 \quad 3.30$$

Estas injunções formarão as três primeiras linhas das equações de injunções. A quarta linha é formada com a injunção de rotação que estabelece que o azimute do centróide para cada ponto do levantamento permaneça constante. Se o azimute a partir do centróide para um ponto for A_{Z_i} então tem-se:

$$tgA_{z_i} = \frac{X_i - X_c}{Y_i - Y_c} \quad tgA_{z_i} = \frac{X_i - X_c}{Z_i - Z_c} \quad tgA_{z_i} = \frac{Y_i - Y_c}{Z_i - Z_c} \quad 3.31$$

e derivando a 3.31;

$$dA_{x_i} = \frac{[(Y_i - Y_c)(dX_i - dX_c) - (X_i - X_c)(dY_i - dY_c)]}{r_c^2} \quad 3.32$$

$$dA_{y_i} = \frac{[(Z_i - Z_c)(dX_i - dX_c) - (X_i - X_c)(dZ_i - dZ_c)]}{r_c^2} \quad 3.33$$

$$dA_{z_i} = \frac{[(Z_i - Z_c)(dY_i - dY_c) - (Y_i - Y_c)(dZ_i - dZ_c)]}{r_c^2} \quad 3.34$$

Que para permanecer constante, a derivada dos azimutes do centróide para os demais pontos deve ser nula.

$$\Sigma[(Y_i - Y_c)(dX_i - dX_c) - (X_i - X_c)(dY_i - dY_c)] = 0 \quad 3.35$$

$$\Sigma[(Z_i - Z_c)(dX_i - dX_c) - (X_i - X_c)(dZ_i - dZ_c)] = 0 \quad 3.36$$

$$\Sigma[(Z_i - Z_c)(dY_i - dY_c) - (Y_i - Y_c)(dZ_i - dZ_c)] = 0 \quad 3.37$$

Que simplificando e usando as equações de 3.35 a 3.37 fica:

$$\Sigma(Y_i dX_i - X_i dY_i) = 0 \quad 3.38$$

$$\Sigma(Z_i dX_i - X_i dZ_i) = 0 \quad 3.39$$

$$\Sigma(Z_i dY_i - Y_i dZ_i) = 0 \quad 3.40$$

Que compreende o intervalo preenchido da quarta até a sexta equação de injunção, ou injunção de orientação. A sétima linha da matriz de injunções será para escala e é formada a partir da condição que a distância média do centróide para cada ponto do levantamento permaneça constante.

$$r_i^2 = (X_i - X_c)^2 + (Y_i - Y_c)^2 + (Z_i - Z_c)^2 \quad 3.41$$

A equação 3.41 representa a distância do centróide para um ponto do levantamento. Derivada essa equação fica:

$$dr_i = \frac{[(X_i - X_c)(dX_i - dX_c) + (Y_i - Y_c)(dY_i - dY_c) + (Z_i - Z_c)(dZ_i - dZ_c)]}{r_i} \quad 3.42$$

Para a distância média permanecer constante a $dr_i = 0$ e da equação 3.42 vem

$$\Sigma[(X_i - X_c)(dX_i - dX_c) + (Y_i - Y_c)(dY_i - dY_c) + (Z_i - Z_c)(dZ_i - dZ_c)] = 0 \quad 3.43$$

Que simplificando usando as equações 3.42 e 3.43, logo

$$\Sigma[X_i dX_i + Y_i dY_i + Z_i dZ_i] = 0 \quad 3.44$$

A matriz das equações de injunções fica então:

$$inj = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 1 \\ Y_1 & -X_1 & 0 & \dots & Y_n & -X_n & 0 \\ Z_1 & 0 & -X_1 & \dots & Z_n & 0 & -X_n \\ 0 & Z_1 & -Y_1 & \dots & 0 & Z_n & -Y_n \\ X_1 & Y_1 & Z_1 & \dots & X_n & Y_n & Z_n \end{vmatrix} \quad 3.45$$

CASPARY(1987) APUD SILVA(1997) aponta que a obtenção do vetor correspondente às correções aos parâmetros aproximados(X) pode ser obtido se somar a matriz dos coeficientes das equações normais(N) à matriz das equações

de injunções transformada (*inj_parc*). Por conseguinte, a singularidade da matriz N, segundo SILVA (1997), é contornada se acrescer a matriz combinada de injunção de posição, orientação e escala à matriz N original.

A matriz *inj* deve ser normalizada e, a normalização prescinde de duas fases; o sistema de coordenadas é derivado para fazer a origem coincidir com o centro de gravidade da nuvem de pontos medidos e, em seguida, normalizar a derivada da matriz. De outra forma vem;

$$inj_parc^T = (inj^T inj)^{-1/2} inj^T \quad 3.46$$

$$N_inj = [(N + inj_parc.inj_parc^T) - inj_parc.inj_parc^T] \quad 3.47$$

$$X = N_inj(A^T PL) \quad 3.48$$

É oportuno lembrar que a *matriz de injunção de paralelismo* praticada por HASEGAWA et al. (2003) foi adotado para a fototriangulação de um bloco de aerofotos. Sustentam que para o aerolevanteamento voltado para fins cadastrais a evidência de feições retas umas em relação às outras seja nas regiões urbanizadas; atribuída ao traçado da malha viária seja na zona rural; atribuída a direção do plantio, veja a figura 46.

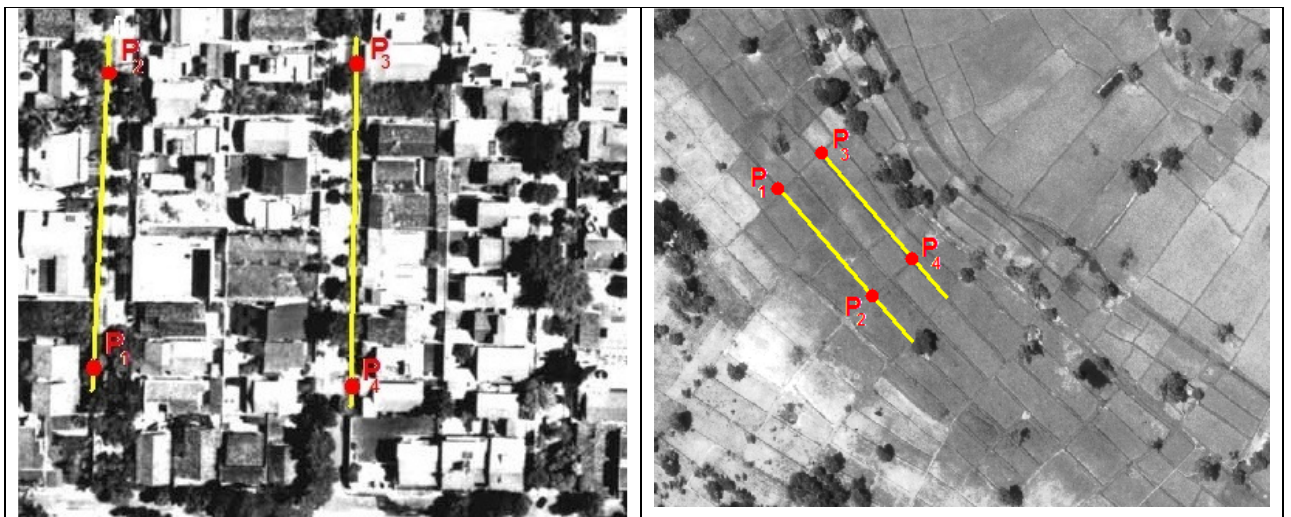


Figura 46 – Localização das observações realizadas na zona urbana e zona rural para subsidiar a matriz de injunção de paralelismo

O expediente matemático que atende a estimativa do coeficiente angular das retas (retas paralelas têm o mesmo coeficiente angular) é obtido pela expressão matemática;

$$(X_2 - X_1)(Y_4 - Y_3) - (Y_2 - Y_1)(X_4 - X_3) = 0 \quad 3.49$$

HASEGAWA et al. (2003) afirmam que a forma de representação do coeficiente angular das retas elimina o problema numérico que ocorre com retas horizontais ou quase horizontais e em retas verticais ou quase verticais, evitando portanto a divisão por zero ou valores próximos de zero. Assim a equação 3.50 poderá ser tratada como pseudo-observação no processamento do ajustamento simultâneo.

$$inj_paral = \begin{vmatrix} -(Y_4 - Y_3) & (Y_4 - Y_3) & (Y_2 - Y_1) & -(Y_2 - Y_1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -(X_4 - X_3) & (X_4 - X_3) & (X_2 - X_1) & -(X_2 - X_1) \end{vmatrix} \quad 3.5$$

A última etapa dedicada ao ajustamento das observações que formam as faixas de aerolevante obtidas da navegação com o ALS é alcançada logo após a substituição dos parâmetros calculados na formulação do modelo matemático praticado com o *isogonal de Helmert*.

3.3 PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DO ALS

O acervo de artigos científicos, livros e citações sobre as técnicas dedicadas à determinação dos parâmetros de calibração das câmaras aéreas, sejam digitais ou óptico-mecânicas, é amplo e amadurecido se comparado com os estudos direcionados aos sensores orbitais e, o tema se torna mais árido quando se refere à tecnologia LIDAR.

Naturalmente, embora seja necessário contextualizar historicamente as tecnologias, as limitações se devem, sobretudo, pelas restrições de acesso ao conjunto de informações de imagens e dados gerados pelos sensores LIDAR e o caráter secreto das rotinas de processamento, notabilizadas pelo termo *sistema-proprietário ou rotina-proprietário*, destaca BRANDALIZE (2004).

3.3.1 Estimativa dos parâmetros de orientação interior do als

Os parâmetros de orientação interior do ALS são, segundo LOHMANN et al. (2000), os principais componentes responsáveis pelo funcionamento interno do equipamento. As coordenadas atribuídas ao centro de emissão no momento que emite o pulso que respondem pelos parâmetros de translação e a atitude correspondente, responde pelos parâmetros de rotação

O ajustamento do bloco de faixas do aerolevante permitiu, entre outros, a evidência de pontos na direção **off-nadir** (inclinação do espelho é próxima de zero grau) do ALS. LOHMAN & KOCH (1999), MORIN (2002) e MARTINS et al. (2006) admitem que possibilita a determinação dos parâmetros de calibração internos do sensor. A varredura do ALS **off-nadir** cria uma condição favorável à estimativa dos parâmetros de calibração ao lume da equação geral de funcionamento do ALS pois, a distância entre o sensor e o objeto iluminado é coincidente com a diferença entre as coordenadas verticais.

Equação geral de funcionamento do ALS:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{ALS}^{Esp.Objeto} = \begin{pmatrix} xO \\ yO \\ zO \end{pmatrix}_{GPS} + \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & 0 \\ a_3 & a_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_5 & 0 & a_6 \\ 0 & 1 & 0 \\ a_7 & 0 & a_8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_9 & a_{10} \\ 0 & a_{11} & a_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ hm \end{pmatrix}_{ALS}^{Esp.Scanner} - \begin{pmatrix} x_{user-RP} \\ y_{user-RP} \\ z_{user-RP} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{RP-G} \\ y_{RP-G} \\ z_{RP-G} \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} 3.5 \\ 1 \end{matrix}$$

ou

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{ALS}^{Esp.Objeto} = \begin{pmatrix} xO \\ yO \\ zO \end{pmatrix}_{GPS} + \begin{pmatrix} a_1 a_5 x + (a_2 a_9 + a_1 a_6 a_{11}) y + a_2 a_{10} (hm) \\ a_3 a_5 x + (a_4 a_9 + a_3 a_6 a_{11}) y + a_3 a_6 a_{12} (hm) \\ a_7 x + a_8 a_{11} y + a_8 a_{12} (z' + hm) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_{user-RP} \\ y_{user-RP} \\ z_{user-RP} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{RP-G} \\ y_{RP-G} \\ z_{RP-G} \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} 3.5 \\ 2 \end{matrix}$$

onde:

- x, y, z coordenadas para o referencial terrestre – espaço-objeto
- a₁, a₂, a₃,...a_n parâmetros de transformação entre os referenciais do sistema ajustado e o sistema com as medidas brutas
- h_m altitude média de vôo

X_{user_RP} , Y_{user_RP} , Z_{user_RP}	distância compreendida entre o canhão de emissão laser e a unidade de medição inercial
X_{RP-GPS} , Y_{RP-GPS} , Z_{RP-GPS}	distância compreendida entre a unidade de medição inercial e o receptor GPS navegado
x_0 , y_0 , z_0	vetor com as coordenadas do centro de fase da antena GPS no sistema geodésico local

O modelo matemático de ajustamento adotado foi o paramétrico com injunções posicionais – a observação é função explícita dos parâmetros ajustados.

O registro das observações destinadas à estimativa dos parâmetros do ALS é extraído do ponto médio compreendido entre duas extremidades da borda de uma faixa. A plataforma do Microstation V8, com a instalação do módulo Terrascan (versão para teste) possibilita a visualização individual de cada faixa gerada pela nuvem de pontos sobre a superfície física medida pelo ALS. O método consiste em medir a dimensão da faixa de varredura em seis posições extremas distintas e a rotina dedicada a busca do ponto médio, obtido com o método vizinho mais próximo, é adotado. Atribui-se a este ponto a denominação de marco_apoio Terrascan. O capítulo quatro descreve os procedimentos para a estimativa dos parâmetros de ajustamento do bloco. Estes parâmetros serão usados para atribuir às coordenadas transformadas, senão, àquelas que trarão à superfície do terreno, o feixe emitido pelo sensor laser. A tabela 3.13 reproduz a relação dos pontos medidos nas extremidades das faixas de varredura.

Tabela 3.13 - Extremidades das bordas das faixas de varredura

Marcos_Apoio – Terrascan		
Faixa 01		
	x(m)	y(m)
alinhamento_01	671.375,583	7.186.483,302
	672.953,735	7.181.152,318
alinhamento_02	672.836,947	7.183.529,450
	674.461,292	7.184.167,194
Faixa 02		
alinhamento_03	671950,072	7.187.328,807

	673.454,341	7.188.151,925
	673057,518	7.184.782,852
alinhamento_04	674.681,367	7.185.434,831
Faixa 03		
	675.489,073	7.186.157,316
alinhamento_05	673.880,676	7.185.481,969
	674.863,258	7.183.202,286
alinhamento_06	676.463,970	7.183.970,417

RESUMO DO CAPÍTULO

Foi abordada uma proposta para o planejamento de um bloco de três faixas de varredura com o ALS. São descritos esforços de aproximar os procedimentos da aerotriangulação praticada para a aerofotogrametria com a tecnologia do aerolevanteamento com o ALS. São detalhados os materiais que representaram o subsídio fundamental para realização das atividades de pesquisa. Houve breve descrição sobre as etapas preliminares ao tratamento matemático submetido às observações decorrentes do perfilamento tais como a seleção de faixas e classificação das observações. O arranjo espacial de marcos ao longo da faixa como também a atribuição de códigos dos marcos configura como exemplos. Foi revelado, ainda, que a coleção de seis conjuntos de pontos constitui a arquitetura do bloco. Descreve um processo de agrupamento de observações decorrentes do LIDAR que, em um primeiro instante calcula os planos homólogos e, no momento seguinte, os planos homólogos concorrentes sempre que combinados em três e originados de faixas distintas permitem o cálculo do ponto homólogo. Segundo o autor da pesquisa, exerce a função análoga ao *tie point* na aerotriangulação de aerofotos. O método de transformação de coordenadas isogonal é proposto para adequar os referenciais do espaço – scanner e o espaço – objeto. São debatidos entre as alternativas para contornar a singularidade da matriz das equações normais (matriz N) decorrente do mal condicionamento do sistema as injunções de posição, escala, orientação e paralelismo praticados em recentes publicações científicas, bem como as propriedades da pseudo-inversa. Adotam-se as técnicas de ajustamento pelo método paramétrico para resolver o sistema de equações, pois o ajustamento de observações utilizando o método dos mínimos quadrados está difundido, sobretudo, pela realização de cálculos matriciais por meio computacional pois deixa de ser um processo lento e custo operacional elevado. E, por fim, o modelo de funcionamento do ALS segundo LOHMAN & KOCH (1999) é praticado para estimar os parâmetros de orientação interior do sensor.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Foi adotado o método paramétrico para a estimativa dos parâmetros do modelo matemático dedicado ao ajustamento das observações, mas a deficiência de posto da matriz dos coeficientes das equações normais (N) impediu a continuidade dos cálculos.

A alternativa para superar a singularidade da matriz N foi agregar as injunções de posição, orientação e escala praticadas por SILVA (1997). Além disso, houve a necessidade de incorporar a injunção de paralelismo assemelhada a matriz praticada por HASEGAWA et al. (2005). Tudo somado, embora as injunções exercessem uma influência para corrigir a deficiência de posto da matriz N , durante a rotina atribuída ao processo de iteração não foram suficientes para conduzir ao ponto de convergência na solução de sistemas de equações lineares e, conseqüentemente, a estimativa dos parâmetros de ajustamento.

Porém, uma das tentativas de ajustamento que obtiveram sucesso para vencer a singularidade da matriz N usou os marcos 10101; 10107; 10311; 10315 nas cabeceiras do bloco, portanto pontos de duplo apoio e os marcos 10102; 10218; 10108 e 10224 de apoio simples. É oportuno ressaltar o tema abordado no tópico 3.2.3.8 no capítulo três, trata do modelo matemático para o ajustamento. O modelo isogonal necessita de iterações para se chegar aos valores mais prováveis das incógnitas. Significa dizer que as iterações tornam possível a propriedade da identidade entre os valores aproximados dos parâmetros (X_0) e os valores ajustados dos parâmetros. A evolução do processo iterativo revelou divergência e incapacidade de estimar os parâmetros do modelo isogonal, se analisar o valor atribuído às correções aos parâmetros aproximados (X) desde a primeira ($1.57.10^{-7}$) até a tricentésima octogésima sexta ($2.98.10^{32}$) iteração.

Segundo MOYANO & SALGADO (2006), a divergência ocorre quando uma ou mais restrições de igualdade/desigualdade permanecem violadas e o valor de alguns multiplicadores de Lagrange tendem a infinito. Os multiplicadores de Lagrange são um artifício matemático para encontrar extremos de uma função. A divergência da nulidade esperada pelos índices aferidos na rotina de cálculo é um

claro sintoma da fragilidade das injunções ao atender ao cálculo de parâmetros decorrente do ajustamento.

Logo, um caminho para alcançar os parâmetros do modelo isogonal que não sejam pelas limitações enfrentadas pelos métodos clássicos de ajustamento é a adoção da pseudo-inversa, pois a pseudo-inversa tem a propriedade de vencer a singularidade da matriz das equações normais e estimar os parâmetros de um sistema de equações lineares incompatíveis.

4.1 MÉTODO MOORE-PENROSE

4.1.1 Estimativa de parâmetros

As três faixas de cobertura aérea foram submetidas a vinte e cinco pontos de apoio distribuídos espacialmente de acordo com planejamento voltado para o ajustamento do bloco e dez pontos postos ao acaso com o propósito de avaliar a qualidade do processo de ajustamento, acompanhe no quadro 4.1 e quadro 4.2. Embora as locações e levantamentos tenham sido inferiores ao número de medições previstas no planejamento, não comprometeu a quantidade de observações de campo que prejudicassem o processo de ajustamento. O operador de campo com o receptor GPS enfrentou dificuldades de ocupação que foram previstos na análise de riscos para as atividades de campo, as figuras 47 e 48 mostram a diferença espacial dos pontos sobre a área do projeto. Salvo os marcos testes, os demais da figura 48 foram identificados com os três últimos algarismos.

Quadro 4.1 - Síntese das medições realizadas com receptor GPS na zona do projeto – marcos residentes nas bordas das faixas e marcos homólogos

Calculadas(m)				Campo(m)			
Ponto	x	y	z(ortom)	Ponto	x	y	z(ortom)
tie_point_10104	672482,806	7186690,739	914,182	tie_point_10104	672482,819	7186690,690	914,506
tie_point_10106	673260,309	7184682,072	924,428	tie_point_10106	673260,244	7184682,042	924,651
tie_point_10110	672434,840	7188287,400	927,989	tie_point_10110	672437,660	7188312,312	925,658
tie_point_10210	672961,476	7188313,676	915,231	tie_point_10210	672961,464	7188313,700	915,955
tie_point_10214E	674575,910	7184657,000	896,422	tie_point_10214E	674575,799	7184657,556	893,357
tie_point_10216	675074,080	7183086,700	915,858	tie_point_10216	675074,019	7183086,679	914,763
tie_point_10218E	673379,220	7188322,500	911,134	tie_point_10218E	673379,204	7188322,596	910,954
tie_point_10222	674936,310	7184659,800	890,843	tie_point_10222	674936,298	7184659,765	890,847
tie_point_10224E	675637,810	7183081,900	885,583	tie_point_10224E	675637,797	7183081,903	885,275
tie_point_10101	670818,009	7188263,138	911,293	tie_point_10101	670817,988	7188263,454	911,853
tie_point_10103	671414,595	7186682,811	931,744	tie_point_10103	671414,595	7186682,811	931,753
tie_point_10105	672335,777	7184642,004	927,865	tie_point_10105	672335,777	7184642,004	927,903
tie_point_10107	673053,051	7183116,075	904,146	tie_point_10107	673053,068	7183116,087	904,241
tie_point_10309	674471,575	7188325,932	919,703	tie_point_10309	674471,567	7188325,921	919,682
tie_point_10311	675195,227	7186751,335	911,056	tie_point_10311	675195,247	7186751,355	911,034
tie_point_10313	676029,381	7184571,735	894,676	tie_point_10313	676029,381	7184571,735	894,676
tie_point_10315	676764,012	7183058,109	920,410	tie_point_10315	676764,012	7183058,110	920,409

z(ortom) – altitude ortométrica

Quadro 4.2 - Síntese das medições realizadas com receptor GPS na zona do projeto – marcos testes e marcos homólogos

Calculadas(m)				Campo(m)			
Ponto	x	y	z(ortom)	Ponto	x	y	z(ortom)
tie_point_10102W	671622,040	7188274,700	961,752	tie_point_10102W	671621,952	7188274,840	962,093
tie_point_10108W	673825,830	7183102,300	912,465	tie_point_10108W	673825,835	7183102,286	912,817
tie_point_10112W	672771,842	7186711,465	916,104	tie_point_10112W	672771,876	7186711,491	915,544
tie_point_10114W	673827,905	7184677,676	911,582	tie_point_10114W	673827,845	7184677,618	908,355
tie_point_10116W	674479,247	7183091,044	916,682	tie_point_10116W	674479,162	7183091,033	916,819
tie_point_10212W	673399,050	7186726,300	934,867	tie_point_10212W	673399,100	7186726,253	934,524
tie_point_10214W	674292,062	7184665,126	897,124	tie_point_10214W	674292,028	7184665,148	897,531
tie_point_10220W	673847,765	7186731,487	911,176	tie_point_10220W	673858,291	7186731,475	910,628
TESTE01	675408,693	7183590,864	895,139	TESTE01	675408,608	7183590,727	894,974
TESTE02	674583,323	7185182,105	898,663	TESTE02	674583,331	7185182,108	898,667
TESTE03	674193,554	7184176,644	904,470	TESTE03	674193,581	7184176,652	904,474
TESTE04	673540,999	7184970,798	922,335	TESTE04	673540,991	7184970,814	922,340
TESTE05	674073,940	7183507,683	918,388	TESTE05	674073,938	7183507,682	918,364
TESTE06	672222,450	7187722,970	950,751	TESTE06	672222,439	7187722,921	950,769
TESTE07	673066,797	7187744,515	932,371	TESTE07	673066,825	7187744,549	931,980
TESTE08	672651,329	7186335,467	911,763	TESTE08	672651,327	7186335,489	911,768
TESTE09	673542,143	7186408,474	910,375	TESTE09	673542,096	7186408,452	910,371
TESTE10	673575,766	7187421,045	930,076	TESTE10	673575,772	7187421,045	930,071

z(ortom) – altitude ortométrica

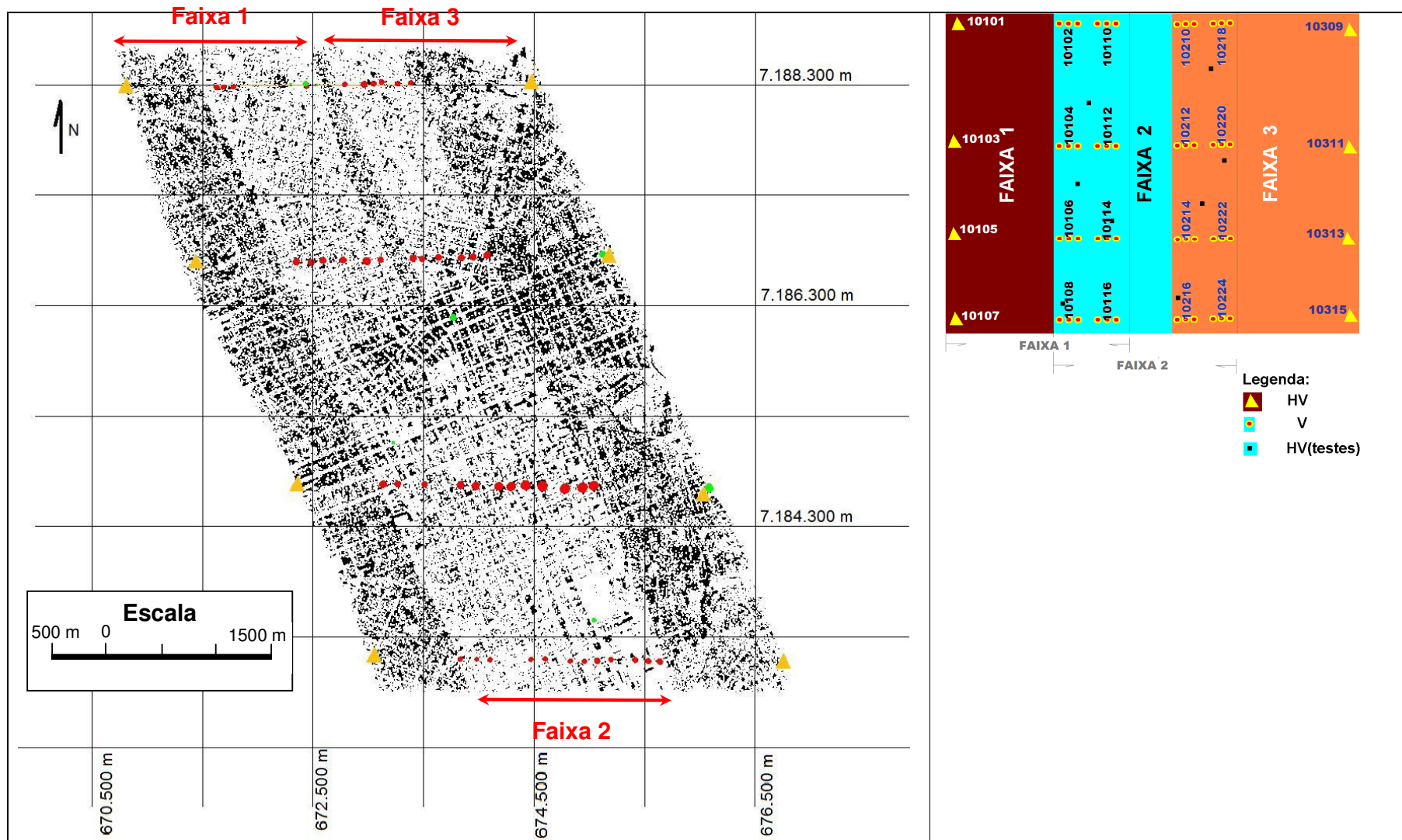


Fig.47 – Imagem do perfilamento com a distribuição espacial do apoio previsto no planejamento

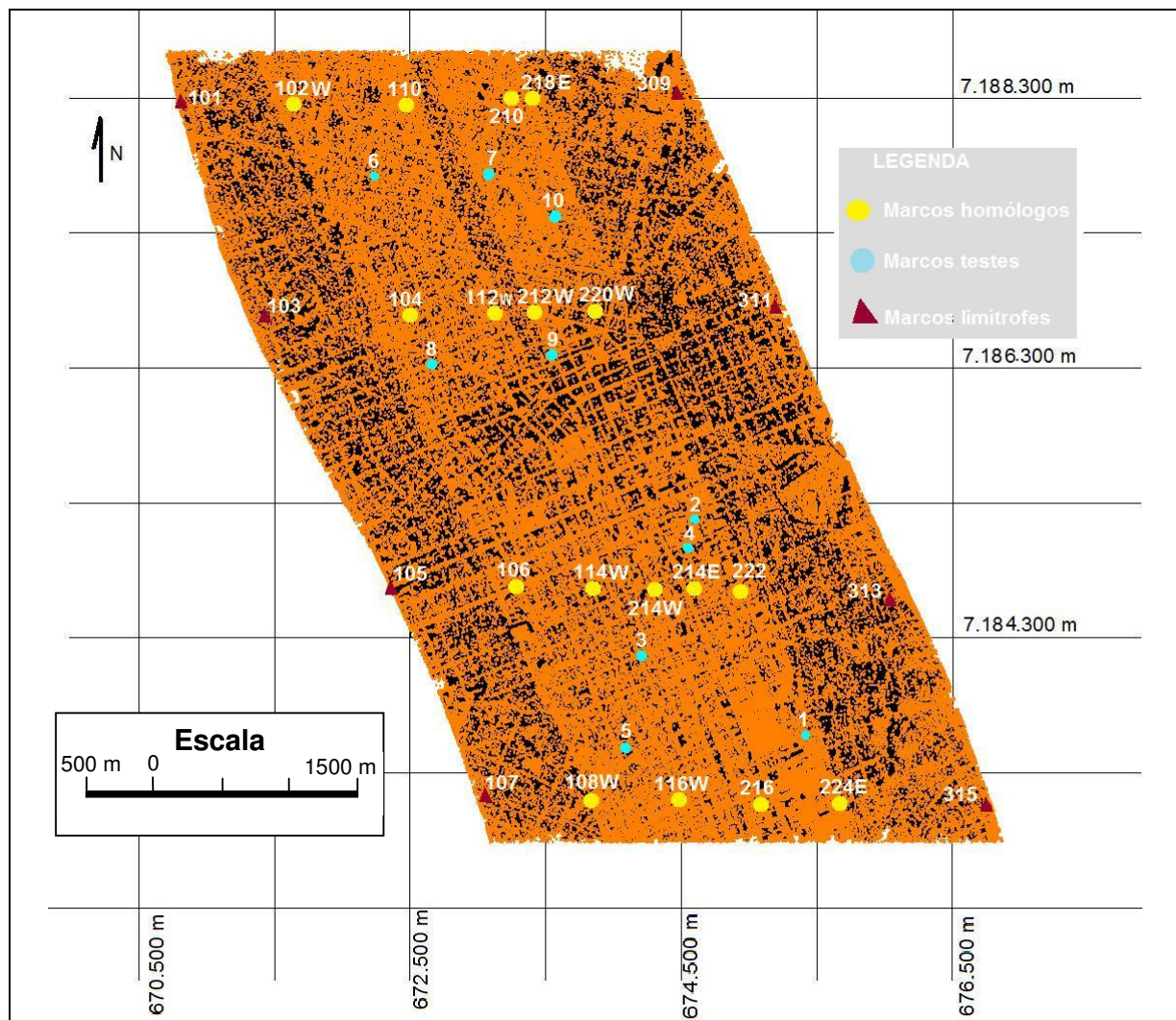


Fig.48 – Imagem do perfilamento com a distribuição dos pontos de apoio medidos com GPS

A primeira etapa destinada ao processo de ajustamento das observações da superfície amostrada decorrente do perfilamento com o ALS é a estimativa dos parâmetros de transformação do modelo isogonal. Significa avaliar a *aderência* dos marcos transformados pelo modelo matemático aos marcos correspondentes medidos sobre a superfície física com o receptor GPS.

O procedimento prescinde de uma combinação de marcos de apoio simples e duplo que, a um só tempo, atenda a rigidez geométrica do bloco e atenda aos critérios de análise estatística. A busca de um arranjo espacial de marcos que propiciasse o melhor aproveitamento possível avaliou seis abordagens distintas.

4.1.1.1 Arranjo espacial com 36 observações

O método adotado para depurar os resíduos que acompanham o processo de determinação dos parâmetros praticados para o ajustamento inicia com o arranjo 01, veja na figura 49. São fornecidas de oito marcos limitrofes, de duplo apoio, vinte e quatro observações e de doze marcos homólogos, de apoio simples. doze observações.

ARRANJO 01

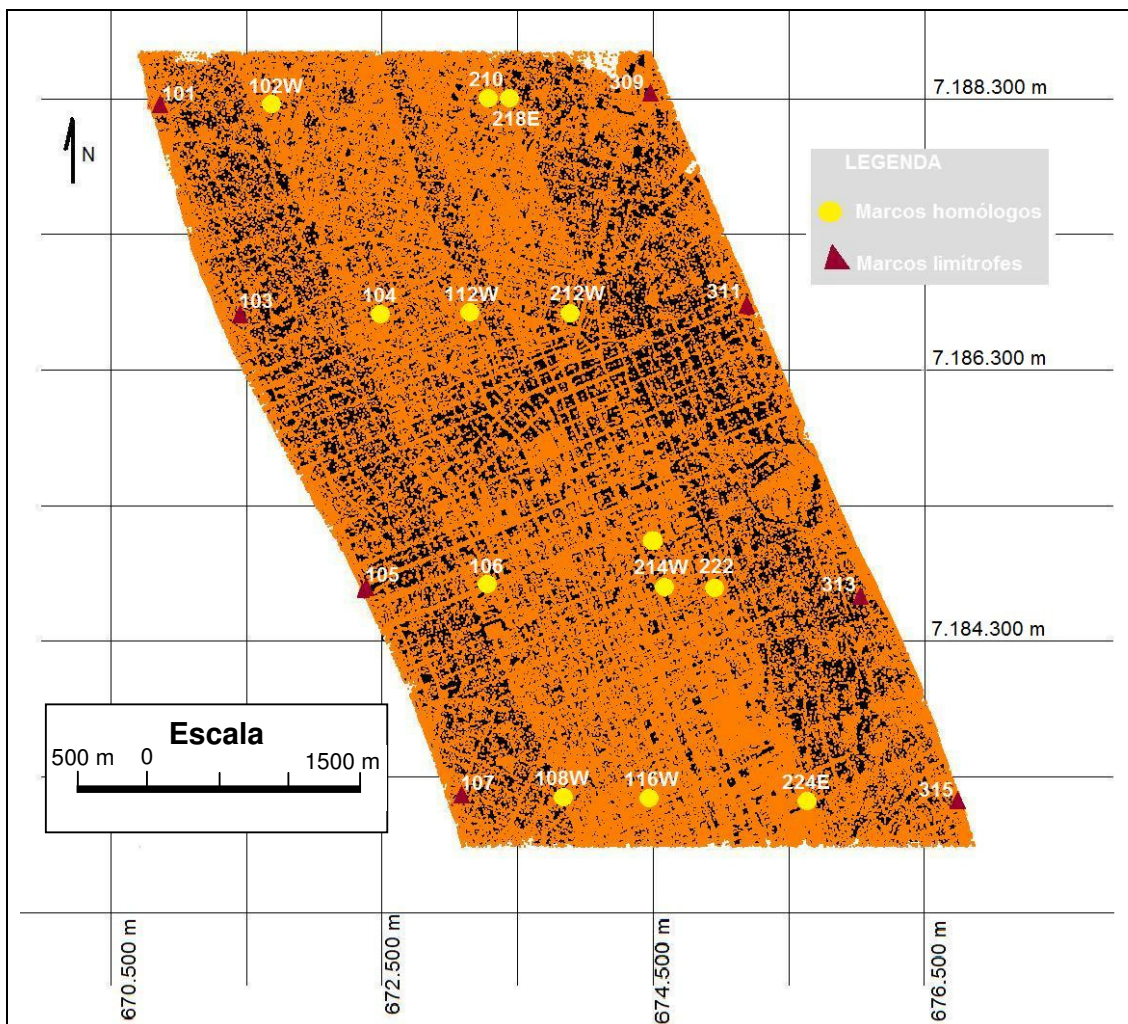


Figura 49 - Arranjo 01: ajustamento com 36 observações

O quadro 4.3 registra os valores atribuídos às coordenadas decorrentes do rastreamento com receptor GPS, são as coordenadas de campo e, em seguida são igualmente publicadas as coordenadas decorrentes dos processamentos dos

marcos limítrofe (todos os marcos com numeração ímpar) e o marcos homólogos. É importante notar que as coordenadas geográficas (x e y) dos marcos homólogos são idênticas àquelas coordenadas de campo, diferindo apenas na componente vertical. Trata-se de um artifício para o processamento dedicado ao ajustamento de modo a assegurar que os marcos homólogos contribuam no processo de ajustamento apenas com a coordenada z e aos marcos limítrofes as componentes posicional e vertical.

Quadro 4.3 – Quadro das coordenadas adotadas para o ajustamento de 36 observações.

No.	Marco	Coordenadas de campo(m)			Coordenadas de calculadas(m)		
		x	y	z	x	y	z
1	10102W	671622,040	7188274,700	962,093	671622,040	7188274,700	961,752
2	10104	672482,806	7186690,739	914,506	672482,806	7186690,739	914,182
3	10106	673260,309	7184682,072	924,651	673260,309	7184682,072	924,428
4	10108W	673825,830	7183102,300	912,817	673825,830	7183102,300	912,465
5	10112W	672771,842	7186711,465	915,544	672771,842	7186711,465	916,104
6	10116W	674479,247	7183091,044	916,819	674479,247	7183091,044	916,682
7	10210	672961,476	7188313,676	915,955	672961,476	7188313,676	915,231
8	10212W	673399,050	7186726,300	934,524	673399,050	7186726,300	934,867
9	10214W	674292,062	7184665,126	897,531	674292,062	7184665,126	897,124
10	10218E	673379,220	7188322,500	910,954	673379,220	7188322,500	911,134
11	10222	674936,310	7184659,800	890,847	674936,310	7184659,800	890,843
12	10224E	675637,810	7183081,900	885,275	675637,810	7183081,900	885,583
13	10101	670817,988	7188263,454	911,853	670818,009	7188263,138	911,293
14	10103	671414,595	7186682,811	931,753	671414,595	7186682,811	931,744
15	10105	672335,777	7184642,004	927,903	672335,777	7184642,004	927,865
16	10107	673053,068	7183116,087	904,241	673053,051	7183116,075	904,146
17	10309	674471,567	7188325,921	919,682	674471,575	7188325,932	919,703
18	10311	675195,247	7186751,355	911,034	675195,227	7186751,335	911,056
19	10313	676029,381	7184571,735	894,676	676029,381	7184571,735	894,676
20	10315	676764,012	7183058,110	920,409	676764,012	7183058,109	920,410

Após quatorze iterações foram obtidos os resultados revelados no quadro 4.4. As duas colunas sintetizam o comportamento da variância de doze parâmetros e a precisão correspondente.

Quadro 4.4 - Parâmetros do ajustamento – 36 observações.

Arranjo 01			
Parâmetros	Indicadores da precisão do ajustamento		
	Xa	Traço MVCXA	Desvio-padrão(σ)
a ₁₁	1,000E+000	8,132E-13	9,017E-07
a ₁₂	-1,831E-007	8,330E-15	9,126E-08
a ₁₃	6,239E-005	8,081E-09	8,989E-05
a ₂₁	-2,695E-005	3,072E-13	5,542E-07
a ₂₂	1,000E+000	3,147E-15	5,609E-08
a ₂₃	-1,755E-003	3,053E-09	5,525E-05
a ₃₁	-1,591E-004	1,848E-12	1,359E-06
a ₃₂	-1,194E-004	1,893E-14	1,375E-07
a ₃₃	9,998E-001	1,836E-08	1,355E-04
x ₀	1,517E-003	2,913E-20	1,706E-10
y ₀	-1,752E+000	1,100E-20	1,049E-10
z ₀	9,656E+002	6,621E-20	2,573E-10
Traço MVCXA(m) - traço da matriz de variância-covariância			
Xa (m) - valores ajustados dos parâmetros			

A figura 51 expressa graficamente o comportamento dos resíduos decorrente das trinta e seis observações, os marcos 10112W e 10210 contribuirão com um desvio de -83,81 e 66,72 cm, respectivamente. A subtração das duas selas verificadas no gráfico correspondente aos marcos 10112W e 10210 é um recurso para reduzir a influência dos maiores resíduos no restante do ajustamento. É importante assinalar que a abcissa do gráfico *Resíduos do ajustamento – horizontal e vertical* da figura 50, registra sequencialmente cada marco relacionado no quadro 4.3 ao considerar a quantidade de observações que cada marco insere no cálculo de ajustamento. Enquanto a abcissa de *Resíduos do ajustamento – vertical* mesma figura, registra apenas a característica do resíduo vertical de cada um dos vinte marcos.

Para tornar mais claro um exemplo. Desde o primeiro até o décimo segundo marco da relação, cada marco corresponde a uma posição no gráfico *Resíduos do ajustamento – horizontal e vertical*, pois são marcos homólogos. A partir do décimo terceiro cada elemento corresponde a três posições no gráfico. Logo, o

marco limítrofe 10101 que ocupa esta posição é representado por três posições no gráfico. A que ocupa, a décima quarta e a décima quinta.

Ao observar o gráfico é possível responder a indagação sobre o motivo que justifica a amplitude dos resíduos nos marcos homólogos ser mais acentuada do que a verificada nos marcos limítrofes. Isto se deve ao fato dos marcos limítrofes participarem no processo de ajustamento com as coordenadas x, y e z. Torna a flutuação mais rígida enquanto que a componente nos marcos homólogos é relaxada. É oportuno lembrar a cena da figura 22 no início do terceiro capítulo.

O erro médio quadrático é uma referência em relação a aderência - no âmbito horizontal e vertical foi apurado o valor de 26,19 cm enquanto que no âmbito apenas vertical verificou-se 35,12 cm. A diferença entre os erros médios quadráticos é explicada, sobretudo, pela maior dificuldade de modelar a complexidade de variações existentes sobre a superfície física se comparado especificamente pela análise do modelado destinado à localização geográfica.

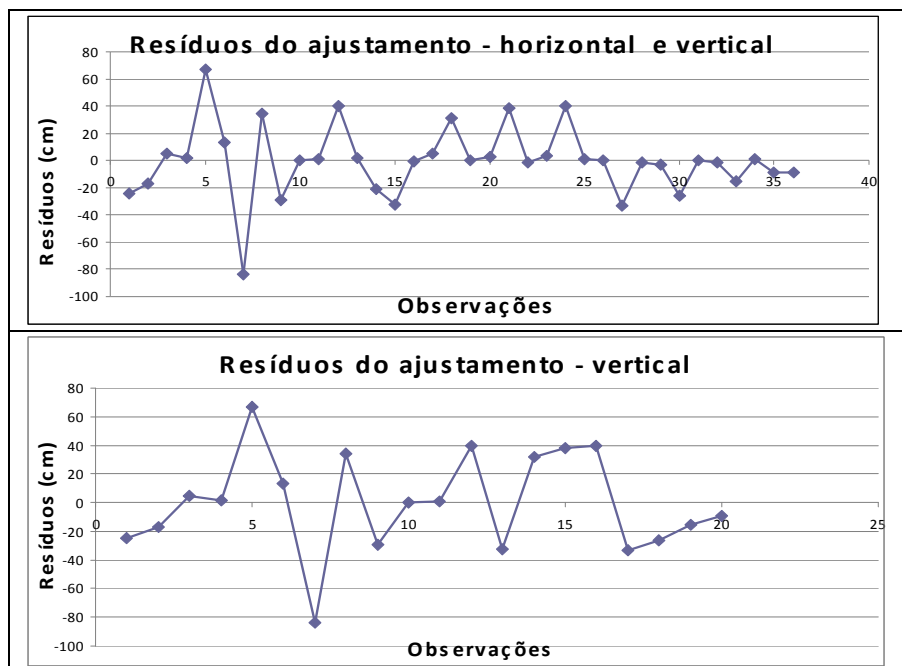


Fig. 50 – Gráfico dos resíduos do arranjo 01

4.1.1.2 Arranjo espacial com 34 observações

O método adotado para depurar os resíduos que acompanham o processo de determinação dos parâmetros praticados para o ajustamento segue com o arranjo 02, veja na figura 51. São fornecidas de oito marcos limitrofes, de duplo apoio, vinte e quatro observações e de dez marcos homólogos, de apoio simples, dez observações, no montante são totalizados 34 observações.

ARRANJO 02

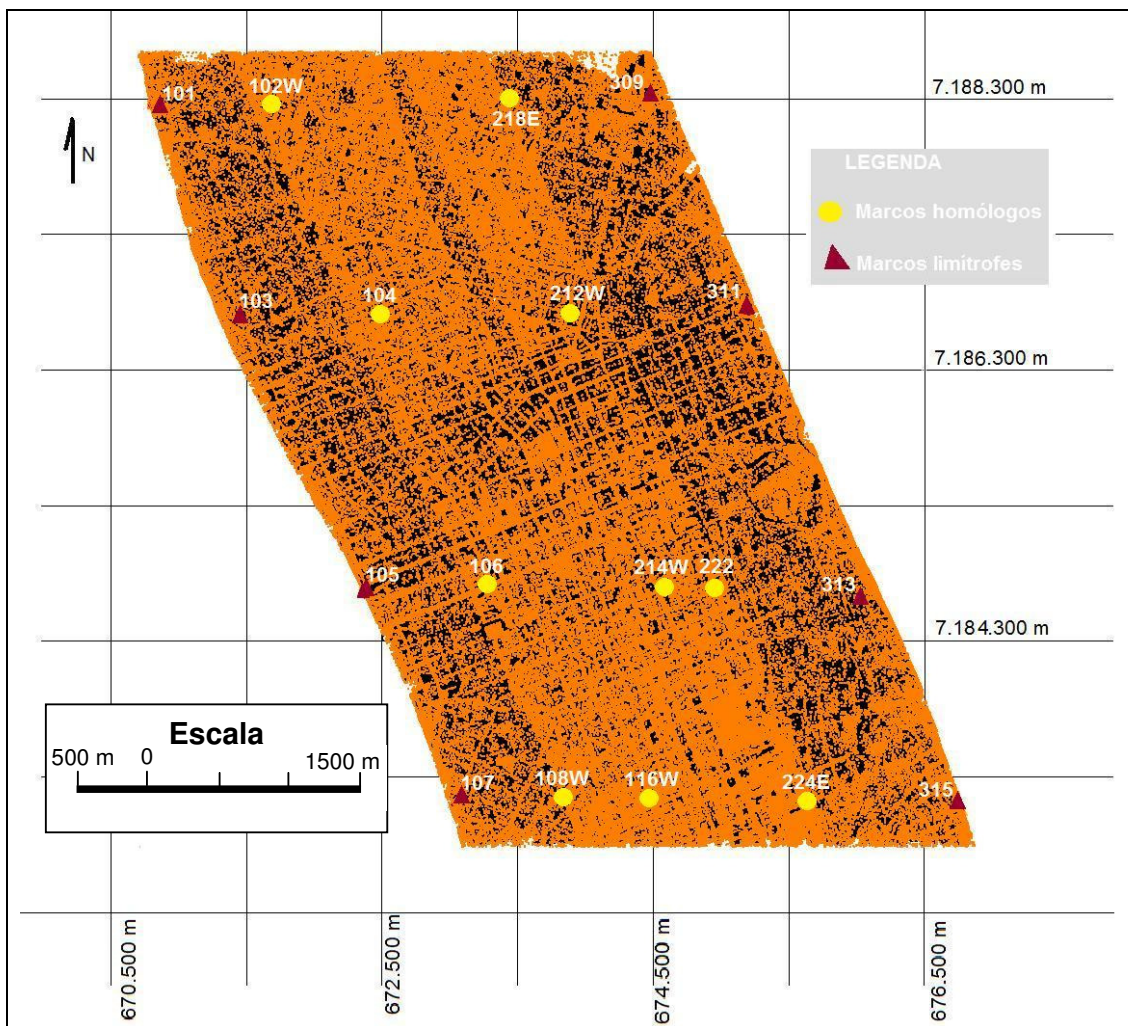


Figura 51 - Arranjo 02: ajustamento com 34 observações

A decisão de subtrair os marcos homólogos 10112W e 10210 do processo de ajustamento aparenta ser acertada, pois ao avaliar a redução da amplitude da flutuação de incertezas expressa pela figura 52 revela com clareza os resultados

obtidos. Houve declínio do intervalo entre 66,72 cm e -83,81 cm, observado no arranjo 01 para 38,68 e -35,44 no arranjo 02.

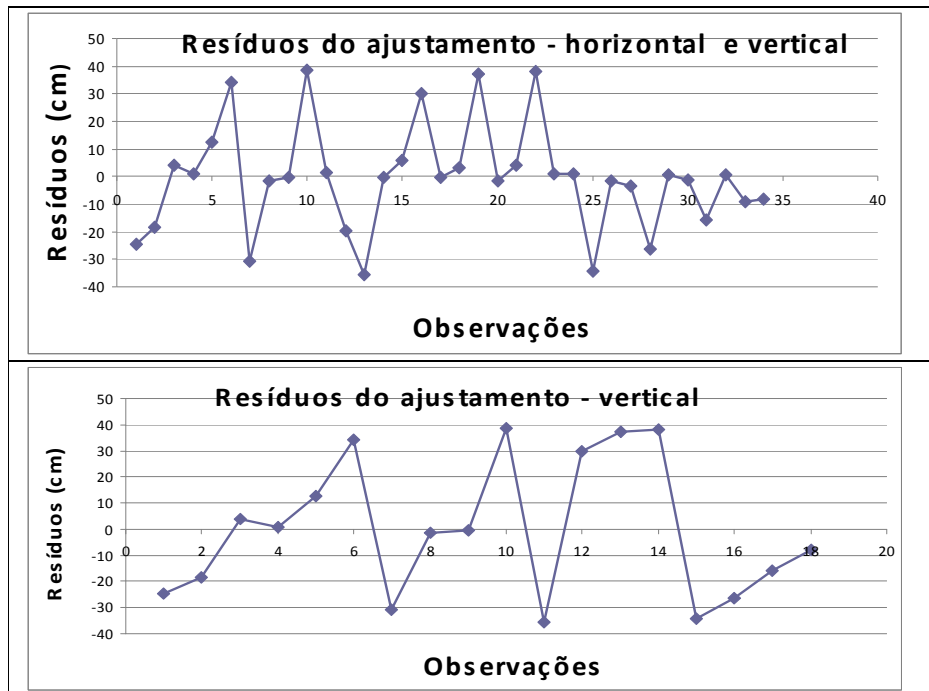


Fig. 52 – Gráfico dos resíduos do arranjo 02

O erro médio quadrático refletiu a redução. No âmbito horizontal e vertical foi apurado o valor de 19,44 cm enquanto que no âmbito apenas vertical verificou-se 26,50 cm.

Quadro 4.5 – Quadro das coordenadas adotadas para o ajustamento de 34 observações.

No.	Marco	Coordenadas de campo(m)			Coordenadas de calculadas(m)		
		x	y	z	x	y	z
1	10102W	671622,040	7188274,700	962,093	671622,040	7188274,700	961,752
2	10104	672482,806	7186690,739	914,506	672482,806	7186690,739	914,182
3	10106	673260,309	7184682,072	924,651	673260,309	7184682,072	924,428
4	10108W	673825,830	7183102,300	912,817	673825,830	7183102,300	912,465
5	10116W	674479,247	7183091,044	916,819	674479,247	7183091,044	916,682
6	10212W	673399,050	7186726,300	934,524	673399,050	7186726,300	934,867
7	10214W	674292,062	7184665,126	897,531	674292,062	7184665,126	897,124
8	10218E	673379,220	7188322,500	910,954	673379,220	7188322,500	911,134
9	10222	674936,310	7184659,800	890,847	674936,310	7184659,800	890,843
10	10224E	675637,810	7183081,900	885,275	675637,810	7183081,900	885,583
11	10101	670817,988	7188263,454	911,853	670818,009	7188263,138	911,293
12	10103	671414,595	7186682,811	931,753	671414,595	7186682,811	931,744
13	10105	672335,777	7184642,004	927,903	672335,777	7184642,004	927,865
14	10107	673053,068	7183116,087	904,241	673053,051	7183116,075	904,146
15	10309	674471,567	7188325,921	919,682	674471,575	7188325,932	919,703
16	10311	675195,247	7186751,355	911,034	675195,227	7186751,335	911,056
17	10313	676029,381	7184571,735	894,676	676029,381	7184571,735	894,676
18	10315	676764,012	7183058,110	920,409	676764,012	7183058,109	920,410

Após quatorze iterações foram obtidos os resultados revelados no quadro 4.6. As duas colunas sintetizam o comportamento da variância de doze parâmetros e a precisão correspondente.

Quadro 4.6 - Parâmetros do ajustamento – 34 observações.

Arranjo 02			
Parâmetros	Indicadores da precisão do ajustamento		
	Xa	Traço MVCXA	Desvio-padrão(σ)
a ₁₁	1,000E+000	4,874E-013	6,981E-007
a ₁₂	-1,911E-007	4,989E-015	7,063E-008
a ₁₃	6,646E-005	4,661E-009	6,827E-005
a ₂₁	-2,941E-005	1,841E-013	4,291E-007
a ₂₂	1,000E+000	1,885E-015	4,341E-008
a ₂₃	-1,882E-003	1,760E-009	4,196E-005
a ₃₁	-1,538E-004	1,107E-012	1,052E-006
a ₃₂	-1,199E-004	1,134E-014	1,064E-007
a ₃₃	1,000E+000	1,059E-008	1,029E-004
x ₀	1,597E-003	2,705E-020	1,644E-010
y ₀	-1,745E+000	1,022E-020	1,011E-010
z ₀	9,656E+002	6,149E-020	2,479E-010
Traço MVCXA(m) - traço da matriz de variância-covariância			
Xa (m) - valores ajustados dos parâmetros			

4.1.1.3 Arranjo espacial com 30 observações

O método adotado para depurar os resíduos dá continuidade ao critério praticado no evento do arranjo 02, ao realizar a subtração dos marcos que mais se destacam na curva de resíduos. São o marco limítrofe 10101, contribuiu com -35,44 cm e o marco homólogo 10224E acrescentou ao montante de resíduos 38,68 cm. O arranjo espacial conta com trinta observações distribuídos do seguinte modo; sete marcos limítrofes, de duplo apoio, e vinte e uma observações somado a nove marcos homólogos, de apoio simples, nove observações. A figura 53 ilustra o arranjo.

ARRANJO 03

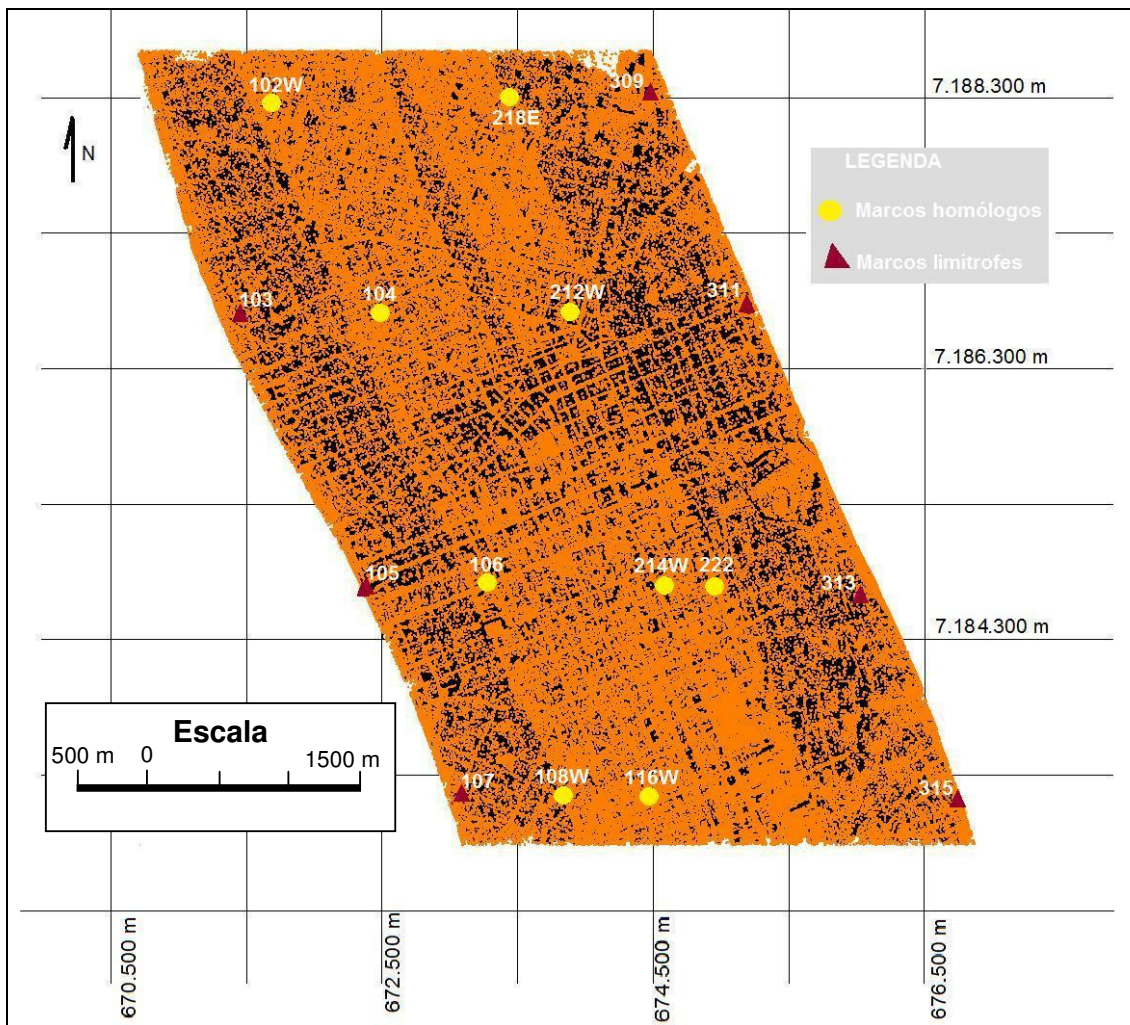


Figura 53 - Arranjo 02: ajustamento com 34 observações

Seja na variação dos resíduos no componente vertical e horizontal seja somente do componente vertical, a figura 54 mostra a redução do intervalo de flutuação para os limites entre -34,34 e 33,95 cm, o registro das coordenadas adotadas para o ajustamento de 30 observações é verificado no quadro 4.7.

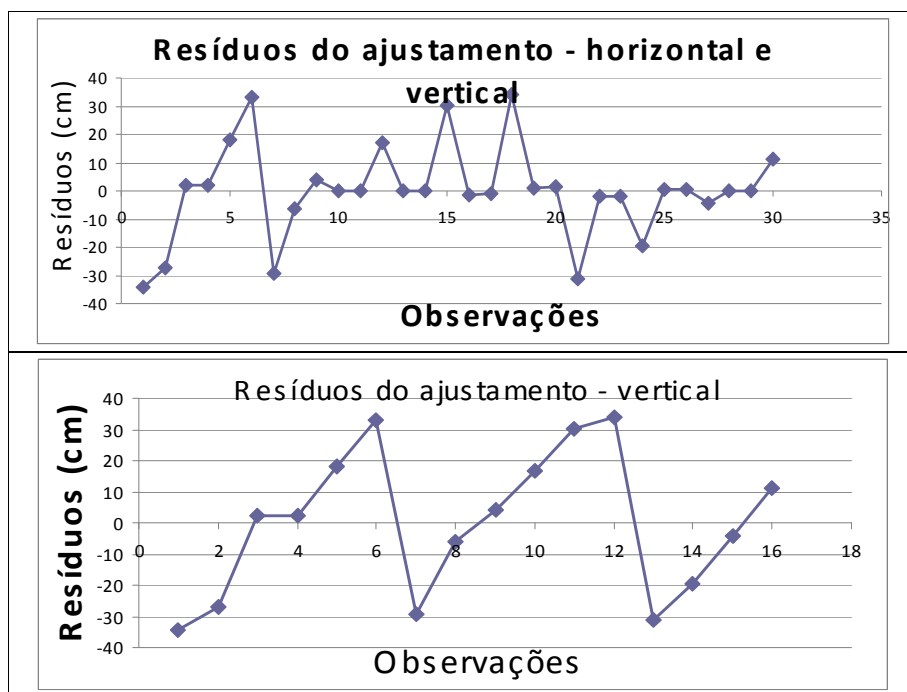


Fig. 54 – gráficos dos resíduos do arranjo 03

O erro médio quadrático refletiu a redução. No âmbito horizontal e vertical foi apurado o valor de 16,76 cm enquanto que no âmbito apenas vertical verificou-se 23,29 cm.

Quadro 4.7 – Quadro das coordenada adotadas para o ajustamento de 30 observações.

No.	Marco	Coordenadas de campo(m)			Coordenadas de calculadas(m)		
		x	y	z	x	y	z
1	10102W	671622,040	7188274,700	962,093	671622,040	7188274,700	961,752
2	10104	672482,806	7186690,739	914,506	672482,806	7186690,739	914,182
3	10106	673260,309	7184682,072	924,651	673260,309	7184682,072	924,428
4	10108W	673825,830	7183102,300	912,817	673825,830	7183102,300	912,465
5	10116W	674479,247	7183091,044	916,819	674479,247	7183091,044	916,682
6	10212W	673399,050	7186726,300	934,524	673399,050	7186726,300	934,867
7	10214W	674292,062	7184665,126	897,531	674292,062	7184665,126	897,124
8	10218E	673379,220	7188322,500	910,954	673379,220	7188322,500	911,134
9	10222	674936,310	7184659,800	890,847	674936,310	7184659,800	890,843
10	10103	671414,595	7186682,811	931,753	671414,595	7186682,811	931,744
11	10105	672335,777	7184642,004	927,903	672335,777	7184642,004	927,865
12	10107	673053,068	7183116,087	904,241	673053,051	7183116,075	904,146
13	10309	674471,567	7188325,921	919,682	674471,575	7188325,932	919,703
14	10311	675195,247	7186751,355	911,034	675195,227	7186751,335	911,056
15	10313	676029,381	7184571,735	894,676	676029,381	7184571,735	894,676
16	10315	676764,012	7183058,110	920,409	676764,012	7183058,109	920,410

Após quatorze iterações foram obtidos os resultados revelados no quadro 4.8. As duas colunas sintetizam o comportamento da variância de doze parâmetros e a precisão correspondente.

Quadro 4.8 - Parâmetros do ajustamento – 30 observações.

Arranjo 03			
Parâmetros	Indicadores da precisão do ajustamento		
	Xa	Traço MVCXA	Desvio-padrão(σ)
a ₁₁	9,999E-001	5,878E-013	7,667E-007
a ₁₂	3,760E-008	6,020E-015	7,759E-008
a ₁₃	-9,385E-005	4,867E-009	6,976E-005
a ₂₁	1,717E-007	2,221E-013	4,712E-007
a ₂₂	1,000E+000	2,274E-015	4,769E-008
a ₂₃	-6,763E-005	1,838E-009	4,288E-005
a ₃₁	-9,486E-005	1,336E-012	1,155E-006
a ₃₂	-1,2567E-004	1,368E-014	1,169E-007
a ₃₃	1,001E+000	1,106E-008	1,051E-004
x ₀	1,709E-003	4,739E-020	2,177E-010
y ₀	-1,731E+000	1,790E-020	1,338E-010
z ₀	9,656E+002	1,077E-019	3,282E-010
Traço MVCXA(m) - traço da matriz de variância-covariância			
Xa (m) - valores ajustados dos parâmetros			

A depuração de resíduos realizados sistematicamente com a subtração dos extremos. Verificada, sobretudo, nas selas dos gráficos que ilustram desde o primeiro arranjo ao terceiro arranjo espacial de marcos é um procedimento que aproxima as coordenadas transformadas pelo modelo matemático isogonal das irregularidades sofridas pela superfície física, se considerar os marcos levados no cálculo dos parâmetros.

4.1.2 Modelo polinomial do terceiro grau no espaço

O tópico 3.2.3.7 cita as experiências praticadas na literatura com modelos matemáticos diversos e entre as citações foi mencionado o modelo polinomial. Não trata apenas da limitação da eficiência do modelo em atender localidades sem pontos de apoio mas, sobretudo, ao número acentuado de parâmetros se comparado com os modelos isogonal, de corpo rígido, projetivo, para citar alguns exemplos.

Não obstante, as limitações conhecidas, a pesquisa fez uma tentativa de estimar os parâmetros, realizar o ajustamento das observações e comparar com os valores resultantes do ajustamento alcançado pelo modelo isogonal. Somam sessenta as incógnitas, ver a expressão 4.1, envolvidas para realizar efetivamente o processo de transformação e, conseqüentemente, consumir o ajustamento das observações assistidas. Para tanto foi incorporado ao arranjo espacial de vinte marcos, verificado na figura 5.6, os marcos testes 01 e 06, registrados no quadro 4.9, para atender ao modo de ajustamento do modelo polinomial, pois quando incorporados somam duas observações excedentes, portanto dois graus de liberdade para o cálculo do ajustamento envolvido na estimativa dos parâmetros.

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4xy + a_5xz + a_6yz + a_7x^2 + a_8y^2 + a_9z^2 + a_{10}xy^2 + a_{11}xz^2 + a_{12}yz^2 + \\ + a_{13}yx^2 + a_{14}zy^2 + a_{15}zx^2 + a_{16}x^3 + a_{17}y^3 + a_{18}z^3 + a_{19}xyz \\ \\ y' = b_0 + b_1x + b_2y + b_3z + b_4xy + b_5xz + b_6yz + b_7x^2 + b_8y^2 + b_9z^2 + b_{10}xy^2 + b_{11}xz^2 + b_{12}yz^2 + \\ + b_{13}yx^2 + b_{14}zy^2 + b_{15}zx^2 + b_{16}x^3 + b_{17}y^3 + b_{18}z^3 + b_{19}xyz \\ \\ z' = c_0 + c_1x + c_2y + c_3z + c_4xy + c_5xz + c_6yz + c_7x^2 + c_8y^2 + c_9z^2 + c_{10}xy^2 + c_{11}xz^2 + c_{12}yz^2 + \\ + c_{13}yx^2 + c_{14}zy^2 + c_{15}zx^2 + c_{16}x^3 + c_{17}y^3 + c_{18}z^3 + c_{19}xyz \end{array} \right. \quad 4.1$$

- x. y. z coordenadas para o referencial terrestre – espaço-scanner
- a₁. a₂. a₃...a_n parâmetros de transformação entre os referenciais do sistema ajustado e o sistema com as medidas brutas

x' . y' . z' coordenadas para o referencial terrestre – espaço-objeto

Quadro 4.9 – Quadro das coordenada adotadas para o ajustamento de 36 observações.

Marco	Coordenadas de campo(m)			Coordenadas de calculadas(m)		
	x	y	z	x	y	z
10102W	671622,040	7188274,700	962,093	671622,040	7188274,700	961,752
10104	672482,806	7186690,739	914,506	672482,806	7186690,739	914,182
10106	673260,309	7184682,072	924,651	673260,309	7184682,072	924,428
10108W	673825,830	7183102,300	912,817	673825,830	7183102,300	912,465
10112W	672771,842	7186711,465	915,544	672771,842	7186711,465	916,104
10116W	674479,247	7183091,044	916,819	674479,247	7183091,044	916,682
10210	672961,476	7188313,676	915,955	672961,476	7188313,676	915,231
10212W	673399,050	7186726,300	934,524	673399,050	7186726,300	934,867
10214W	674292,062	7184665,126	897,531	674292,062	7184665,126	897,124
10218E	673379,220	7188322,500	910,954	673379,220	7188322,500	911,134
10222	674936,310	7184659,800	890,847	674936,310	7184659,800	890,843
10224E	675637,810	7183081,900	885,275	675637,810	7183081,900	885,583
10101	670817,988	7188263,454	911,853	670818,009	7188263,138	911,293
10103	671414,595	7186682,811	931,753	671414,595	7186682,811	931,744
10105	672335,777	7184642,004	927,903	672335,777	7184642,004	927,865
10107	673053,068	7183116,087	904,241	673053,051	7183116,075	904,146
10309	674471,567	7188325,921	919,682	674471,575	7188325,932	919,703
10311	675195,247	7186751,355	911,034	675195,227	7186751,335	911,056
10313	676029,381	7184571,735	894,676	676029,381	7184571,735	894,676
10315	676764,012	7183058,110	920,409	676764,012	7183058,109	920,410
TESTE01	675408,693	7183590,864	894,974	675408,693	7183590,864	895,139
TESTE06	672222,450	7187722,970	950,769	672222,450	7187722,970	950,751

A figura 55 ilustra a disposição espacial de todos os marcos envolvidos no cálculo dos parâmetros de transformação do modelo polinomial do terceiro grau. Após a estimativa inicial dos parâmetros do modelo, a rotina de cálculo mostrou um comportamento similar ao ocorrido com o uso de injunções posicionais. escala. orientação e paralelismo à matriz N citado nos primeiros parágrafos do capítulo - houve divergência. Quer dizer que os limites de flutuação ou a diversidade de parâmetros não foi satisfeita com a amostra de pontos propostos para o ajustamento. A divergência da linearização proposta por Taylor revela a incapacidade de estimar os parâmetros por este método.

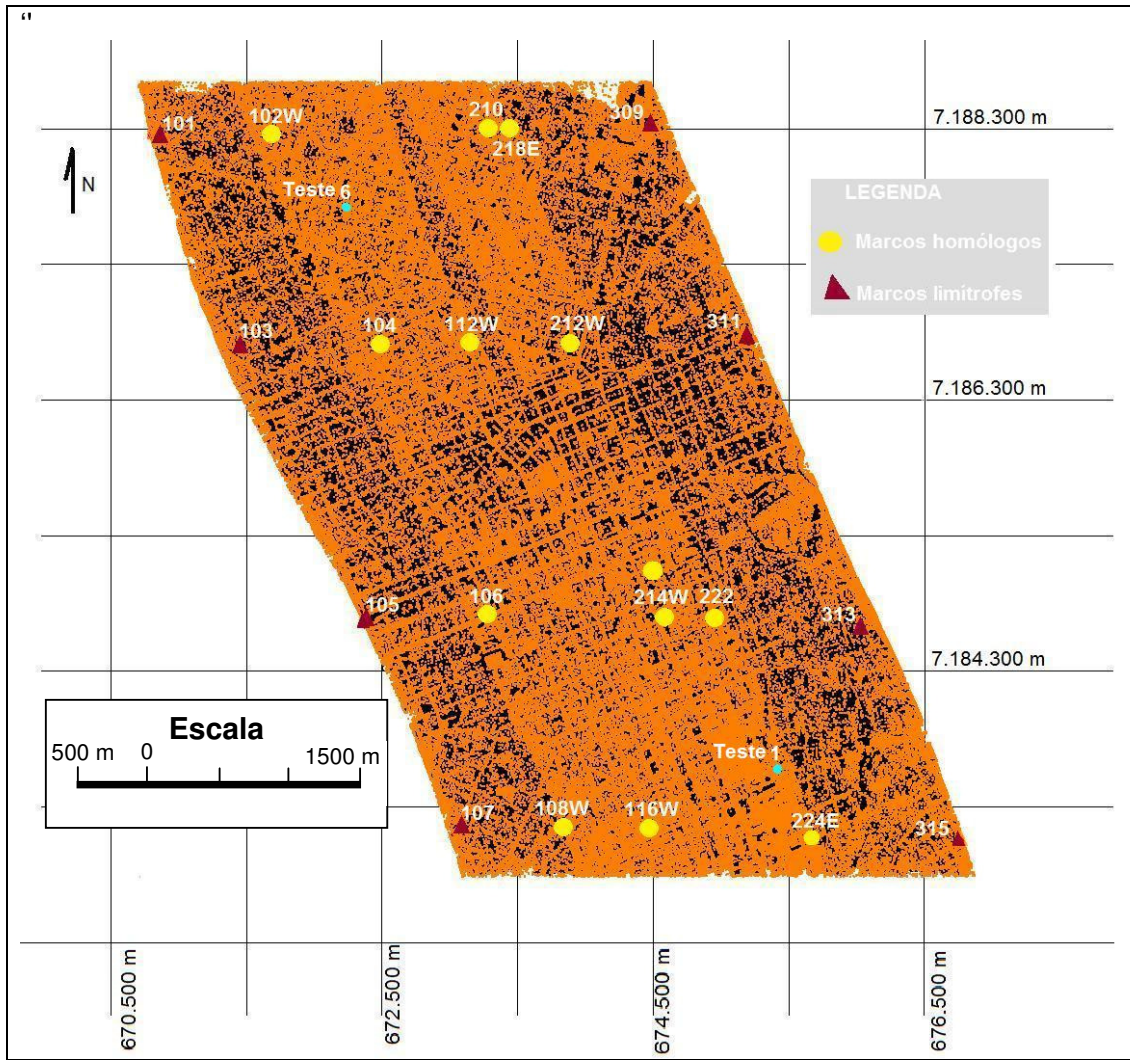


Figura 55 – Arranjo polinomial

4.1.3 Estimativa dos parâmetros se considerar a ondulação geoidal

A estratégia matemática para estimar a altitude ortométrica foi descrita no item 3.2.3.6.1 no capítulo 3 e a figura 4.5 registrou as aproximações da correção atribuída à altitude geométrica. Foram testados três modelos destinados à correção da ondulação geoidal e a expressão matemática que obteve o melhor desempenho foi idealizada por GOLDANI (2006).

4.1.3.1 Estimativa dos parâmetros – 36 observações

A pesquisa avaliou a estimativa dos parâmetros do modelo isogonal com as correções praticadas por GOLDANI (2006) no componente vertical. O quadro 4.10 registra o adicional que foi somado para obter a coordenada z.

Quadro 4.10 – Quadro das coordenadas de campo adotadas para o ajustamento de 36 observações com as correções devido à ondulação geoidal.

No.	Marco	Coordenadas de campo(m)				
		x	y	z	Z _{DIF}	Z
1	10102W	671622,040	7188274,700	962,093	-0,412	961,681
2	10104	672482,806	7186690,739	914,506	-0,220	914,286
3	10106	673260,309	7184682,072	924,651	-0,240	924,411
4	10108W	673825,830	7183102,300	912,817	-0,255	912,562
5	10112W	672771,842	7186711,465	915,544	-0,295	915,249
6	10116W	674479,247	7183091,044	916,819	-0,259	916,560
7	10210	672961,476	7188313,676	915,955	-0,293	915,662
8	10212W	673399,050	7186726,300	934,524	-0,223	934,301
9	10214W	674292,062	7184665,126	897,531	-0,290	897,241
10	10218E	673379,220	7188322,500	910,954	-0,364	910,590
11	10222	674936,310	7184659,800	890,847	-0,232	890,615
12	10224E	675637,810	7183081,900	885,275	-0,270	885,005
13	10101	670817,988	7188263,454	911,853	-0,585	911,268
14	10103	671414,595	7186682,811	931,753	-0,270	931,483
15	10105	672335,777	7184642,004	927,903	-0,270	927,633
16	10107	673053,068	7183116,087	904,241	-0,281	903,960
17	10309	674471,567	7188325,921	919,682	-0,258	919,424
18	10311	675195,247	7186751,355	911,034	-0,288	910,746
19	10313	676029,381	7184571,735	894,676	-0,267	894,409
20	10315	676764,012	7183058,110	920,409	-0,270	920,139

Z_{DIF} – diferença entre a altitude ortométrica atribuída à base de referência e a componente vertical devido à ondulação geoidal

É importante frisar que as coordenadas calculadas dos marcos foram estimadas por método analítico, portanto não sofreram nenhuma alteração nos valores originais.

A estimativa do parâmetro calculado e os indicativos da precisão do ajustamento foram reunidos no quadro 4.11. Além disso reúne os marcos que foram excluídos do ajustamento, se levar em consideração, um critério de redução de resíduos.

Quadro 4.11 - Parâmetros do ajustamento – 36 observações.

Arranjo 01_GOLDANI			
Parâmetros	Indicadores da precisão do ajustamento		
	Xa	Traço MVCXA	Desvio-padrão(σ)
a ₁₁	1,000E+000	7,409E-013	8.607E-007
a ₁₂	-1,831E-007	7,589E-015	8.712E-008
a ₁₃	6,239E-005	7,363E-009	8.581E-005
a ₂₁	-2,695E-05	2,799E-013	5.290E-007
a ₂₂	1,000E+000	2,867E-015	5.354E-008
a ₂₃	-1,755E-003	2,782E-009	5.274E-005
a ₃₁	-1,297E-004	1,684E-012	1.297E-006
a ₃₂	-1,223E-004	1,725E-014	1.313E-007
a ₃₃	1,000E+000	1,673E-008	1.293E-004
x ₀	1,517E-003	2,654E-020	1.629E-010
y ₀	-1,752E+000	1,002E-020	1.001E-010
z ₀	9,656E+002	6,033E-020	2.456E-010
Marcos	resíduos sobre o eixo da componente vertical		
	limite positivo	limite negativo	
10112W	64,20	-	
10210	-	-86,52	
Traço MVCXA(m) - traço da matriz de variância-covariância			
Xa (m) - valores ajustados dos parâmetros			

A figura 56 revela a influência que cada marco atribui ao conjunto de resíduos verificados entre os marcos submetidos ao modelo matemático e as correspondentes coordenadas de campo. O erro médio quadrático no âmbito horizontal e vertical foi apurado o valor de 24,99 cm enquanto que no âmbito apenas vertical verificou-se 33,48 cm.

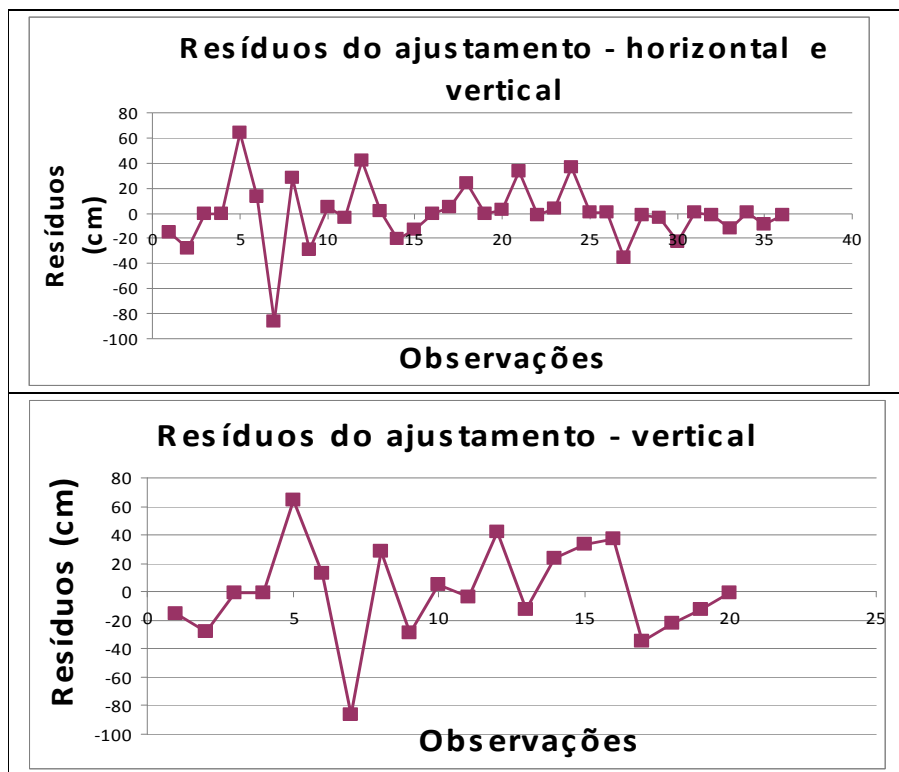


Fig. 56 – gráficos dos resíduos do arranjo 01 com 36 observações ao adotar a correção da ondulação geoidal

O gráfico, expressa na figura 57, com os resíduos apurados no arranjo espacial dos marcos com trinta e seis observações ao considerar a correção devido à ondulação geoidal foi reunido com o gráfico sem a influência da ondulação geoidal. Não há diferenças significativas na curva do ajustamento de observações entre os dois gráficos, salvo quando são analisados pontualmente.

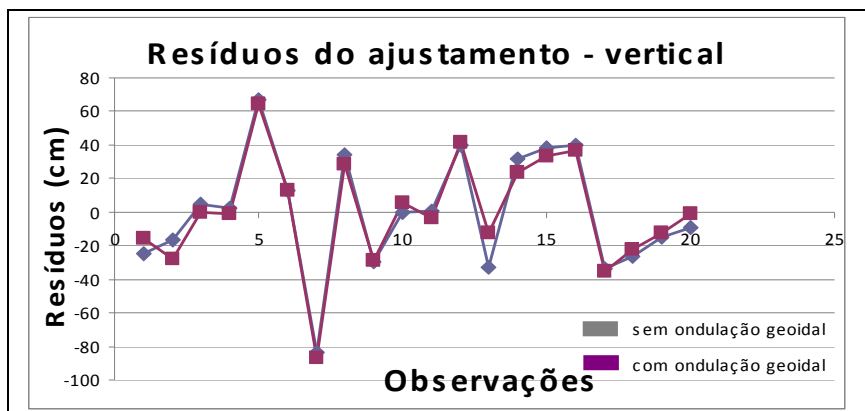


Fig. 57 – gráficos dos resíduos do arranjo 01 com 36 observações ao adotar a correção da ondulação geoidal sobre o similar sem a ondulação geoidal

4.1.3.2 Estimativa dos parâmetros – 34 observações

Somam onze as iterações necessárias para a rotina de ajustamento dedicada à estimativa dos parâmetros e indicativos da precisão, a figura 58 ilustra a curva de resíduos. O quadro 4.12 reúne os valores estimados e, baseado no princípio de depuração de resíduos, discrimina os marcos que contribuíram com os resíduos mais acentuados. O quadro 4.13 reproduz as coordenadas atribuídas aos marcos homólogos e marcos limítrofes contemplados no processo de cálculo.

Quadro 4.12 - Parâmetros do ajustamento – 34 observações.

Arranjo 02_GOLDANI			
Parâmetros	Indicadores da precisão do ajustamento		
	Xa	Traço MVCXA	Desvio-padrão(σ)
a ₁₁	1,000E+000	3,985E-013	6,313E-007
a ₁₂	-1,911E-007	4,080E-015	6,387E-008
a ₁₃	6,646E-005	3,811E-009	6,173E-005
a ₂₁	-2,941E-005	1,505E-013	3,880E-007
a ₂₂	1,000E+000	1,541E-015	3,926E-008
a ₂₃	-1,882E-003	1,440E-009	3,794E-005
a ₃₁	-1,229E-004	9,058E-013	9,517E-007
a ₃₂	-1,230E-004	9,273E-015	9,629E-008
a ₃₃	1,001E+000	8,662E-009	9,307E-005
x ₀	1,597E-003	2,212E-020	1,487E-010
y ₀	-1,745E+000	8,359E-021	9,142E-011
z ₀	9,656E+002	5,028E-020	2,242E-010
Marcos	resíduos sobre o eixo da componente vertical		
	limite positivo	limite negativo	
10224E	40,40	-	
10309	-	-35,67	
Traço MVCXA(m) - traço da matriz de variância-covariância			
Xa (m) - valores ajustados dos parâmetros			

Quadro 4.13 – Quadro das coordenada adotadas para o ajustamento de 34 observações.

No.	Marco	Coordenadas de campo			Coordenadas de calculadas		
		x	y	z	x	y	z
1	10102W	671622,040	7188274,700	961,681	671622,040	7188274,700	961,752
2	10104	672482,806	7186690,739	914,286	672482,806	7186690,739	914,182
3	10106	673260,309	7184682,072	924,411	673260,309	7184682,072	924,428
4	10108W	673825,830	7183102,300	912,562	673825,830	7183102,300	912,465
5	10116W	674479,247	7183091,044	916,560	674479,247	7183091,044	916,682
6	10212W	673399,050	7186726,300	934,301	673399,050	7186726,300	934,867
7	10214W	674292,062	7184665,126	897,241	674292,062	7184665,126	897,124
8	10218E	673379,220	7188322,500	910,590	673379,220	7188322,500	911,134
9	10222	674936,310	7184659,800	890,615	674936,310	7184659,800	890,843
10	10224E	675637,810	7183081,900	885,005	675637,810	7183081,900	885,583
11	10101	670817,988	7188263,454	911,268	670818,009	7188263,138	911,293
12	10103	671414,595	7186682,811	931,483	671414,595	7186682,811	931,744
13	10105	672335,777	7184642,004	927,633	672335,777	7184642,004	927,865
14	10107	673053,068	7183116,087	903,960	673053,051	7183116,075	904,146
15	10309	674471,567	7188325,921	919,424	674471,575	7188325,932	919,703
16	10311	675195,247	7186751,355	910,746	675195,227	7186751,335	911,056
17	10313	676029,381	7184571,735	894,409	676029,381	7184571,735	894,676
18	10315	676764,012	7183058,110	920,139	676764,012	7183058,109	920,410

O erro médio quadrático no âmbito horizontal e vertical foi apurado o valor de 17,56 cm enquanto que no âmbito apenas vertical verificou-se 23,82 cm.

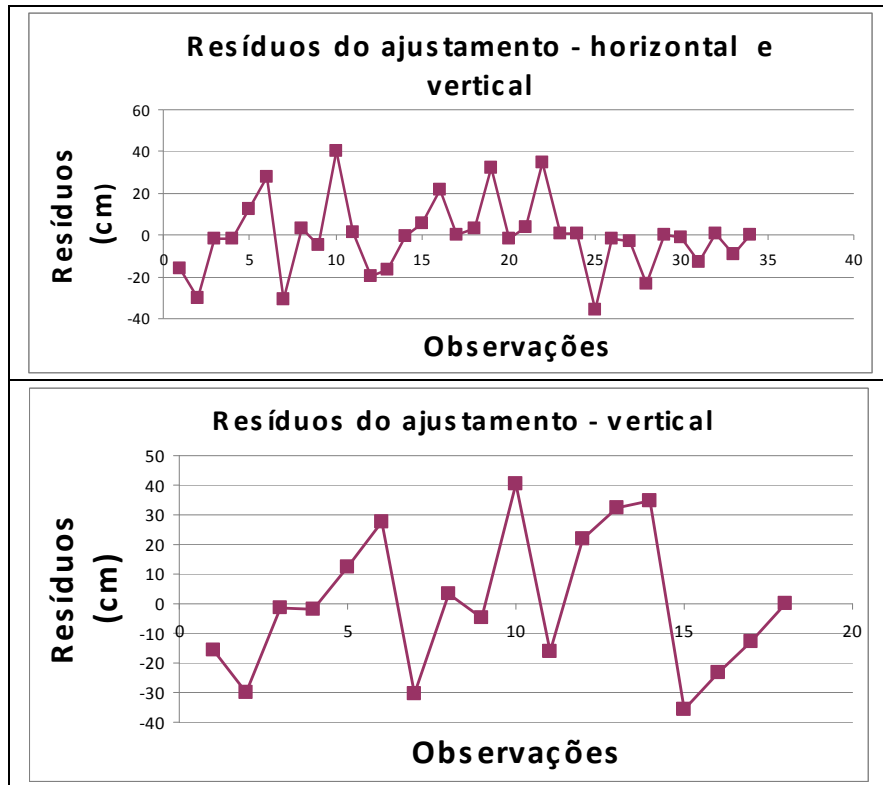


Fig. 58 – gráficos dos resíduos do arranjo 02 com 34 observações ao adotar a correção da ondulação geoidal

A figura 59 mostra um descolamento entre as curvas geradas pelo ajustamento que originou os parâmetros. ao considerar a ondulação geoidal e, sem considerá-la.

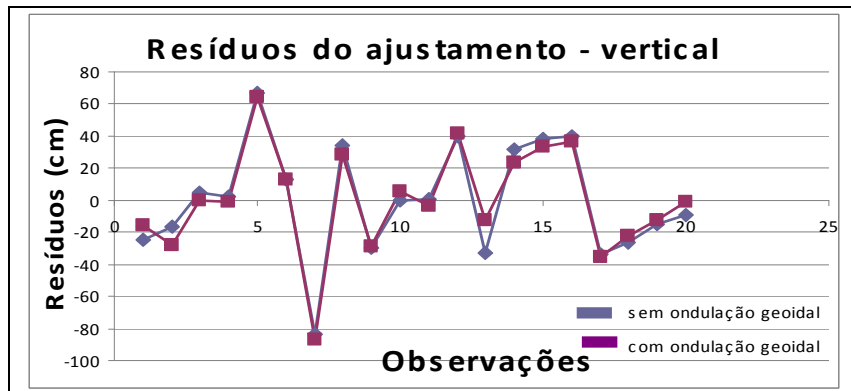


Fig. 59 – gráficos dos resíduos do arranjo 01 com 36 observações ao adotar a correção da ondulação geoidal sobre o similar sem a ondulação geoidal

4.1.3.3 Estimativa dos parâmetros – 30 observações

O quadro 4.14 resume os parâmetros e indicadores da precisão estimados após onze iterações e o quadro 4.15 estão reproduzidas as coordenadas calculadas e as coordenadas medidas no campo dos marcos usadas na estimativa dos parâmetros.

Quadro 4.14 - Parâmetros do ajustamento – 30 observações.

Arranjo 03_GOLDANI			
Parâmetros	Indicadores da precisão do ajustamento		
	Xa	Traço MVCXA	Desvio-padrão(σ)
a ₁₁	1,000E+000	3,391e-013	5,824E-007
a ₁₂	-2,158E-007	3,449e-015	5,873E-008
a ₁₃	6,793E-005	3,507e-009	5,922E-005
a ₂₁	-2,900E-005	1,281e-013	3,579E-007
a ₂₂	1,000E+000	1,303e-015	3,610E-008
a ₂₃	-1,928E-003	1,325e-009	3,640E-005
a ₃₁	-1,223E-004	7,709e-013	8,780E-007
a ₃₂	-1,227E-004	7,840e-015	8,854E-008
a ₃₃	9,982E-001	7,971e-009	8,928E-005
x ₀	1,406E-003	4,995e-021	7,067E-011
y ₀	-1,750E+000	1,887e-021	4,344E-011
z ₀	9,656E+002	1,135e-020	1,065E-010
Marcos	resíduos sobre o eixo da componente vertical		
	limite positivo	limite negativo	
10224E	40,40	-	
10309	-	-35,67	
Traço MVCXA(m) - traço da matriz de variância-covariância			
Xa (m) - valores ajustados dos parâmetros			

Quadro 4.15 – Quadro das coordenada adotadas para o ajustamento de 30 observações.

	Marco	Coordenadas de campo			Coordenadas de calculadas		
		x	y	z	x	y	z
1	10102W	671622.040	7188274.700	961.681	671622.040	7188274.700	961.752
2	10104	672482.806	7186690.739	914.286	672482.806	7186690.739	914.182
3	10106	673260.309	7184682.072	924.411	673260.309	7184682.072	924.428
4	10108W	673825.830	7183102.300	912.562	673825.830	7183102.300	912.465
5	10116W	674479.247	7183091.044	916.560	674479.247	7183091.044	916.682
6	10212W	673399.050	7186726.300	934.301	673399.050	7186726.300	934.867
7	10214W	674292.062	7184665.126	897.241	674292.062	7184665.126	897.124
8	10218E	673379.220	7188322.500	910.590	673379.220	7188322.500	911.134
9	10222	674936.310	7184659.800	890.615	674936.310	7184659.800	890.843
10	10101	670817.988	7188263.454	911.268	670818.009	7188263.138	911.293
11	10103	671414.595	7186682.811	931.483	671414.595	7186682.811	931.744
12	10105	672335.777	7184642.004	927.633	672335.777	7184642.004	927.865
13	10107	673053.068	7183116.087	903.960	673053.051	7183116.075	904.146
14	10311	675195.247	7186751.355	910.746	675195.227	7186751.335	911.056
15	10313	676029.381	7184571.735	894.409	676029.381	7184571.735	894.676
16	10315	676764.012	7183058.110	920.139	676764.012	7183058.109	920.410

Foi apurado como erro médio quadrático no âmbito horizontal e vertical o valor de 15,39 cm enquanto que no âmbito apenas vertical verificou-se 20,57 cm. O registro da figura 60 revela a distribuição dos resíduos nos marcos que foram envolvidos no ajustamento dedicado à estimativa dos parâmetros.

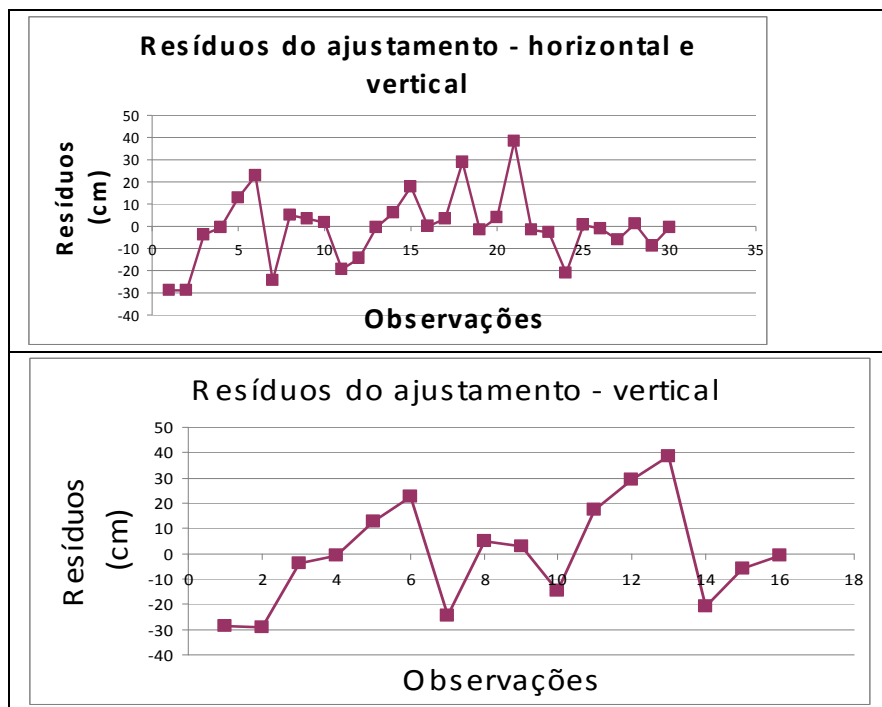


Fig. 60 – gráficos dos resíduos do arranjo 03 com 30 observações ao adotar a correção da ondulação geoidal

O processo de depuração, inicialmente sem contemplar a ondulação geoidal e, em seguida, contemplando a influência da ondulação geoidal trouxe mudanças acentuadas entre as duas curvas, verificadas na figura 61. Um dos principais aspectos é a subtração dos marcos 10101 e 10309, respectivamente. Porque as diferenças que eram pontuais até o processo anterior, que envolveu 34 observações, se tornam consolidadas. O gráfico faz perceber que embora as curvas pertençam ao mesmo plano, quer dizer, contemplam o mesmo universo de marcos, seguem trajetórias distintas.

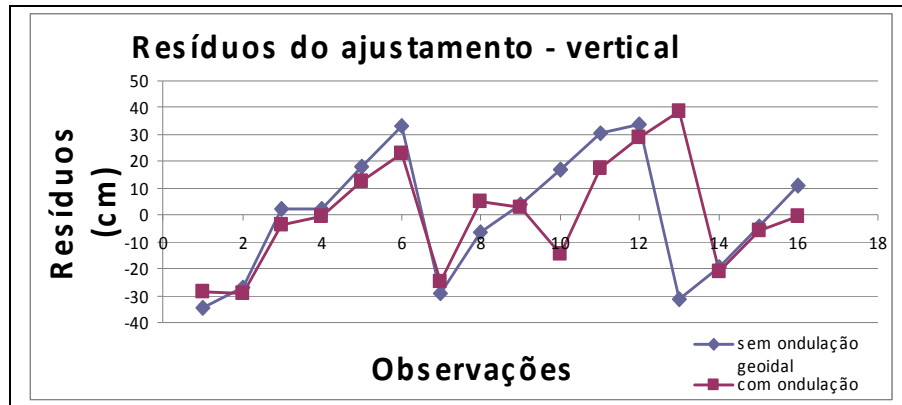


Fig. 61 – gráficos dos resíduos do arranjo 01 com 30 observações ao adotar a correção da ondulação geoidal sobre o similar sem a ondulação geoidal

A etapa dedicada à estimativa dos parâmetros é fundamental para selecionar quais os marcos dentre todos os que tiveram as medições calculadas pela metodologia proposta, e rastreadas com o receptor GPS, para atender ao ajustamento do conjunto das observações amostradas pelo sensor laser sobre a superfície física. A conclusão da fase revela uma convicção. Os parâmetros estimados, logo que inseridos no modelo isogonal no espaço realizam a transformação das observações do espaço-scanner para o espaço-objeto. Em segundo lugar, desde que todas as observações sejam alcançadas pelo método, supõe-se que o bloco que compreende as três faixas do perfilamento foram atendidos e, o procedimento recebe o termo de ajustamento do bloco. E, para finalizar, a capacidade da transformação do modelo é capaz de minorar a ocorrência de resíduos em todo o bloco e, sobretudo, nas bordas das faixas, localidades mais vulneráveis do que em outras posições da varredura realizada pelo ALS, à discrepância vertical.

4.2 ANÁLISE DOS RESÍDUOS DE OBSERVAÇÕES DISTRIBUÍDAS NAS FAIXAS DE AEROLEVANTAMENTO

Após a estimativa dos parâmetros a próxima fase consiste em avaliar o desempenho do ajustamento no bloco. São avaliados os marcos medidos com este propósito – os marcos testes, ao contemplar os trechos distribuídos indistintamente sobre a área do projeto. Porém, é importante perceber a complexidade das variações do componente vertical em toda a extensão do bloco. Neste sentido a avaliação se debruça sobre os trechos na face superior e inferior do bloco, os trechos no centro de faixa de varredura e os trechos na zona de sobreposição lateral. Todos os marcos calculados e com apoio de campo são de fundamental importância, pois são capazes de traduzir a capacidade do parâmetro atribuído ao modelo isogonal identificar as diversidades da componente vertical da superfície física.

4.2.1 Análise dos resíduos de observações submetidas ao ajustamento – distribuição aleatória de marcos testes

O caráter da distribuição espacial dos dez marcos testes, ver figura 62, tem o propósito de avaliar aspectos do ajustamento que afetam a zona de sobreposição, aqueles que afetam o centro de faixa, entre outros, sem ter o foco específico em alguma localidade do bloco.

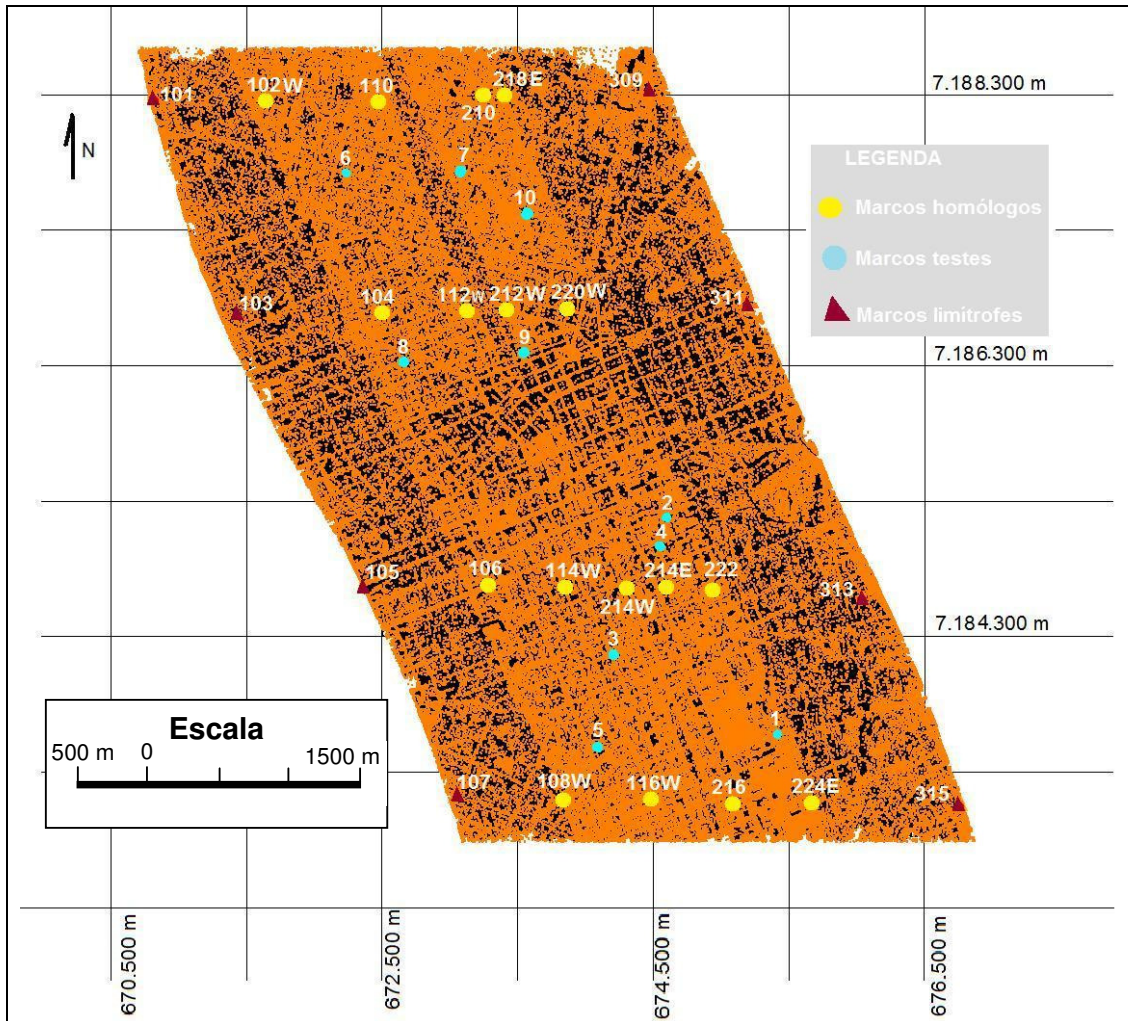


Figura 62 – Arranjo espacial dos marcos testes destinados ao ajustamento do bloco

Os resíduos do ajustamento são avaliados em função de dois parâmetros; o primeiro é obtido das coordenadas atribuídas aos marcos calculados e o segundo decorrente das medidas de campo. São descritos a seguir com o uso de gráficos o desempenho dos parâmetros abordados no item 4.1.1.

O primeiro, conforme ilustra a figura 63, expressam graficamente os resíduos decorrentes da diferença entre as coordenadas dos marcos de apoio e as coordenadas calculadas com o modelo de transformação praticado com os parâmetros estimados para trinta e seis observações e trinta e quatro observações com a influência da ondulação geoidal e sem a mesma influência. Em seguida a figura 64 reflete, igualmente, nas duas curvas a característica dos

resíduos apurados com os parâmetros estimados com trinta observações. É importante assinalar dois aspectos ao observar os gráficos; a adoção da ondulação geoidal, embora tenha alterado distintamente as coordenadas atribuídas ao componente vertical dos marcos no processo de estimativa dos parâmetros de transformação do modelo isogonal, não alterou significativamente a capacidade de interferir na correção das coordenadas, se comparar com o traçado das curvas sem a influência da ondulação. Em outras palavras, o transporte da RN LAPA, para a estação-base que serviu para transmitir a correção diferencial ao receptor GPS instalado na aeronave e obter as coordenadas de todos os pontos amostrados sobre a superfície exercem o mesmo efeito se houvesse contemplado um modelo para a ondulação geoidal da área do projeto de aerolevamento. Em segundo lugar, o traçado gerado pelos resíduos revela um padrão contínuo e linear expresso pelas linhas paralelas afastadas vinte e cinco centímetros uma em relação à outra aproximadamente em todos os arranjos experimentados e delinea um estreitamento ao anteceder mudança de direção, desenho assemelhado à sela.

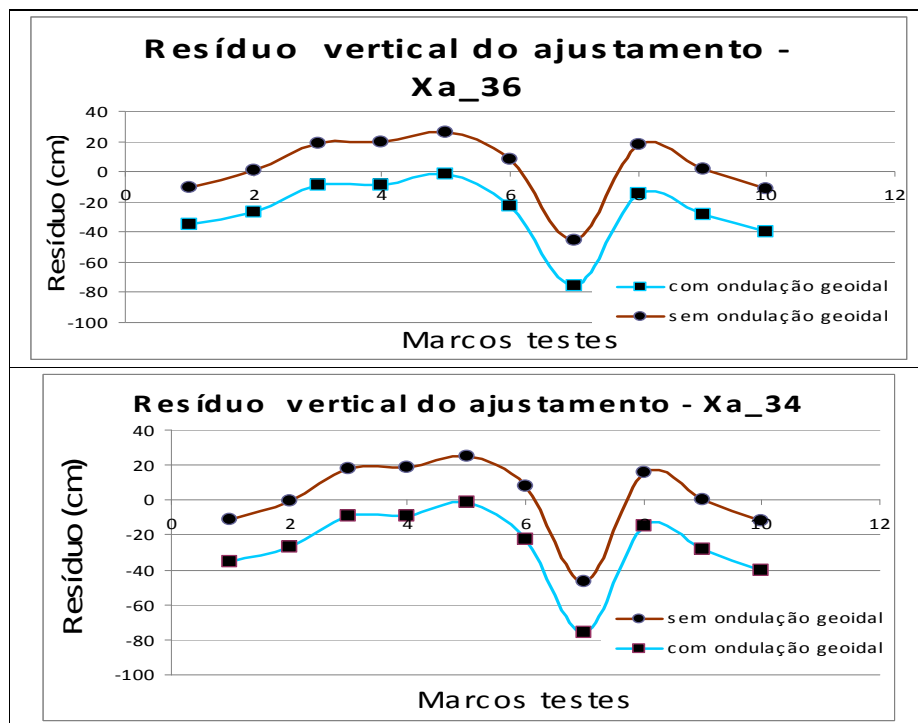


Fig. 63 – gráficos dos resíduos dos marcos testes estimados com os parâmetros de 36 e 34 observações

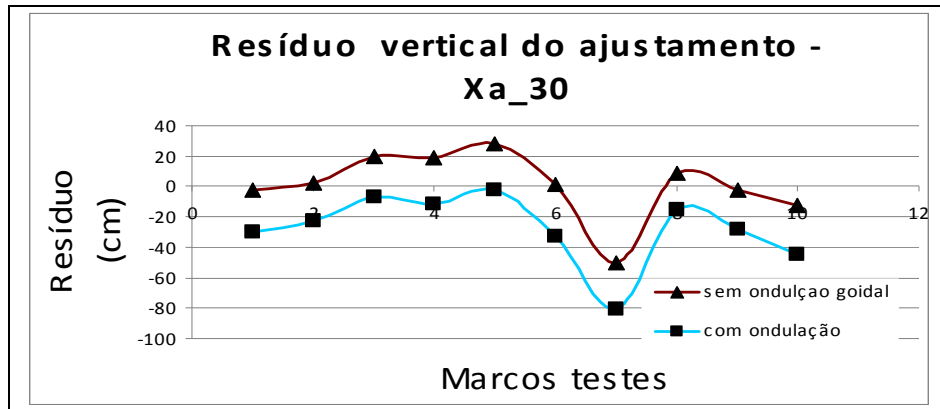


Fig. 64 – gráficos dos resíduos dos marcos testes estimados com os parâmetros de 30 observações

A tabela 4.1 reproduz o erro médio quadrático que foi apurado nas operações ilustradas pelas figuras 63 e 64. Os cálculos dedicados aos resíduos com os parâmetros estimados em função de trinta e mais observações sem a influência da ondulação geoidal apontam que o erro quadrático foi menor do que todas as ocorrências anteriores.

O resíduo atribuído ao marco teste sete realmente afeta o desempenho de todo o ajustamento e, se possível fosse, realizar a iniciativa de reduzir a influência dos resíduos no ajustamento dos marcos com a subtração dos extremos da curva, o erro médio quadrático reduziria para 8,51 cm. Naturalmente, o procedimento não é cabível e serve apenas para reforçar a idéia da limitação de ajustamento do modelo isogonal em adequar todos os marcos da superfície amostrada igualmente. É um fato que atinge certamente as coordenadas do marco teste sete e a outros inseridos no elenco de observações medidas pelo sensor ALS.

Tabela 4.1 – Erros médios quadráticos apurados com a distribuição aleatória de marcos testes

	Erro médio quadrático (cm)	
	sem ondulação geoidal	com ondulação geoidal
Xa ₃₆	21,21	21,31
Xa ₃₄	21,44	21,31
Xa ₃₀	21,85	22,70
Xa ₃₆ – modelo isogonal praticado com parâmetros internos estimados de 36 observações.		
Xa ₃₄ – modelo isogonal praticado com parâmetros internos estimados de 34 observações.		
Xa ₃₀ – modelo isogonal praticado com parâmetros internos estimados de 30 observações.		

A flutuação de resíduos do componente vertical percebida ao longo da estimativa dos parâmetros com e sem a influência da ondulação geoidal variou de 35,12 a 20,57 cm. O marco sete, por sua vez, registrou diferença entre a coordenada atribuída a componente vertical do campo e a correspondente analiticamente igual a trinta e nove centímetros. Um dos fatores que aparentemente afetam a adequação do ajustamento são as diferenças existentes entre as medidas. Isto se deve ao fato de existir no procedimento de cálculo envolvendo a medição terrestre e a medição analítica um componente matemático que o modelo isogonal não consegue contemplar no novo cálculo, sobretudo, quando o resíduo do marco é superior ao valor do resíduo estimado para os parâmetros de transformação do modelo isogonal.

É importante assinalar que a configuração do relevo não é componente restritivo à adequação das coordenadas do marco sete à superfície física, pois como se verifica na figura 65 a modelagem no entorno do marco sete varia de plana a medianamente suave.

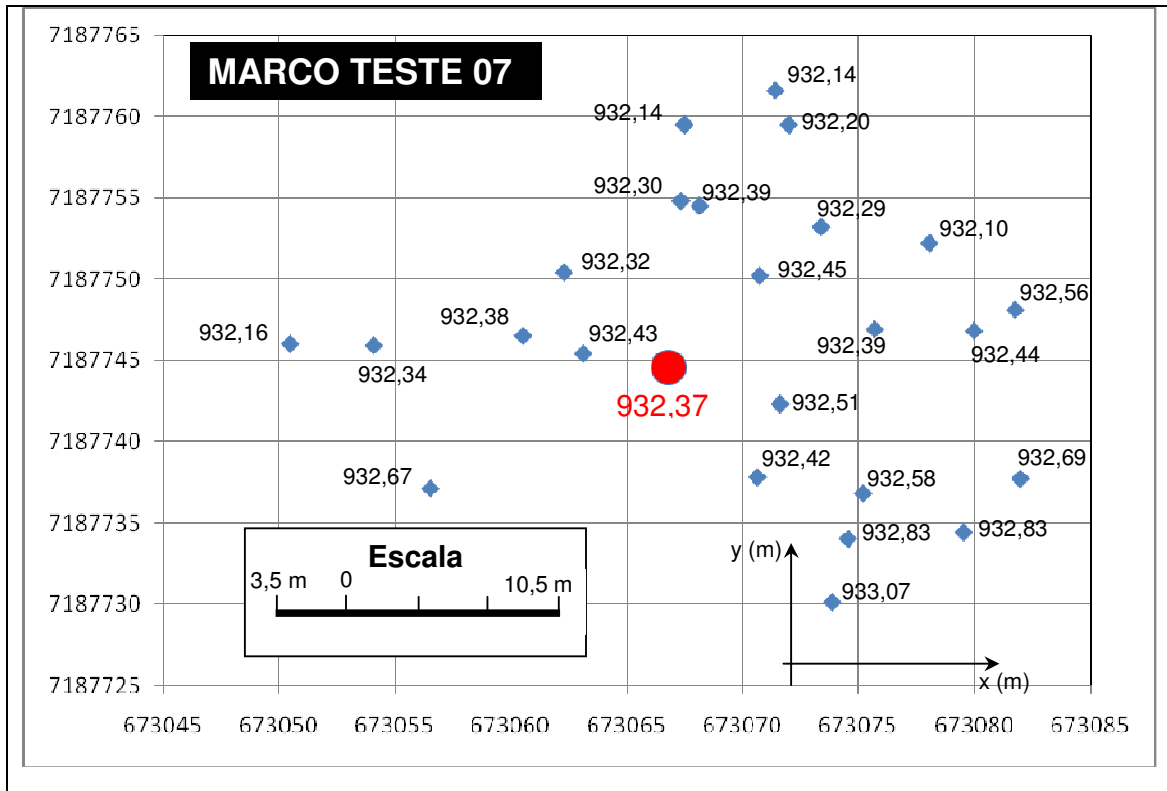


Fig.65 – Distribuição espacial das observações do ALS em relação ao marco teste sete

Por outro lado, o ajustamento alcançou resultados que demonstram adequar perfeitamente o comportamento da variação do relevo à eficiência dos parâmetros do modelo de transformação em atender às variações. São encontrados exemplos em todos os arranjos; são resíduos de dois centímetros com os parâmetros estimados com trinta e seis observações, um centímetro com igual número de observações e contemplando a ondulação geoidal e nulo com trinta e quatro observações verificados para o marco teste 2. É igualmente nulo para o marco teste nove com trinta e quatro observações. O marco teste cinco verificou resíduo negativo igual a unidade com os parâmetros estimados com trinta e seis e trinta e quatro observações ao contemplar a ondulação geoidal e duas unidades negativas com trinta observações. Restou apenas o marco teste seis com o mesmo número de trinta observações sem influência da ondulação geoidal igual a unidade. A análise dos resíduos permite concluir que o modelo não reflete comportamento tendencioso de ajustar uma localidade, ou conjunto de observações em detrimento de outras, pois os marcos testes 2, 5 e 6 foram posicionados em locais distante no bloco e apresentaram igual desempenho, sob o ponto de vista dos resíduos calculados.

4.2.2 Análise dos resíduos de observações submetidas ao ajustamento – distribuição de marcos no trecho superior

A distribuição espacial dos marcos que compreendem o trecho superior, área hachurada da figura 66, tem o caráter de avaliar o comportamento dos resíduos decorrentes do ajustamento nos marcos que concentram o trecho superior do bloco de faixas.

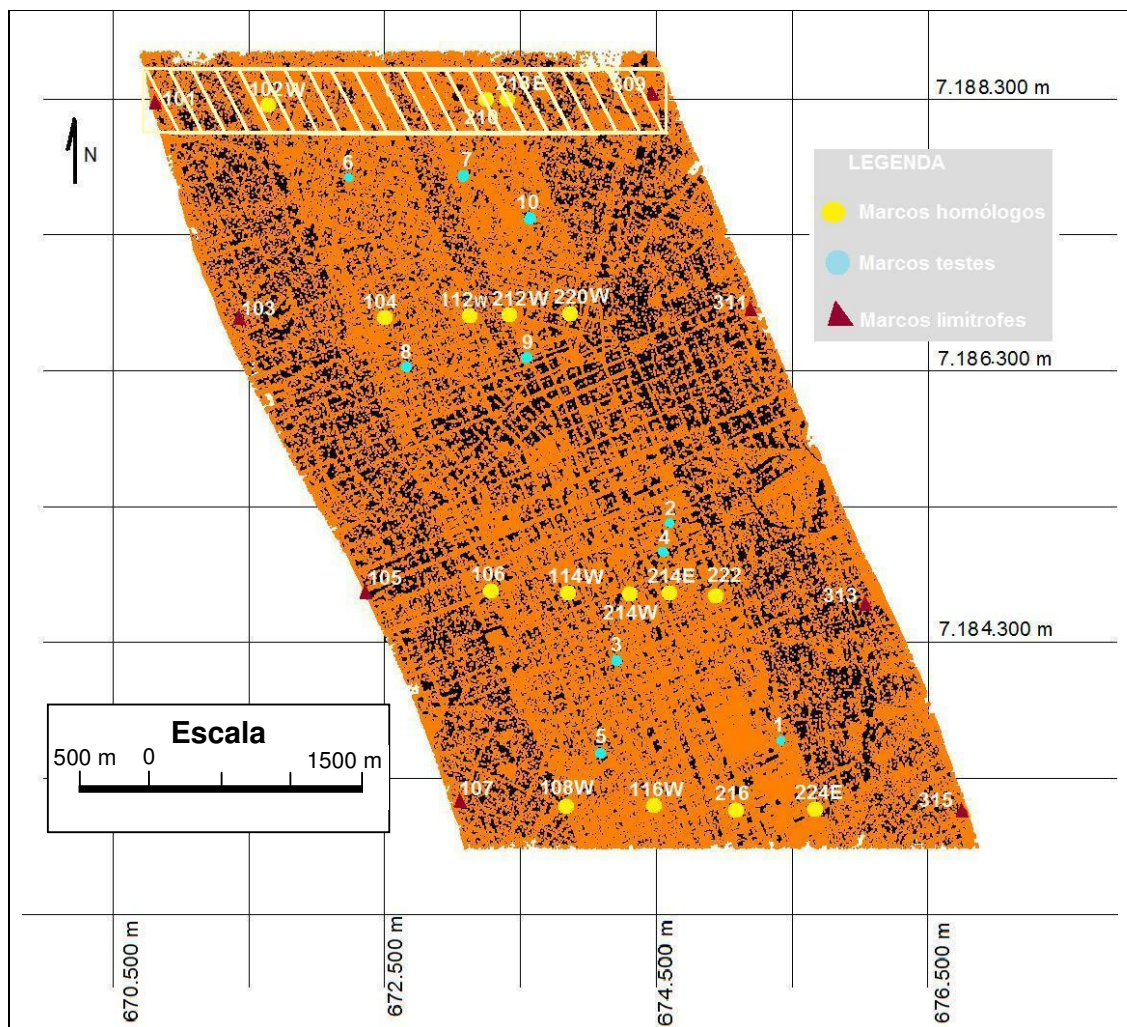


Figura 66 – Arranjo espacial dos marcos no trecho superior do bloco destinados ao ajustamento do bloco

A figura 67 e figura 68 ilustra os resíduos atribuídos a uma seqüência de marcos homólogos e marcos limítrofes envolvidos no processo de avaliação. São relacionados sequencialmente os marcos 10102W, 10210, 10218E, 10101 e 10309 conforme numeração na abcissa.

Uma característica percebida na análise do ajustamento dos marcos testes se repete com os marcos destinados à avaliação do resíduo no trecho superior. O segundo marco na abcissa mostra um resíduo mais acentuados do que os demais e corresponde ao marco homólogo 10210.

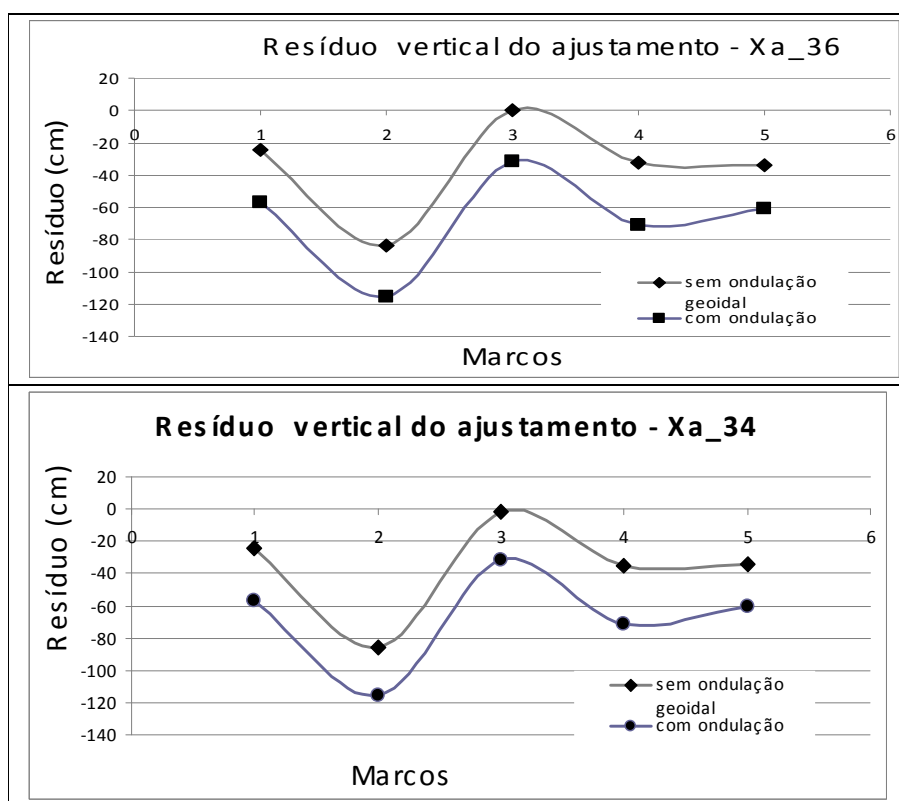


Fig. 67 – gráficos dos resíduos dos marcos estimados com os parâmetros de 36 e 34 observações

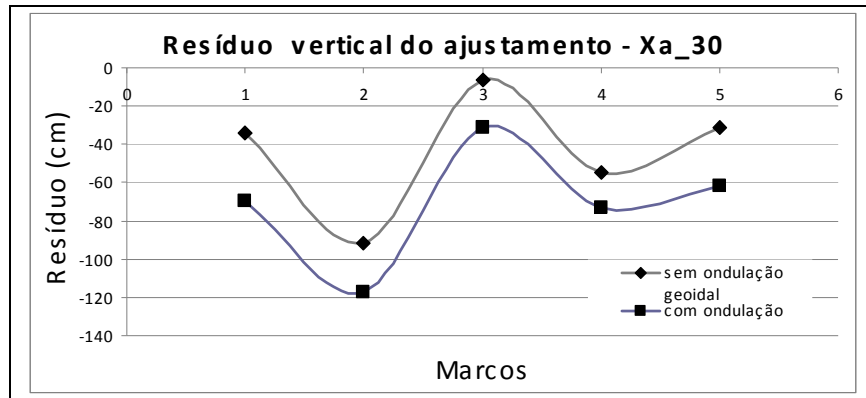


Fig. 68 – gráficos dos resíduos dos marcos testes estimados com os parâmetros de 30 observações

Coincidentemente, dentre os seis marcos avaliados é aquele com a maior diferença entre a coordenada calculada e as medidas de campo; setenta e dois centímetros negativos. Quando comparado os valores atribuídos ao erro médio quadrático global na tabela 4.2 com as medidas realizadas com a distribuição aleatória de marcos testes tem-se a percepção da deterioração do desempenho do indicador do ajustamento. Há alguns elementos envolvidos no ajustamento que aparentam influenciar na qualidade das medições. O marco 10210 conforme ilustração da figura 69 está inserido na região com relevo mais acentuado do que o marco sete na análise abordada sobre distribuição aleatória. Em segundo lugar, os marcos tem diferentes inserções no modelo de ajustamento. Enquanto os marcos 10102W, 10210, 10218E são homólogos e foram calculados originalmente de um processo que combina a localização geográfica em zona comum a duas faixas de varredura, os marcos 10101 e 10309 ocupam as bordas da faixa do bloco. Além disso, os cálculos que originaram as coordenadas são distintos dos marcos homólogos, pois dão os subsídios para a estimativa dos parâmetros do modelo de transformação adotado com as coordenadas posicionais, x e y e também a componente vertical z, os marcos homólogos instruem o cálculo apenas com o componente vertical.

Tabela 4.2 – Erros médios quadráticos apurados com a distribuição aleatória de marcos testes

	Erro médio quadrático (cm)			
	Distribuição aleatória		Trecho superior	
	SOG	COG	SOG	COG
Xa ₃	21,21	21,31	30,49	30,94
Xa ₃₄	21,44	21,31	30,62	30,94
Xa ₃₀	21,85	22,70	32,04	30,80
Xa ₃₆ – modelo isogonal praticado com parâmetros internos estimados de 36 observações.				
Xa ₃₄ – modelo isogonal praticado com parâmetros internos estimados de 34 observações.				
Xa ₃₀ – modelo isogonal praticado com parâmetros internos estimados de 30 observações.				
SOG - Sem Ondulação Geoidal				
COG - Com Ondulação Geoidal				

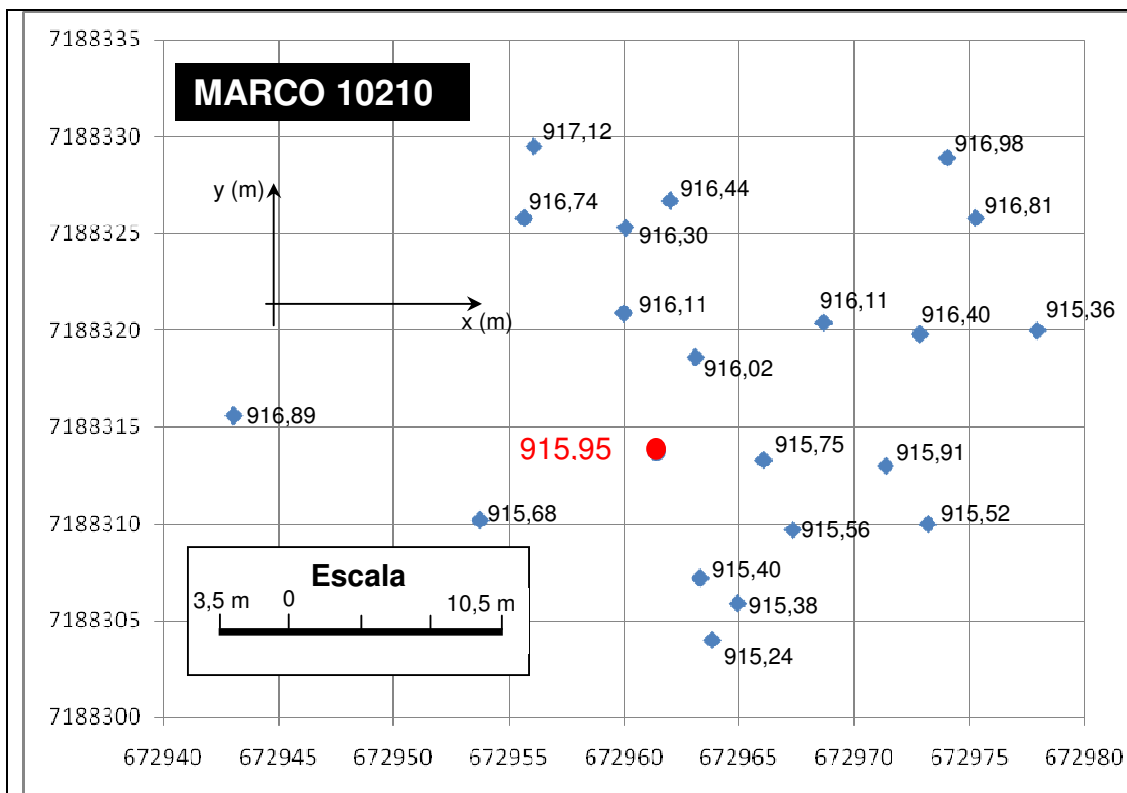


Fig.69 – Distribuição espacial das observações do ALS em relação ao marco teste sete

4.2.3 Análise dos resíduos de observações submetidas ao ajustamento – distribuição de marcos no trecho inferior

Após a avaliação sobre os marcos testes e os marcos que prestam à avaliação do trecho superior, o estudo se dedica aos marcos que afetam a extremidade inferior do bloco. A área hachurada na figura 70 destaca a localização dos marcos limítrofes 10107 e 10315 e dos marcos homólogos 10108W, 10116W e 10224E.



Figura 70 – Arranjo espacial dos marcos no trecho inferior do bloco destinados ao ajustamento do bloco

A curva obtida dos resíduos dos marcos no trecho inferior do bloco com o modelo isogonal de trinta e seis observações repete uma característica abordada no item que trata os marcos testes – a similaridade das curvas. A distância entre as curvas notada em todos os casos foi subtraída e os modelos de transformação geraram curvas coincidentes, acompanhe pela figura 71 e 72. Ressalta-se, portanto, a condição desnecessária de contemplar um modelo geoidal para realização da correção da altitude geométrica.

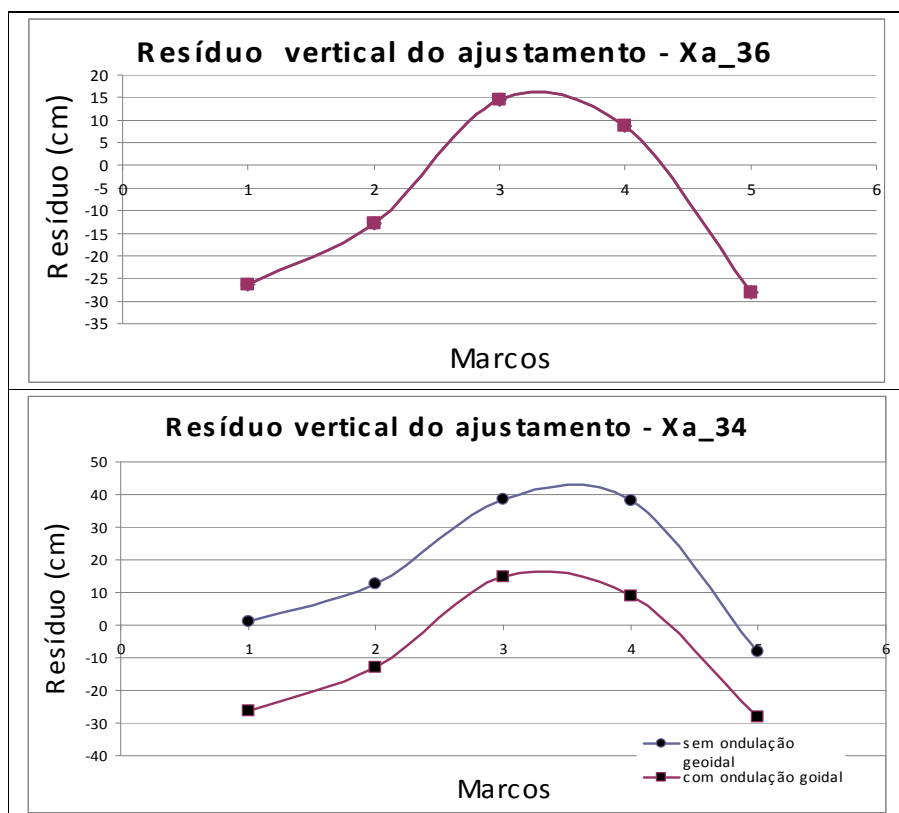


Fig. 71 – gráficos dos resíduos dos marcos estimados com os parâmetros de 36 e 34 observações

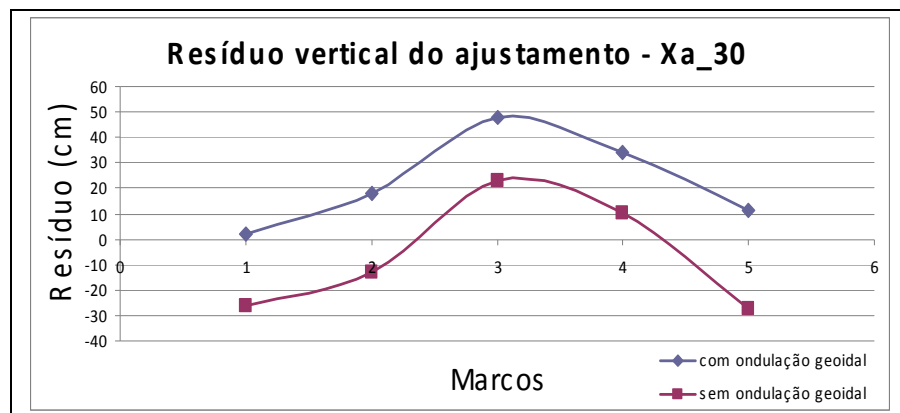


Fig. 72 – gráficos dos resíduos dos marcos testes estimados com os parâmetros de 30 observações

A condição de coincidência entre as curvas de resíduos pode ser atribuída a dois aspectos; o primeiro atenta para a diferença da coordenada z dos marcos do trecho inferior e a segunda devida aos parâmetros estimados para os modelos isogonais com e sem a influência da ondulação geoidal.

Os quadros 4.1 e 4.2 no início do capítulo reproduz a listagem dos marcos que foram contemplados no processo de ajustamento. É notável a diferença entre as coordenadas calculadas pela metodologia detalhada no capítulo 3 e as medições aferidas com o GPS. Foi constatado que quanto maior a diferença, verificada nos quadros 4.1 e 4.2, atribuída ao marco, maior será o resíduo do ajustamento. Fato que foi verificado recentemente ao avaliar o marco 10210 no trecho superior do bloco. A tabela 4.3 reproduz a listagem dos marcos envolvidos na análise do ajustamento, nota-se que a diferença não é significativa se for comparado com o intervalo dos resíduos atribuídos à estimativa do parâmetros do modelo isogonal que apontou para o intervalo entre 27,12 e 15,41 cm.

Tabela 4.3 - Diferenças entre as coordenadas calculadas e as coordenadas de campo

Marcos	$\Delta x(\text{cm})$	$\Delta y(\text{cm})$	$\Delta z(\text{cm})$
tie_point_10108W	0	1	-35
tie_point_10116W	9	1	-14
tie_point_10224E	1	0	31
tie_point_10107	-2	-1	-10
tie_point_10315	0	0	0

Por outro lado, o quadro 4.16 auxilia a compreensão sobre os parâmetros atribuídos ao modelo isogonal com e sem ondulação geoidal. Com exceção dos parâmetros grafados na respectiva tabela todos os demais são idênticos, evento que reforça a condição de identidade do traçado atribuído às curvas de resíduos.

É possível, inclusive, formar convicção sobre a quantidade de marcos envolvidos no processo de ajustamento e a necessidade de contemplar a ondulação geoidal para corrigir a altitude geométrica. A experiência aponta que quanto maior o número de marcos envolvidos no processo de ajustamento menor a influência da ondulação geoidal. Fica em evidência, que em determinados trechos do bloco as curvas seguem harmoniosamente e em outros ocorre a fusão dos traçados.

Quadro 4.16 - Parâmetros do ajustamento – 36 observações.

Xa ₃₆		
	SOG	COG
a ₁₁	1,000E+000	1,000E+000
a ₁₂	-1,831E-007	-1,831E-007
a ₁₃	6,239E-005	6,239E-005
a ₂₁	-2,695E-005	-2,695E-05
a ₂₂	1,000E+000	1,000E+000
a ₂₃	-1,755E-003	-1,755E-003
a ₃₁	-1,591E-004	-1,297E-004
a ₃₂	-1,194E-004	-1,223E-004
a ₃₃	9,998E-001	1,000E+000
x ₀	1,517E-003	1,517E-003
y ₀	-1,752E+000	-1,752E+000
z ₀	9,656E+002	9,656E+002
Xa ₃₆ (m) - valores ajustados dos parâmetros		
SOG - Sem Ondulação Geoidal		
COG - Com Ondulação Geoidal		

Embora não seja descartada a possibilidade de ocorrência de mesmo caráter nos modelos que contemplam trinta e quatro observações e trinta observações, a análise dos parâmetros nos quadros 4.17 indica uma distinção entre as circunstâncias com e sem a influência da ondulação geoidal e, portanto, diminui a possibilidade de ocorrências com a identidade das curvas de resíduos.

Quadro 4.17 – Quadro comparativos entre os parâmetros do ajustamento estimado para 34 e 30 observações

	Xa ₃₄		Xa ₃₀	
	SOG	COG	SOG	COG
a ₁₁	1,000E+000	1,000E+000	9,999E-001	1,000E+000
a ₁₂	-1,911E-007	-1,831E-007	3,760E-008	-2,158E-007
a ₁₃	6,646E-005	6,239E-005	-9,385E-005	6,793E-005
a ₂₁	-2,941E-005	-2,695E-005	1,717E-007	-2,900E-005
a ₂₂	1,000E+000	1,000E+000	1,000E+000	1,000E+000
a ₂₃	-1,882E-003	-1,755E-003	-6,763E-005	-1,928E-003
a ₃₁	-1,538E-004	-1,297E-004	-9,486E-005	-1,223E-004
a ₃₂	-1,199E-004	-1,223E-004	-1,2567E-004	-1,227E-004
a ₃₃	1,000E+000	1,000E+000	1,001E+000	9,982E-001
x ₀	1,597E-003	1,517E-003	1,709E-003	1,406E-003
y ₀	-1,745E+000	-1,752E+000	-1,731E+000	-1,750E+000
z ₀	9,656E+002	9,656E+002	9,656E+002	9,656E+002
Xa ₃₆ (m) - valores ajustados dos parâmetros				
SOG - Sem Ondulação Geoidal				
COG - Com Ondulação Geoidal				

Um detalhe do trecho inferior do bloco que difere das outras áreas avaliadas é o comportamento difuso dos resíduos que repousam sobre os marcos. Não há concentração ou indicativo que concentre em todas as avaliações a prevalência de um marco com resíduo mais acentuado do que os demais e vice-versa.

A análise para as trinta e seis observações são destaques os marcos com maior resíduo o 10108 e 10315. Na outra extremidade resta o marco 10107 que apurou nove centímetros. Em seguida, ao observar o modelo para trinta e quatro observações sem ondulação geoidal, o marco 10108W é o menor resíduo com uma unidade, por outro lado, os marcos 10224E e 10107 são os mais acentuados 39 e 38 cm, respectivamente, para citar alguns exemplos.

A tabela 4.3 mostra que a comparação entre os três locais avaliados e aponta para o trecho superior a concentração dos maiores resíduos.

Tabela 4.4 – Erros médios quadráticos apurados com a distribuição aleatória de marcos testes

	Erro médio quadrático (cm)					
	Distribuição aleatória		Trecho superior		Trecho inferior	
	SOG	COG	SOG	COG	SOG	COG
Xa ₃₆	21,21	21,31	30,49	30,94	19,68	19,68
Xa ₃₄	21,44	21,31	30,62	30,94	21,36	19,68
Xa ₃₀	21,85	22,70	32,04	30,80	18,21	22,40
Xa ₃₆ – modelo isogonal praticado com parâmetros internos estimados de 36 observações.						
Xa ₃₄ – modelo isogonal praticado com parâmetros internos estimados de 34 observações.						
Xa ₃₀ – modelo isogonal praticado com parâmetros internos estimados de 30 observações.						
SOG - Sem Ondulação Geoidal						
COG - com ondulação geoidal						

4.2.4 Análise dos resíduos de observações submetidas ao ajustamento – distribuição de marcos no trecho central

Uma característica singular dos marcos que contemplam a faixa central está no fato de todos serem marcos homólogos. A área hachurada no centro da figura 7.4 insere os marcos 10104, 10106, 10112W, 10212W 10214W e 10222 e estão dispostos sequencialmente numerados sob a abcissa dos gráficos que ilustram as figuras 73.

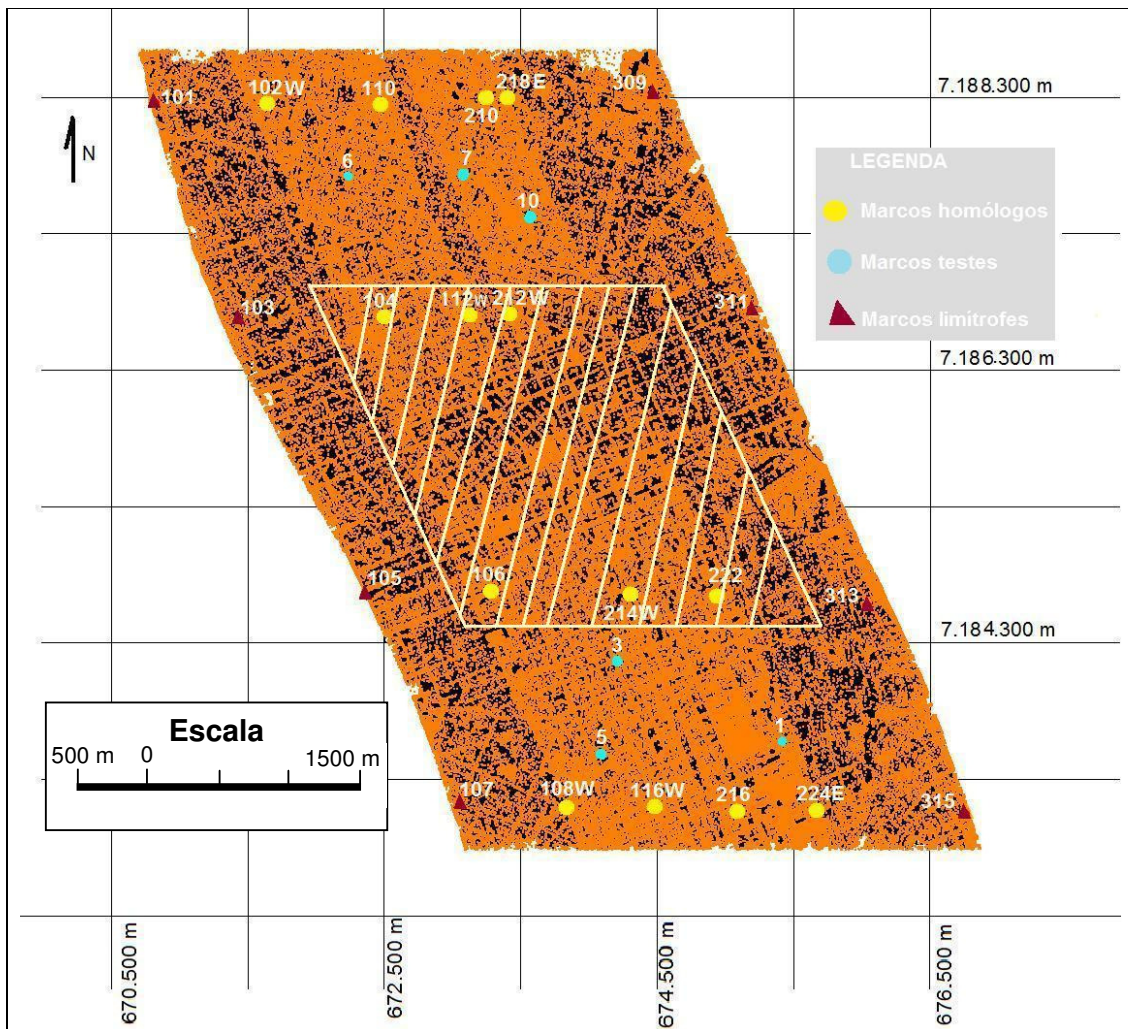


Figura 73 – Arranjo espacial dos marcos no trecho inferior do bloco destinados ao ajustamento do bloco

As curvas de resíduos ilustram um tema recorrente – o desequilíbrio entre os marcos. As figuras 74 e 75 ilustram a prevalência de dois marcos nos limites, seja na extremidade negativa seja na extremidade positiva do eixo vertical da curva de resíduos.

A justificativa dos acentuados desvios se comparados com os demais marcos verificados para o 10112W e 10214W é atribuída a diferença entre as coordenadas calculadas e as correspondentes medidas no campo. A figura 76 assinala a diferença de 56,01 cm e -40,69, respectivamente.

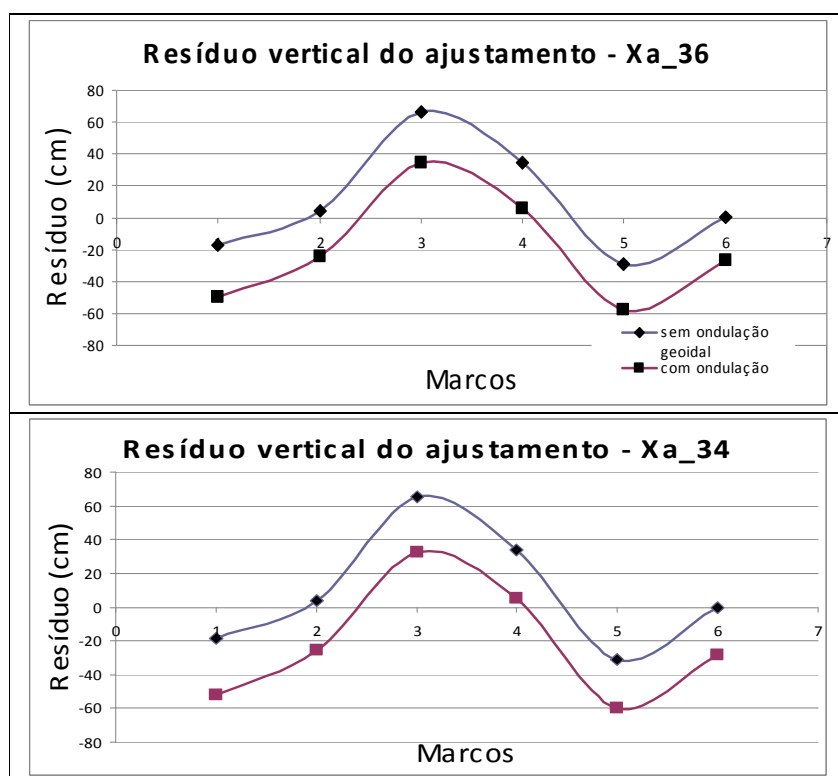


Fig. 74 – gráficos dos resíduos dos marcos estimados com os parâmetros de 36 e 34 observações

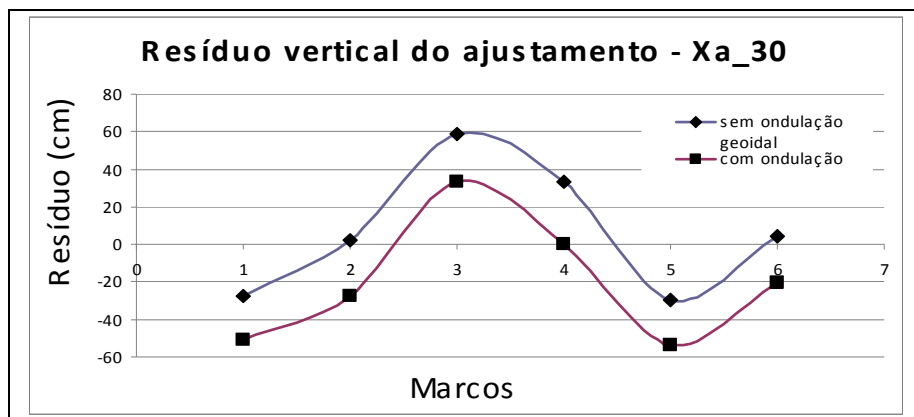


Fig. 75 – gráficos dos resíduos dos marcos testes estimados com os parâmetros de 30 observações

A distribuição espacial de observações amostradas pelo sensor ALS não aponta variações expressivas no relevo como falhas geológicas, depressões acentuadas ou escarpas, ao contrário, a região usada neste teste apresenta conformação de relevo levemente movimentado, quase plano e o ponto interpolado encontra-se numa altura mais alta que as demais observações. Portanto, o modelado da superfície não pode ser apresentado como impecílio para que o modelo adotado como transformação não consiga ajustar e justifiquem a existência de resíduos no marco 10112W.

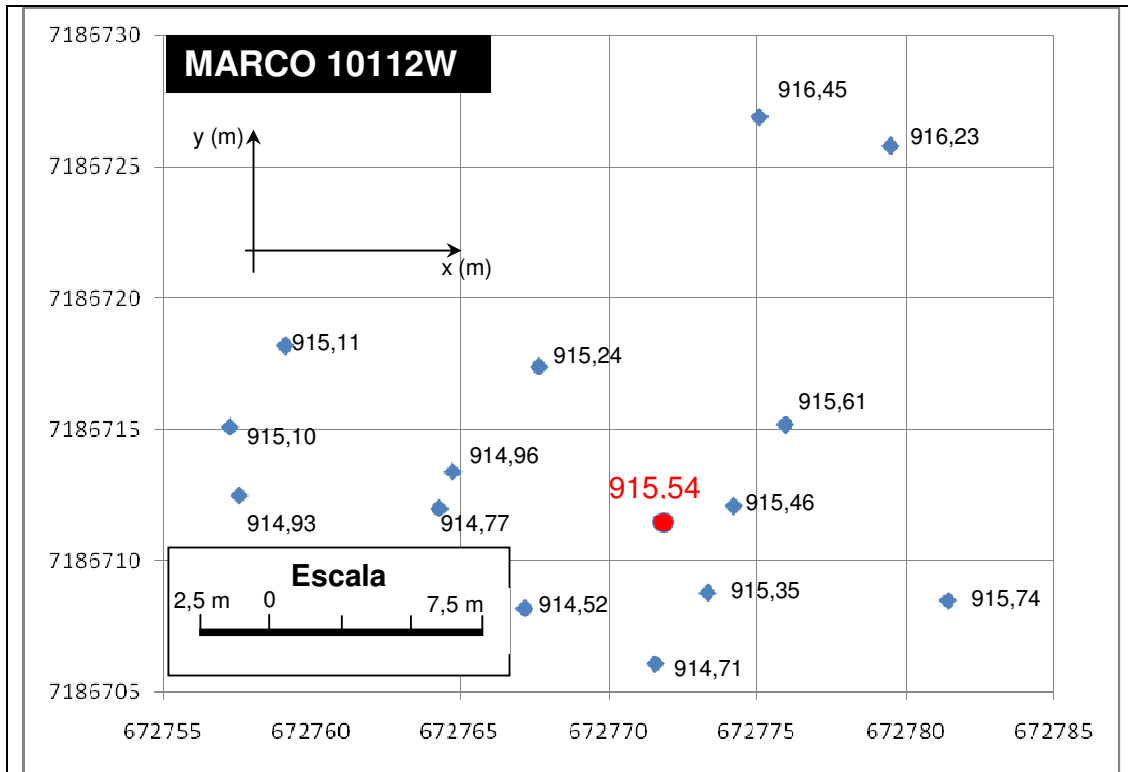


Fig.76 – Distribuição espacial das observações do ALS em relação ao marco teste sete

Por outro lado, a tabela 4.5 revela as variações de relevo no raio de vinte metros a partir da localização do marco 10214W, englobando a observações decorrentes de perfilamento mais próximos. Não há indícios de variação brusca do relevo ou aponte desvio que o modelo isogonal não pudesse modelar.

Tabela 4.5 – Medições do ALS inseridas no raio de 20 m de extensão.

x(m)	y(m)	z(m)
674300	7184683	898,03
674294	7184679	897,81
674301	7184678	897,73
674305	7184678	897,88
674273	7184665	897,93
674301	7184673	897,49
674301	7184668	897,18
674301	7184667	897,12
674288	7184660	897,19
674312	7184668	897,25
674312	7184668	897,21
674311	7184663	897,07
674305	7184656	896,63
674305	7184652	896,52
674301	7184647	896,64
674292	7184665	897,24

O erro médio quadrático verificado nos marcos apurados na região central são os mais elevados ao comparar com outros trechos, em parte devido a própria natureza da região, os marcos são mais susceptíveis à variação do que aqueles próximos das bordas, pois os marcos limítrofes impedem uma flutuação mais acentuada, a tabela 4.6 descreve os valores calculados. Por outro lado, o método de adequação das medições atribuídas aos marcos homólogos tornam as coordenadas calculadas vulneráveis à variáveis do vôo que afetam tanto as observações na faixa à esquerda quanto à direita.

Tabela 4.6 – Erros médios quadráticos apurados com a distribuição aleatória de marcos testes

	Erro médio quadrático (cm)							
	Distribuição aleatória		Trecho superior		Trecho inferior		Trecho central	
	SOG	COG	SOG	COG	SOG	COG	SOG	COG
Xa ₃₆	21,21	21,31	30,49	30,94	19,68	19,68	35,23	34,81
Xa ₃₄	21,44	21,31	30,62	30,94	21,36	19,68	35,37	34,97
Xa ₃₀	21,85	22,70	32,04	30,80	18,21	22,40	34,23	32,87
Xa ₃₆ – modelo isogonal praticado com parâmetros internos estimados de 36 observações.								
Xa ₃₄ – modelo isogonal praticado com parâmetros internos estimados de 34 observações.								
Xa ₃₀ – modelo isogonal praticado com parâmetros internos estimados de 30 observações.								
SOG - Sem Ondulação Geoidal								
COG - com ondulação geoidal								

4.2.5 Análise dos resíduos de observações submetidas ao ajustamento – selecionados na zona de sobreposição lateral

A pesquisa avaliou a presença de resíduos nas regiões distintas do bloco de faixas realizados pelo sensor laser. São apontados mecanismos de estimativa de parâmetros, técnicas de validação e análise de resultados. Além disso, foi estabelecida uma premissa - em todas as fases contou com uma referência de aferição, no caso, as medições de campo realizadas com receptor GPS.

Uma avaliação do desempenho do modelo matemático dedicado a corrigir discrepâncias residentes na zona de sobreposição lateral exige um pouco mais de atenção. O capítulo três detalhou um critério de correção de distorções que afeta a toda a extensão do bloco e, inclusive, foram calculados analiticamente a disposição de marcos que ocupam as zonas comuns a duas faixas, conforme ilustra a figura 77. Porém, os recursos de validação encerram nas respectivas localidades que foram aferidos com o receptor GPS.

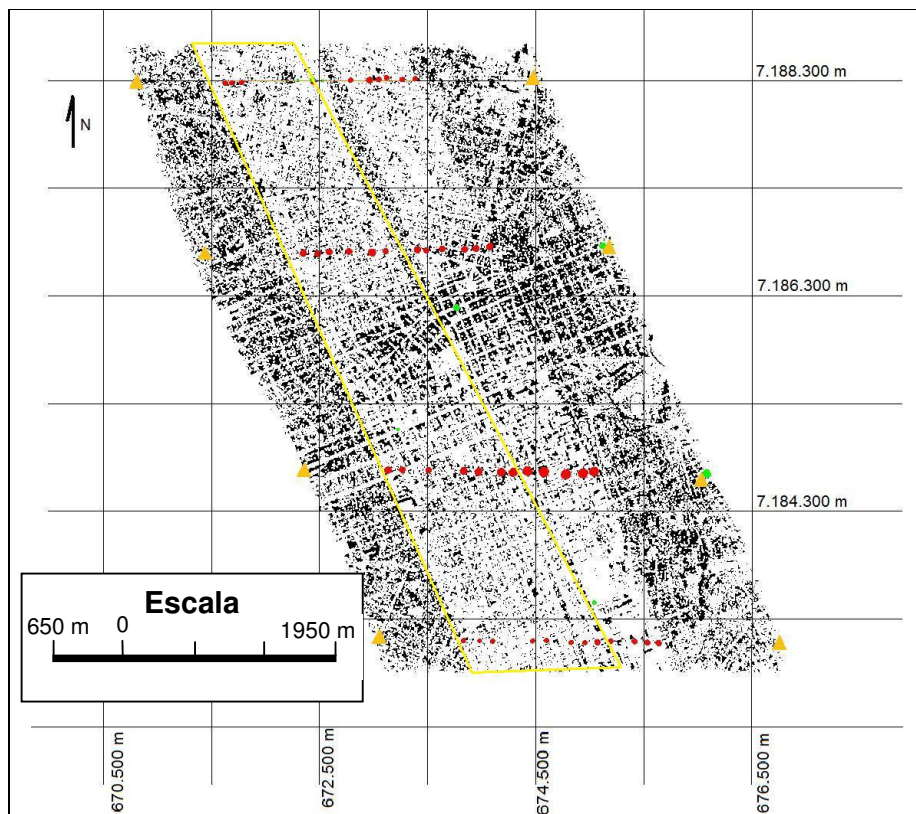


Fig. 77 – Zona de sobreposição lateral entre a faixa 1 e faixa 2

Não é sabido o local exato da ocorrência de discrepância vertical ao observar a imagem de intensidade, tão logo na extensa listagem do terno de coordenadas cartesianas. O critério estabelecido para avaliar o desempenho do modelo isogonal sem a necessidade de contar com uma referência de aferição foi estabelecer uma nova premissa;

- 1) a discrepância é uma característica que se manifesta nas zonas de sobreposição lateral. É causada por falhas operacionais do sensor e se torna mais severa nas bordas das faixas
- 2) a distorção horizontal nas bordas da faixa atinge 0,20 m de extensão.

A premissa pressupõe que uma observação medida com o sensor ALS sobre a superfície amostrada na borda de uma faixa está inserido num círculo de incerteza de dez centímetros de raio. É importante salientar que LOHMANN & KOCH (1999) compartilham dos mesmos pressupostos.

Como o pressuposto atinge todas as faixas da cobertura aérea foi criada uma condição apropriada para a avaliação das observações contidas nas ZSL. O procedimento é o seguinte; uma rotina de busca foi implementado no MATLAB v. 7.0.4 para selecionar todas as observações de uma faixa que guardem vinte centímetros ou menor distância quando comparados com as coordenadas de observações pertencentes a faixa adjacente. Ao fim do processo, a diferença entre as coordenadas verticais são calculadas e definidas como discrepância vertical.

O modelo isogonal no espaço é submetido à avaliação. Nesta etapa, as coordenadas de observações que repousam sobre a faixa 1 são transformadas segundo os parâmetros internos do modelo isogonal. A seguir, novamente a operação matemática que calculou a discrepância é repetida. O modelo de transformação será aprovado se as coordenadas verticais transformadas tornar as diferenças verticais ou discrepâncias reduzidas ou nulas.

As duas faixas de varredura um e dois foram submetidas ao processamento e a rotina de busca localizou setenta e nove pontos de observação. A figura 78 mostra a discrepância vertical existente e a figura 79 revela as mudanças que a discrepância vertical sofreu.

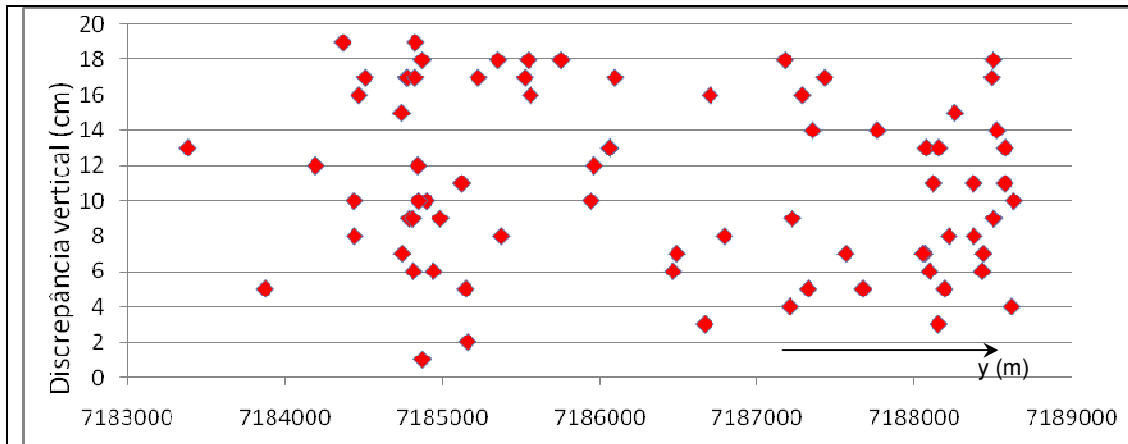


Fig.78 – variação da discrepância vertical antes de ser submetida ao modelo isogonal de transformação

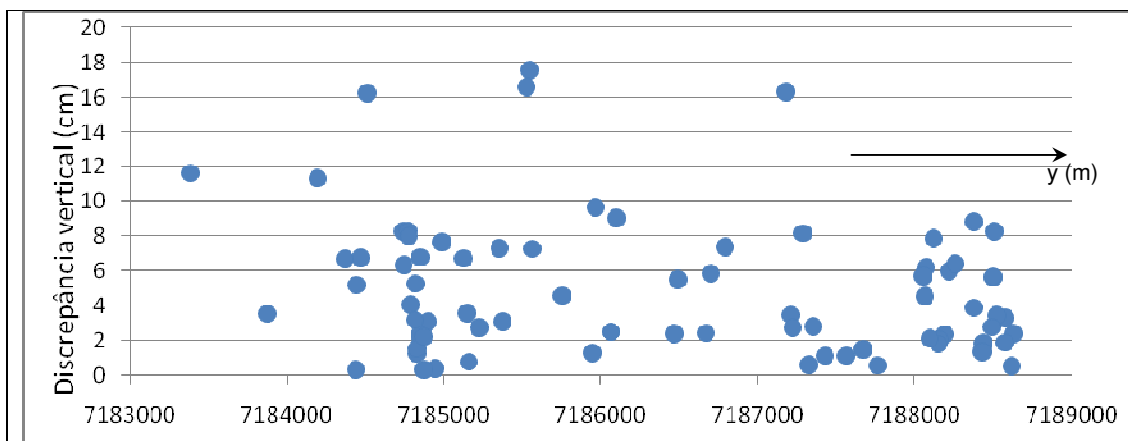


Fig.79 – variação da discrepância vertical após ser submetida ao modelo isogonal de transformação

Os modelos isogonais que contaram com a estimativa de parâmetros com trinta e trinta e seis observações com e sem a ondulação geoidal produziram respostas idênticas em relação a correção da discrepância vertical, porém os parâmetros estimados com trinta e quatro observações somente atingiu sete dentre as setenta e nove observações e por este motivo foi descartado para esta finalidade.

Outro aspecto que merece destaque, ao avaliar a influência da distribuição alinhada dos marcos para a redução de resíduos, em particular, as discrepâncias

verticais ocorre ao observar o histograma das reduções que foram efetivadas, conforme figura 80. As reduções mais acentuadas no histograma apontam para as coordenadas 7188497 e 7187569 m ao norte do bloco sob a influência do alinhamento dos marcos limítrofes 10101 e 10309 e a coordenada 7184831m ao sul sob a influência do alinhamento dos marcos 10105 e 10313.

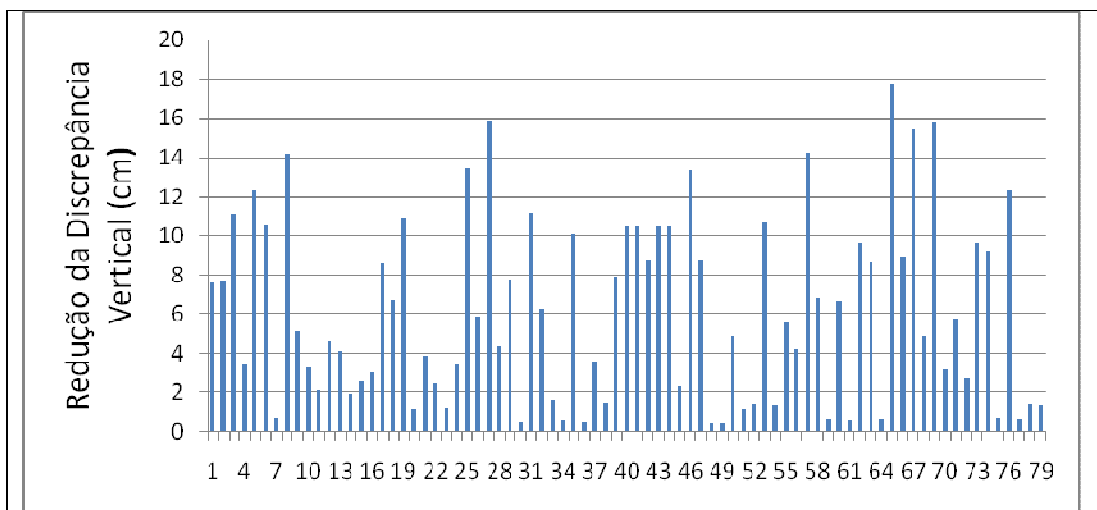


Fig.80 – Redução da discrepância vertical

4.2.6 Análise dos resíduos das medições realizadas com o receptor GPS

A tabela 4.7 expressa o as coordenadas decorrente das observações colhidas com o receptor GPS na área do projeto. As diferenças entre os marcos retratam em parte as limitações decorrentes dos erros de observação nos resultados do posicionamento, no método RTK, devido a transmissão das correções diferenciais nas zonas densificadas de prédios elevados e próximos mas, sobretudo, pelo aspecto longo da campanha que durou próximo de um ano. A figura 81 e 82 reproduz sequencialmente conforme registro na tabela 4.6 e 4.7 a qualidade da aferição.

Tabela 4.6 – Relação das coordenadas medidas no campo com o receptor GPS

No.	Ponto	x (m)	y (m)	z_Elip (m)
1	10106	673260,2440	7184682,0419	929,2142
2	10114W	673827,8451	7184677,6183	912,9181
3	10214E	674575,7990	7184657,5556	897,9203
4	10222	674936,2975	7184659,7650	895,4096
5	10214W	674292,0282	7184665,1483	902,0939
6	10116W	674479,1615	7183091,0329	921,3821
7	10108W	673825,8346	7183102,2857	917,3799
8	10216	675074,0185	7183086,6787	919,3262
9	10224E	675637,7972	7183081,9027	889,8375
10	TESTE01	675408,6927	7183590,8636	895,1393
11	TESTE02	674583,3231	7185182,1046	898,6634
12	TESTE03	674193,5541	7184176,6439	904,4702
13	TESTE04	673540,9993	7184970,7979	922,3349
14	TESTE05	674073,9402	7183507,6828	922,9506
15	10309	674471,5672	7188325,9209	924,2446
16	10218E	673379,2041	7188322,5957	915,5165
17	10210	672961,4641	7188313,6996	920,5180
18	10110	672437,6598	7188312,3121	930,2207
19	10102W	673260,2440	7184682,0419	929,2142
20	TESTE06	673827,8451	7184677,6183	912,9181

z_Elip – altitude geométrica

Tabela 4.7 – Relação das coordenadas medidas no campo com o receptor GPS

No.	Ponto	x (m)	y (m)	z_Elip (m)
21	TESTE07	671621,9523	7188274,8398	966,6559
22	10315	672222,4500	7187722,9696	950,7506
23	10220W	673066,7971	7187744,5152	936,9342
24	10212W	676764,0120	7183058,1100	924,9720
25	10112W	673858,2912	7186731,4749	915,1908
26	10104	673399,0997	7186726,2531	939,0869
27	TESTE08	672771,8762	7186711,4906	920,1069
28	TESTE09	672482,8190	7186690,6903	919,0687
29	TESTE10	672651,3291	7186335,4673	911,7625
30	10107	673542,1428	7186408,4736	910,3748
31	10103	673575,7664	7187421,0449	930,0755
32	10101	673053,0680	7183116,0870	908,8040
33	10311	671414,5950	7186682,8110	936,3160
34	10105	670817,9880	7188263,4540	916,4160
35	10313	675195,2470	7186751,3550	915,5970

z_Elip – altitude geométrica

Os histogramas devem ser avaliados sob dois aspectos; o primeiro deve tratar da planimetria ao observar os resíduos que afetam os componentes posicionais x e y. O segundo aspecto, mais importante sob o ponto de vista do foco da pesquisa, a altimetria representada pela coordenada z.

Quanto ao aspecto planimétrico, as medições atribuídas ao marco 10105 causa estranheza, sobretudo, pelo desvio-padrão próximo de nove centímetros na ordenada x, pois o erro nominal previsto para o método estático com o LEICA 1200, aparelho usado para este empreendimento, é 5mm + 0,5 ppm. Os seis marcos – estação estão afastados da localidade aonde se encontram os marcos para medição aproximadamente 2,5 km. Logo, o erro nominal esperado é de aproximadamente 6 mm. Naturalmente, são incorporados ao nominal outros erros de natureza operacional, pois ao observar a flutuação dos demais trinta e quatro marcos é visível a presença de outros problemas que a filtragem do software instalado no equipamento não foi capaz de saná-lo.

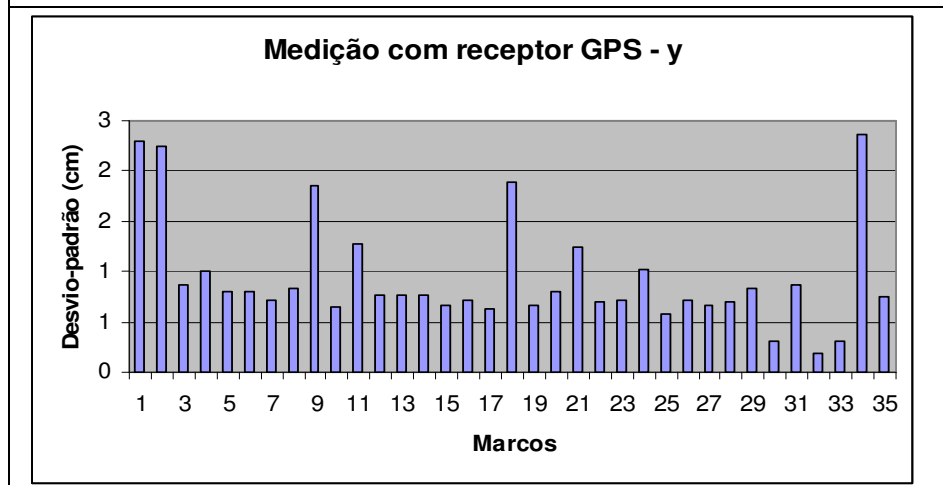
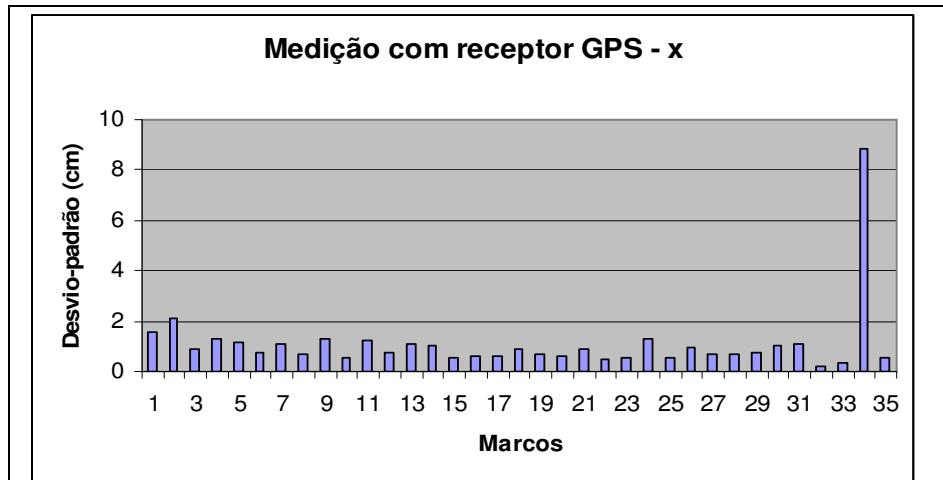


Fig. 81 – Registro do desvio-padrão medido com o receptor GPS para a planimetria

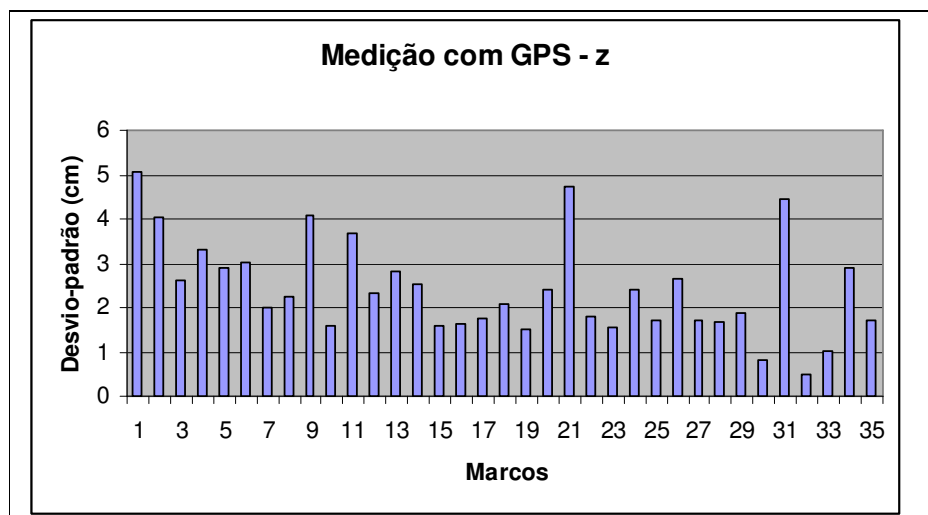


Fig. 82 – Registro do desvio-padrão medido com o receptor GPS para a altimetria

Quanto à altimetria são destaques os marcos 10106, marco teste 7 e o marco 10103. Novamente, é importante lembrar que o erro nominal para o método estático para a altimetria prevista é 10mm + 0,5 mm. Cabe ressaltar que o desvio-padrão é muito acentuado se considerar, segundo histograma produzido por LOHMANN & KOCH (1999) na figura 83, a prevalência de vinte centímetros corresponde às diferenças de alturas aferidas nas ZSL, importante aspecto da pesquisa. O desvio-padrão representa, portanto, vinte e cinco por cento da fonte total de incerteza, porém pesa o fato de estarem afastados e o conjunto de outros marcos medidos acaba, por absorvendo a indeterminação no processo de ajustamento.

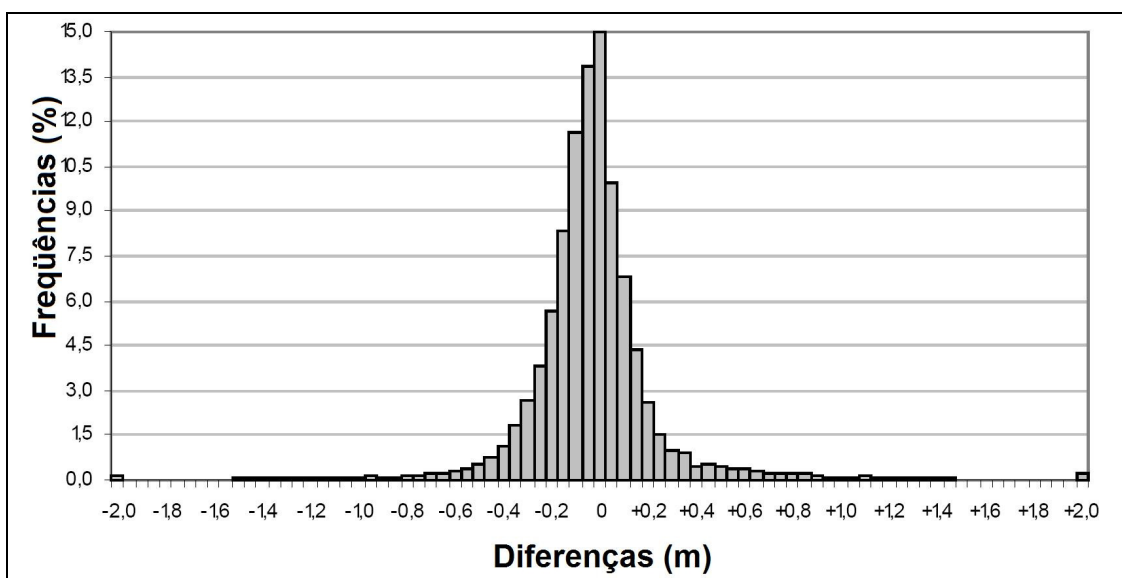


Fig. 83 – Histograma das diferenças de altura nas bordas das faixas
Fonte: LOHMANN & KOCH (1999)

4.3 ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR DO ALS

Há, notadamente, dificuldade de obter-se as informações sobre o funcionamento e processamento interno do ALS. Na maioria dos casos se deve ao caráter restritivo imposto pelos fornecedores que limitam o acesso às informações. Porém, LOHMAN (1999) sustenta uma alternativa para contornar o problema. Foi idealizado um modelo matemático que estima os parâmetros internos de funcionamento do sensor laser. A metodologia é análoga ao procedimento realizado para estimar os parâmetros internos da câmara aérea ao usar o conceito de resecção espacial. A diferença está na equação de colinearidade substituída pelo modelo matemático idealizado por LOHMAN (1999) e, sobretudo, a natureza do processo de medição, enquanto a câmara aérea é um sensor passivo o ALS é um sensor que depende da emissão de pulsos para realização de operações.

A tabela 4.9 expressa as coordenadas do sensor laser em dois momentos. Inicialmente, registra as coordenadas residentes sobre a região central das faixas de vôo definidas como espaço - scanner e, em seguida, as mesmas coordenadas submetidas aos parâmetros de ajustamento estimados para o bloco, intituladas coordenadas do espaço - objeto.

Tabela 4.9 - Marcos _Apoio para a estimativa dos parâmetros internos do ALS

Marcos apoio	Coordenada do espaço-scanner		
	x(m)	y(m)	z(m)
marco_apoio_parc01	672.637,280	7.184.033,920	918,840
marco_apoio_parc02	673.649,550	7.183.848,160	912,900
marco_apoio_parc03	672.706,560	7.187.740,180	926,080
marco_apoio_parc04	673.869,390	7.185.104,750	908,560
marco_apoio_parc05	674.684,740	7.185.818,560	891,340
marco_apoio_parc06	675.655,770	7.183.584,620	885,560
Marcos apoio	Coordenadas de espaço-objeto		
	x(m)	y(m)	z(m)
marco_apoio_parc01	672.637,280	7.184.033,700	919,218
marco_apoio_parc02	673.649,550	7.183.847,900	913,197
marco_apoio_parc03	672.706,560	7.187.739,900	925,995
marco_apoio_parc04	673.869,390	7.185.104,500	908,673
marco_apoio_parc05	674.684,750	7.185.818,300	891,263
marco_apoio_parc06	675.655,780	7.183.584,400	885,664

O ajustamento com o método paramétrico é praticado com o modelo matemático de LOHMANN (1999). A rotina de cálculo ao final de 14 iterações aponta os valores dos parâmetros de calibração interna do ALS. São quinze parâmetros ao todo, sendo doze atribuídos ao movimento de rotação do sensor no momento de emissão do pulso e três parâmetros de translação. A tabela 4.10 reúne as informações finais do cálculo.

Tabela 4.10 – Indicadores do ajustamento

Parâmetros	Xa (m)	Traço MVCXA	Desvio-padrão
a1	2,438E-001	2,599E-011	5,098E-006
a2	-1,219E-001	7,921E-018	2,814E-009
a3	1,570E+002	6,559E-010	2,561E-005
a4	6,716E+005	3,590E-017	5,991E-009
a5	-3,132E+000	1,648E-006	1,284E-003
a6	-1,131E-001	1,787E-015	4,228E-008
a7	-2,367E+002	5,097E-015	7,139E-008
a8	7,188E+006	5,527E-024	2,351E-012
a9	8,419E-005	3,292E-010	1,814E-005
a10	-5,570E-002	5,219E-003	7,224E-002
a11	3,718E-006	2,885E-012	1,698E-006
a12	-2,502E-003	4,560E-005	6,753E-003
a13	1,219E-003	5,833E-024	2,415E-012
a14	-1,689E+000	3,548E-025	5,957E-013
a15	9,665E+002	2,706E-029	5,202E-015

Traço MVCXA(m) - traço da matriz de variância-covariância

Xa (m) - valores ajustados dos parâmetros

O modelo proposto por LOHMAN (1999) apresenta aspectos que suscitam um breve esclarecimento;

- 1) o perfilamento realizado pelo sensor sobre o centro da faixa de vôo é o principal argumento para a obtenção das medições dos parâmetros internos do ALS, pois o canhão de emissão/recepção do sensor está voltado para o nadir e, conseqüentemente, a leitura da distância é coincidente, em princípio, com a componente vertical do sensor.
- 2) outro aspecto importante diz respeito às coordenadas posicionais atribuídas ao sensor, são obrigatoriamente coincidentes com àquelas medidas sobre os pontos amostrados no espaço-objeto. Entretanto, a rotina concebida para a obtenção dos cálculos trouxe resultados que surpreenderam;

a reprodução do algoritmo *equação geral de funcionamento do ALS*, expressão 4.2, busca chamar atenção para a coluna dedicada ao espaço-scanner. A publicação de LOHMANN (1999) registra uma informação de difícil operação matemática, pois sugere que os valores atribuídos às coordenadas x e y sejam nulos. Se assim o fosse traria uma série de precedentes indesejáveis. Uma quantidade de parâmetros que respondem pela matriz de rotação dos componentes do ALS seriam subtraídos do cálculo e a matriz das derivadas parciais (A) se tornaria uma matriz esparsa.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{ALS}^{Esp.Objeto} = \begin{pmatrix} xO \\ yO \\ zO \end{pmatrix}_{GPS} + \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & 0 \\ a_3 & a_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_5 & 0 & a_6 \\ 0 & 1 & 0 \\ a_7 & 0 & a_8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_9 & a_{10} \\ 0 & a_{11} & a_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ hm \end{pmatrix}_{ALS}^{Esp.Scanner} - \left(\begin{pmatrix} x_{user-RP} \\ y_{user-RP} \\ z_{user-RP} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{RP-GPS} \\ y_{RP-GPS} \\ z_{RP-GPS} \end{pmatrix} \right) \quad 4.2$$

- 3) se considerar comuns as coordenadas posicionais no espaço-scanner e espaço-objeto restará decidir sobre a componente vertical. Ao admitir para z o valor igual a altitude média acrescido da altitude de vôo a rotina realizou ajustes impregnado de resíduos severos na variância, por outro lado se considerar apenas a altitude revelou um aspecto singular;
- 4) por último, os parâmetros a_{13} e a_{14} foram incorporados à rotina de cálculo para reproduzir as coordenadas atribuídas ao centro de fase da antena do GPS, no entanto estão aparentemente embaralhados com os parâmetros a_4 e a_8 sem um motivo aparente.

BEHAN et al. (2000), KRAUS (2002), VOSELMAN & MAAS (1999) e MAAS (2002), são alguns exemplos da produção científica que se valem de arquivos brutos ou processados do aerolevanteamento realizado pelo ALS para a realização de projetos acadêmicos. Porém, a proposta idealizada por LOHMANN (1999) tem o mérito de tentar atingir o principal componente restritivo ao desenvolvimento de novas pesquisas científicas – o funcionamento interno do equipamento.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 EM RELAÇÃO ÀS HIPÓTESES FORMULADAS

5.1.1 Hipótese Principal

“A discrepância vertical é uma distorção que afeta as bordas das faixas durante o aerolevanteamento, de um modo geral, realizado com o sensor laser. A pesquisa sustenta que a correção da discrepância das observações que depositam sobre a superfície física residente no bloco de faixas pode ser reduzido se for submetido ao processo de ajustamento simultâneo do bloco de faixas, sobretudo, se levar em conta o histórico de resultados decorrente do ajustamento submetido ao bloco de aerofotos – a aerotriangulação.”

Em relação à hipótese geral não foram promovidos métodos capazes de dimensionar categoricamente a existência de discrepâncias verticais nas faces comuns entre duas faixas adjacentes. Entretanto, BEHAN et al. (2000), SCHENK (2001), KATZENBEISSER (2003), MAAS (2001) para citar alguns exemplos, sustentam que há distorções horizontais e verticais nas zonas de sobreposição lateral. A pesquisa, por sua vez, realizou medições no círculo de incertezas de 10 cm de raio que afetam a todas as observações residentes nas bordas das faixas. E, constatou diferenças verticais que assemelham às características da discrepância vertical. Por outro lado, as observações residentes nas zonas de sobreposição submetidas aos parâmetros de transformação do modelo matemático praticado para o ajustamento simultâneo do bloco produziu uma redução das diferenças verticais.

Além disso, foi percebido que as reduções mais acentuadas ocorreram nas proximidades dos quatro alinhamentos dispostos no bloco seja no trecho superior seja no trecho inferior. O posicionamento de marcos nas regiões de sobreposição aparenta ser uma decisão acertada, se considerar os resultados obtidos. A figura 84 ilustra a direção dos alinhamentos e o tamanho da redução do resíduo após o trecho ser submetido ao modelo isogonal.

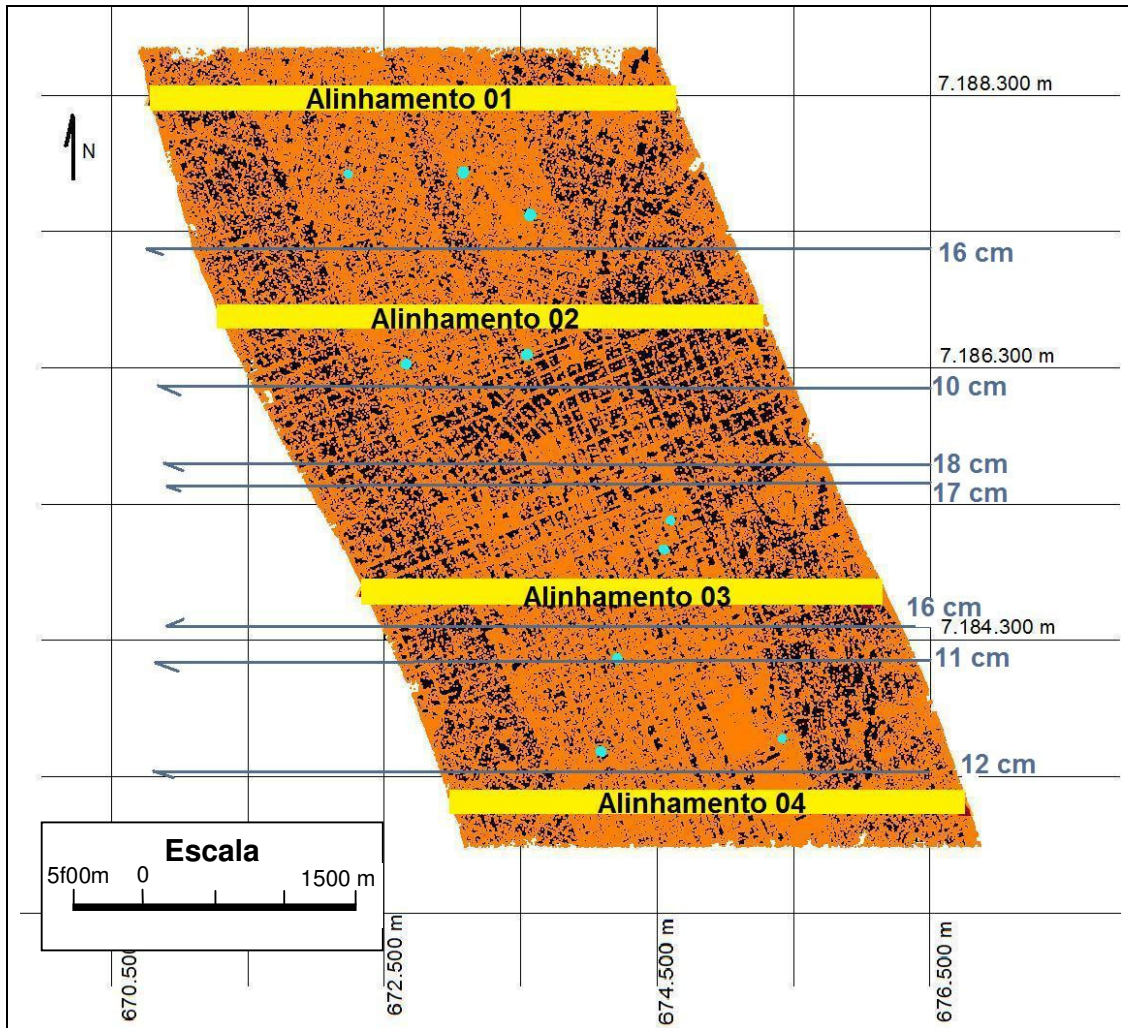


Fig. 84 – Mapa dos alinhamentos

5.1.2 Hipóteses Secundárias

a) "As observações medidas e as correspondentes observações ajustadas no centro da faixa de vôo com o ALS voltado para o nadir permitem a estimativa dos parâmetros de orientação interior do sensor;"

Embora a operação matemática tenha alcançado êxito, a interpretação dos resultados atribuídos aos parâmetros não refletiu corretamente o funcionamento do sensor ALS. Principalmente, se realizar a transformação inversa, as coordenadas calculadas são diferentes das originais.

b) *“O modelo polinomial do terceiro grau no espaço é uma alternativa ao modelo isogonal para realização do ajustamento simultâneo do bloco”;*

O modelo polinomial não é linear e o processo iterativo torna-se fundamental para estimar os parâmetros de transformação do olinômio mas, durante esta fase houve divergência e a hipótese não pode ser avaliada.

c) *“A estimativa do modelo da ondulação geoidal não é imprescindível para a realização de aerolevantamentos com o sensor laser.”*

É possível afirmar que a hipótese é verdadeira, pois os experimentos que evidenciaram os resíduos com atividades contemplando a influência da ondulação geoidal e sem a influência da mesma, constataram que quanto maior o número de marcos envolvidos no processo de ajustamento menor a influência da ondulação geoidal. Os gráficos das curvas de resíduos com e sem a influência da ondulação ora seguem paralelamente ora experimentam traçados idênticos.

5.2 EM RELAÇÃO AOS OBJETIVOS PROPOSTOS

5.2.1 Metodologia para o ajustamento das observações

A pesquisa concebeu uma metodologia que promoveu a distribuição espacial de marcos sobre a área de projeto de 36 km² de extensão. As duas fases preliminares que antecederam ao processo de ajustamento, sob o ponto de vista operacional, foram concluídas com êxito. A primeira fase foi realizar uma seleção das faixas que atenderiam ao projeto e em segundo lugar uma filtragem do arquivo de pontos de modo que fossem avaliados apenas aqueles posicionados sobre a superfície física. Em seguida, as medidas dos marcos foram realizadas em duas etapas; a primeira foi obtida de uma interpolação envolvendo medições de duas faixas de vôo e a segunda consistiu no rastreamento de satélites artificiais com desvio - padrão nas coordenadas, E, N e h, respectivamente, 0,0175; 0,011 e 0,0265 m. A avaliação do modelo isogonal sobre os marcos alinhados estrategicamente registrou redução de erro médio quadrático de 26,19 para 15,39 cm no âmbito das medições horizontal e vertical enquanto que no aspecto vertical, passou de 35,12 para 23,29 cm. As medições se estenderam por trechos e regiões segregadas do bloco com o objetivo de avaliar separadamente o

desempenho dos parâmetros estimados. São marcos com a distribuição aleatória, marcos no trecho superior, inferior e na região central, os resíduos verticais oscilaram entre 35,37 cm a 18,21 cm. Um importante artifício foi utilizado para estimar os parâmetros do modelo isogonal, as coordenadas posicionais dos marcos homólogos foram subtraídas, apenas os marcos limítrofes contribuíram com o terno de coordenadas. Esta medida garantiu que a coordenada posicional do marco localizado na ZSL não contribuisse com a componente vertical no processo de cálculo.

Além disso, um procedimento técnico tornou possível a influência dos parâmetros de ajustamento sobre a zona de sobreposição lateral reduzindo 6 cm em média a discrepância vertical. Cabe destacar que a região com resíduos mais acentuados se localizam no centro do bloco e os menores no trecho inferior.

Logo, a concepção original de estabelecer uma metodologia para minimizar a influência de resíduos no bloco de faixas do laser foi alcançado, pois os valores estimados para os parâmetros matemáticos do modelo isogonal foram atingidos, os ensaios com os seis arranjos foram testados nos diversos locais do bloco e houve, conforme a proposta inicial, redução da influência dos resíduos em toda a extensão do bloco.

BRANDALIZE (2004) ressalta um aspecto importante no processamento dos dados ALS. Apesar dos avanços alcançados nesta área nos últimos anos, não se tem conhecimento dos efeitos que os diferentes algoritmos de filtragem, classificação e geração de modelos digitais 3D podem ter sobre a nuvem de pontos ALS coletada. Percebe-se, no entanto, que a eficácia de tais algoritmos está diretamente relacionada a determinados parâmetros do sistema empregado, como a densidade de pontos, o registro de múltiplos retornos e o registro da intensidade.

É importante destacar que o sucesso da metodologia está diretamente ligado à qualidade dos arquivos fornecidos pelo detentor dos seus direitos e supõe-se que as leituras estão isentas de erros grosseiros e sistemáticos.

5.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

5.3.1 Em relação aos indicadores estatísticos do ajustamento

Novamente é importante frisar a importância da realização do ajustamento do bloco e os conceitos abordados. A técnica de ajustar presta para extrair de um volume de medições, a posição mais correta sob o ponto de vista da influência de imprecisões que possam contaminar a medição original. Para tal, fez-se uma diversidade de combinações e arranjos em busca de uma estimativa mais acertada. Cabe destacar outro aspecto, o termo ajustamento deve atentar para a praticidade e eficiência do modelo matemático atender ao posicionamento dos marcos ou medições envolvidos, mas em particular, a pesquisa procura mediar uma situação que os parâmetros estimados para o modelo de transformação matemática alcance as nuances e variâncias do relevo em todo o bloco. Quer dizer, a afinidade do parâmetro do modelo não poderá se limitar em atingir um índice ótimo de adequação probabilístico para um número definido de observações, mas atender ao bloco, ainda que os resíduos possam trazer mais incertezas do que um elenco de parâmetros alternativos de maior precisão. Isto se deve ao fato da precisão alcançada para determinadas combinações ser rígida, pois as flutuações enfrentadas em outras localidades do bloco extrapolam a capacidade do modelo adequar as observações e, conseqüentemente, produz resultados insatisfatórios.

As avaliações que demandaram um volume expressivo de cálculos para estimar os parâmetros de transformação do modelo isogonal pode ser concluída com a eleição de uma dentre as seis alternativas estudadas. O ajustamento dedicado à estimativa dos parâmetros do modelo apontaram o menor resíduo para a combinação que contemplava trinta observações e usava a correção da ondulação geoidal às medições de campo. Porém, para o ajustamento simultâneo do bloco quem ofereceu a melhor aderência à superfície do relevo e obteve o melhor desempenho foi a opção de trinta observações sem a correção geoidal. A equação 5.2 está completa com os parâmetros, ao lado esquerdo a coluna reserva um lugar para as coordenadas transformadas, ao outro lado as coordenadas originais. Logo, segundo todas as avaliações, arranjos e cálculos

realizados é a melhor alternativa para o propósito da pesquisa, naturalmente, restrita à área do projeto.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}^{Esp._objeto} = \begin{pmatrix} 9,999e-001 & 3,760e-008 & -9,385e-005 \\ 1,717e-007 & 1,000 & -6,763e-005 \\ -9,486e-005 & -1,2567e-004 & 1,001 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}^{Esp._scanner} + \begin{pmatrix} 1,709e-003 \\ -1,731 \\ 9,656e+002 \end{pmatrix} \quad 5.2$$

A metodologia adotada no projeto de pesquisa estabeleceu vínculo entre as coordenadas interpoladas analiticamente e as medidas rastreadas com receptor GPS. Ao submeter todos os trinta marcos ao modelo isogonal a pesquisa conseguiu detectar que as diferenças verticais influenciam no resíduo do ajustamento. O histograma na figura 85 ilustra o problema enfrentado.

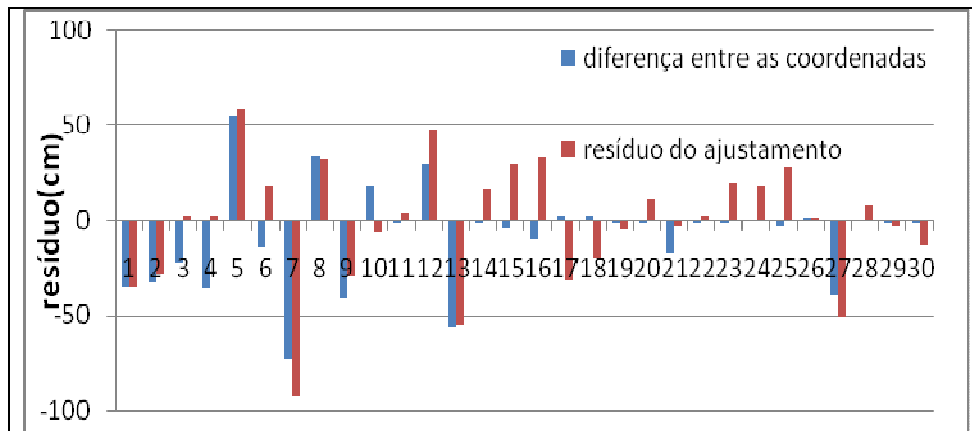


Fig. 85 – registro da diferença entre resíduos

Os números no histograma correspondente a 5, 7, 13 e 27 são os marcos 10112W, 10210, 10101 e marco teste 7, respectivamente, e revelam um resíduo mais pronunciado do que os demais marcos. A média da distância entre o valor interpolado matematicamente e o valor medido com o GPS é aproximadamente trinta centímetros. É um aspecto negativo que pode ser evitado. Diante das dificuldades de medição e locação de marcos na localidade, uma estratégia simples é antecipar a atividade terrestre mediante um planejamento para dispor os marcos estrategicamente no bloco.

A tabela 5.1 revela a diferença entre os resíduos que contaminam a componente vertical e a dimensão infinitamente menor da componente posicional,

representado pelas coordenadas x e y. A interpretação dos resíduos não deixa dúvida sobre o efeito que o modelo de transformação exerce sobre as distorções de natureza posicional.

Tabela 5.1 – Resíduos do ajustamento

Arranjo de 34 observações				Arranjo de 30 observações			
marco	x(cm)	y(cm)	z(cm)	marco	x(cm)	y(cm)	z(cm)
104			-18,52	104			-27,14
106			3,99	106			2,17
108W			1,03	108W			2,18
116W			12,72	116W			18,18
212W			34,20	212W			33,13
214W			-30,80	214W			-29,39
218E			-1,57	218E			-6,14
222			-0,51	222			4,05
103	-0,32	5,97	29,97	103	0,00	0,00	16,89
105	-0,13	3,33	37,28	105	0,00	0,00	30,39
107	-1,82	3,99	38,23	107	-0,01	-0,01	33,95
309	0,96	0,87	-34,09	309	0,01	0,01	-31,33
311	-1,72	-3,24	-26,46	311	-0,02	-0,02	-19,44
313	0,37	-1,31	-15,78	313	-0,04	0,00	-4,31
315	0,71	-8,91	-8,15	315	0,00	0,00	11,21

5.3.2 Em relação à contribuição do ajustamento simultâneo do bloco para a qualidade posicional

VARGAS (2007) discutiu as vantagens que uma filtragem de um elenco de observações amostradas da superfície física realizadas pelo sensor ALS para a qualidade posicional. O filtro, trata de um operador matemático capaz de contemplar características da vegetação e relevo incorporando às observações originais um novo componente que melhora o desempenho do sensor em medir a ordenada vertical. O ajustamento simultâneo não realiza a propriedade de filtrar as observações mas, age segundo o mesmo princípio – melhorar a qualidade posicional das medições. A síntese global do ajustamento está expresso na tabela 5.2

Tabela 5.2 – Síntese do ajustamento simultâneo do bloco

Síntese do ajustamento simultâneo do bloco		
Planimetria	Altimetria	Discrepância vertical
12 ± 6 cm	2 ± 18 cm	6 ± 5 cm

Desta forma, o principal problema proposto pela pesquisa foi solucionado e, como resposta, pode-se afirmar que os resultados do laser scanner aerotransportado quando submetidos ao ajustamento superam às expectativas de precisão. Se levar em consideração o que afirma SLOBODA (2005);

“ Para um levantamento na altura de 1.000 m o desvio-padrão dos dados é de aproximadamente 46 cm para planimetria e 14 cm para altimetria e para um levantamento na altura de 2.000 m o desvio padrão dos dados é de 80 cm para planimetria e 24 cm para altimetria. Esta variação do desvio-padrão na planimetria está vinculada principalmente ao sistema inercial IMU do equipamento que tem uma precisão de $\pm 0,015^\circ$ ”.

5.3.3 Recomendações para pesquisas

Ao final da pesquisa o autor do projeto formou convicção. Os marcos parciais poderiam ser abreviados e a metodologia iniciar com as medidas no campo. É uma medida simples mas poderia render uma redução no custo computacional.

Não obstante, a pesquisa tenha alcançado o objetivo de parametrizar as diferenças entre os referenciais do espaço-escanner e espaço-objeto, há a possibilidade de explorar outras alternativas de modelos e de método. BRETAR et al. (2004) usou a transformada de Hough para o mesmo propósito do ajustamento de faixas. FEI et al. (2008), por sua vez, descreveram uma estratégia de correspondência entre as medições do ALS com aerofotos e faz uma combinação de inserir as medições do LIDAR na equação de colinearidade e, desta feita, experimenta uma aerotriangulação híbrida. A pesquisa voltada para o ajustamento de faixas, ao contemplar modelos matemáticos distintos do que foi investigado, com limites de flutuação relaxados o suficiente para alcançar a convergência, se levar em conta a quantidade de parâmetros e o número de

observações, é uma alternativa para àqueles que desejam romper limites do conhecimento.

Por outro lado, a possibilidade de extrapolar para a tecnologia LIDAR as experiências praticadas para a aerofotogrametria e áreas afins, revela igualmente novas oportunidades. FLURY & GRUBER (2003) sustenta um processo de ajuste baseado na pré-sinalização, conforme ilustra a figura 86. Uma técnica consagrada pela fotogrametria tradicional e estendida para o LIDAR.



Fig. 86 – Refletor para pré-sinalização de aerolevanteamento

Na direção oposta, JACOBSEN (1997) descreve uma metodologia de aerotriangulação sem apoio de campo, ao combinar faixas transversais ao voo.

Certamente, a pesquisa voltada para a modelagem digital de elevação, combinada com as cenas digitais propicia a profusão de novos projetos acadêmicos. A densidade de pontos, a velocidade de processamento e a capacidade de interpretar os fenômenos físicos poderão ser avaliadas na discussão de métodos dedicados à regularização fundiária urbana, principalmente, nas zonas especiais de interesse social, pois, as limitações de sombras, baixo contraste e padrão desconexo atrapalham a percepção de detalhes percebida nas cenas aéreas, porém para a tecnologia do ALS não trata como dificuldade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMANN, F. **Airborne laser scanning: present status and future expectations**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Zurique, v. 54, No. 2-3, p. 64-67, 1999.

AL-BAYARI, O.A.; AL-HANBALI, N. N.; BARBARELLA, M.; NASHWAN, A. **Quality assessment of DTM and orthophoto generated by airborne laser scanning system using automated digital photogrammetry**. ASPRS Annual Convention, Commission III, PCV Symposium, Austria, Setembro, 2002.

ANDRADE, J. B. Fotogrametria. Ed. SBEE. Curitiba, 1998.

AXELSSON, P. **Processing of laser scanner data—algorithms and applications**. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, v. 54, p. 138–147, 1999.

BALTSAVIAS, E. **A comparison between photogrammetry and laser scanning**. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, v.54, p.83-94, 1999.

BEHAN, A.; MAAS, H.-G.; VOSSelman, G. **Steps towards quality improvement of airborne laser scanner data**. Proceedings of the Annual Conference of the Remote Sensing Society, Leicester, v. 26, p. 12-14, 2000.

BOTELHO, M. F.; CENTENO, J. A. S. **Identificação de edificações presentes em imagem de alta resolução utilizando redes neurais e dados do laser scanner**. I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação - SIMGEO, Recife, v. 1, p. 1-9, 2004.

BRANDALIZE, M. C. B. **A Qualidade Cartográfica dos Resultados do Laserscanner Aerotransportado**. 271p. Tese de doutorado em engenharia civil,. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

BRETAR, F.; PIERROT-DESEILLIGNY, M.; ROUX, M. **Estimating intrinsic accuracy of airborne laser data with local 3D-offsets**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Dresden, v. XXXIV, p. 20–26, 2003.

BURMAN, H. **Laser strip adjustment for data calibration and verification**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Áustria, v. 34, part. I3., p. 67-72, 2002.

BURMAN, H. **Adjustment of laser scanner data for correction of orientation errors**. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Amsterdã, v. XXXIII, part. 3A, p. 548 – 555, 2000.

CHARANIYA, A., MANDUCHI, R.; LODHA, S. **Supervised parametric classification of aerial lidar data**. Conference: Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, p. 30–31, 2004.

CENTENO, J. S., SANTOS, D. R. & RIBEIRO, S. R. A. **Aplicação da metodologia de dados orientado a objeto na classificação de uma área urbanizada, utilizando uma imagem digital obtida por meio da tecnologia do laser scanner**. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto INPE, Goiânia, p. 4155-4162. 2005.

CROMBAGHS, M. J. E.; BRÜGELMANN, R.; MIN, E. J. **On the Adjustment of Overlapping Strips of laser altimeter height data**. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdã, v. 33, Part B3, p. 230-237, 2000.

CROMBAGHS, M.; ELBERINK, S. O.; BRÜGELMANN, R.; de Min, E. **Assessing height precision of laser altimetry DEMs**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 34, Part. 3A, p. 85-90, 2002.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema laserscanner: conceitos e princípios de funcionamento**. UFPR, Curitiba, 3ª edição, 2004.

DALMOLIN. Q., SANTOS. D. R., SANTOS JR. R. L. & BÄHR, I. H. **O uso de feições retas extraídas do MDT gerado pelo sistema de varredura laser como apoio para o cálculo da resseção espacial de imagens digitais.** Bol. Ciênc. Geod., Sec. Artigos, Curitiba, v. 11, n. 1, p.117-140, 2005.

DENG, F. A., HUMINJIE. B, GUAN, H. C., **Automatic registration between lidar and digital images**, ISPRS, Commission I, WG-I/3, p. 487 a 490, 2008.

FILIN, S.; VOSSelman, G. **Adjustment of airborne laser altimetry strips.** International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 34, Part B3, p. 285–289, 2004.

FLURY, J., GRUBER, T. **Spectral properties of the sea surface topography - impact of the new gravity field missions.** Geophysical Research Abstracts, EGS-AGU-EUG joint assembly, 2003.

FREIBERGER JUNIOR, J.; KRUEGER, C. P. **Posicionamento RTK empregando diferentes estações de referência.** RBC: Revista Brasileira de Cartografia, v. 52, n. 59/02, p. 137-144, 2007.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações.** Curitiba: Editora da UFPR,. v. 1, 319 p, 1994.

GENRO, R. S. **Determinação de um geóide gravimétrico para o Estado do Paraná utilizando colocação por mínimos quadrados.** 147p. Dissertação (Mestrado em ciências geodésicas), UFPR, Curitiba, 2006.

GOLDANI, D. **Modelo geoidal de alta resolução para o estado do paraná: aplicação da transformada rápida de Fourier – Stokes e do valor do potencial do geóide na definição da superfície de referência vertical.** 143p. Dissertação (Mestrado em ciências geodésicas), UFPR, Curitiba, 2006.

GRODECKI J. AND DIAL, G. **Error propagation in block adjustment of high-resolution satellite images**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 1, n. 69, p. 59-68, 2003.

HABIB, A.; SCHENK, T. **A new approach for matching surfaces from laser scanners and optical sensors**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, v. XXXII, part. 3W, p. 55-61, 1999.

HASEGAWA, J. K.; IMAI, N. N.; CAMARGO, P. **O Sistema de aquisição georeferenciado e de processamento de dados para aplicações na agricultura de precisão**. III COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GODÉSICAS, Curitiba, 2003.

HODGSON, M. E.; JENSEN, J.; RABER, G.; TULLIS, J.; DAVIS, B. A.; THOMPSON, G.; SCHUCKMAN, K. **An evaluation of LIDAR-derived elevation and terrain slope in leaf-off condition**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v.7, n. 71, p.817-823, 2005.

JACOBSEN, K. **Operational block adjustment without control points**, ASPRS Annual Convention 1997, Seattle, v. 2, p. 238 – 244, 1997.

KAGER, H. **The importance of exact geo-referencing of Airborne LIDAR Data**. Natural Resource Management: Going Critical, v. 10, Issue 4; p.1 – 3, 2006.

KAGER, H. **Discrepancies between overlapping laser scanning strips - simultaneous fitting of aerial laser scanner strips**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Turquia, v. XXXV, B/1, p. 555–560, 2004.

KAGER, H. **Simultaneous georeferencing of aerial laser scanner strips**. Öst. Zeit-schrift für Vermessung und Geoinformation, v. 4, n. 91, p. 235 – 242, 2003.

KATZENBEISSER, H. **About the calibration of lidar sensors**. ISPRS Workshop 3-D Reconstruction from Airborne Laser-Scanner and InSAR, workgroupIII/3, Dresden, p. 59 – 64, 2003.

KILIAN, J.; HAALA, N.; ENGLISH, M. **Capture and evaluation of airborne laser scanner data**. Proceedings of the ISPRS Conference, Vienna, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 32, parte 3/B3, p. 383-388, 1996.

KIM, CHANGJAE.; GHANMA, MWAFAQ.; HABIB, A. **Integration of Photogrammetric and LIDAR data for realistic 3D model generation**. First international workshop on mobile geospatial: proceedings of acquisition and spatial reference, Calgary, p.13-21, 2006

KHOURY, J.; WOODS, C. L.; LORENZO, J.; KIERSTEAD, J. **Resolution limits for time-of-flight imaging laser radar**. Optical Pattern Recognition XVI, Proceedings of the SPIE, v. 5816, p. 270-276, 2005.

KORNUS, W. AND RUIZ, A. **Strip adjustment of LiDAR data**. XIXth ISPRS Congress: Commission III, WG III/3, Alemanha, v. 34, part. 3, p. 47–50, 2003.

KRAUS, K., **Principles of airborne laser scanning**, Journal of the Swedish: Society of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 1, p. 53-56, 2002.

KRUEGER, C. P. **Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito marinho**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geociências, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

LH Systems, **LEICA ALS40 Airborne Laser Scanner Specifications technics**, California, U.S.A, Agosto, 2001, 7p

LH Systems, **LEICA ALS40 Airborne Laser Scanner Specifications technics**, California, U.S.A, Agosto, 2001, 7p

LICHTI, D. D., STEWART, M. P., TSAKIRI, M. & SNOW, A. J., **Benchmark Tests on a Three-dimensional Laser Scanning System**. Geomatics Research Australasia, n.72, p. 1-23, 2000.

LIMA, S. R. S. de. **Integração GPS/INS utilizando sensores inerciais baseados em sistemas microeletromecânicos (MEMS)**. 287p. Dissertação (Doutorado em Ciências Geodésicas), UFPR, Curitiba, 2005.

LOBIANCO, M. C. B. **Determinação das Alturas do Geóide no Brasil**. 167p. Dissertação (Doutorado em engenharia de transportes), Escola Politécnica/USP São Paulo, 2005

LOHMANN, P. & KOCH, A. **Quality Assessment of Laser-Scanner-Data**. Proceedings of ISPRS workshop "Sensors and Mapping from Space 1999", v. 9, CD, 1999.

LOHMANN P, KOCH, A., SCHAEFFER, M. **Approaches to the Filtering of Laser Scanner Data(A)**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing(C), Amsterdã, v. 33, p. 540-547, 2000.

MAAS, H. -G. **Least-Squares Matching with Airborne Laserscanning Data in a TIN Structure**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 33, part 3A, p. 548-555, 2000.

MAAS, H. -G. **On the use of pulse reflectance data for laserscanner strip adjustment**. ASPRS Annual Convention, Commission III, Working Group 3, v. XXXIV, part. 3/W4, Annapolis, 2001.

MAAS, H.-G. **Methods for measuring height and planimetry discrepancies in airborne laserscanner data**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 68, n. 9, p. 933-940, 2002.

MAROTTA, G. S.; SILVA, A. S.; GONÇALVES, R. P.; ANDRADE, R. J. O; ASSIS, L. C. **Estimativa da precisão posicional utilizando ajustamento de**

observações clássico e livre. Congresso Brasileiro de Cartografia I Congresso Brasileiro de Geoprocessamento, Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Cartografia I Congresso Brasileiro de Geoprocessamento, Rio de Janeiro, p. 306-313, 2007

MARTINS. M. A. R., MULLER, M., FELIX, D. & KERSTING, A. B. **Diretrizes para calibração do sensor ativo laser scanner aerotransportado–LSA.** Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC. XII Jornadas de Jovens Pesquisadores da AUGM, Curitiba, 2004.

MIQUELES, M.; CENTENO, J. A. S. **Extração de edificações em ambientes urbanos utilizando imagem de Alta resolução e dados do Laser Scanner.** Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, 2005.

MITISHITA. E, OLIVAS. M. **Calibração de câmaras aerofotogramétricas a partir de aerofotos digitalizadas.** Bol. Ciênc. Geod., Curitiba, v. 7, n. 1, p.64-76, 2001.

MITISHITA, E. A.; PREOSCK, R. E.; KIRCHNER, F. F. **Transformação de entidades naturais e artificiais para o sistema cartográfico obtidas a partir de imagens digitais de satélites.** V Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, v. 2. p. 497-504, 1988.

MORIN, K. **Calibration of airborne laser scanners.** 125 p. Dissertação (Mestrado em engenharia), Department of Geomatics Engineering, University of Calgary. 2002.

MORIN, K; EL-SHEIMY, N. **Post-mission adjustment methods of airborne laser scanning data.** Proceedings of FIG International Congress, Washington, v. 22, 12 p., 2002.

Mosaic Mapping Systems Inc. **Specifications technics: A White Paper on LIDAR Mapping,** Ottawa, 16 p. 2001.

MOYANO, C. F.; SALGADO, R. S. **Soluções Ajustadas do FPO Via Modelo Parametrizado**. SBA. Sociedade Brasileira de Automática, v. 17, p. 2, 2006.

MOSTAFA, M. M. R.; K. P, SCHWARZ. **A Multi-Sensor System for Airborne Image Capture and Georeferencing**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 12, n.66, 1417-1423, 2000.

NEWBY, S.; MRSTIK, P. **LIDAR on the level in Afghanistan**. GPS World Magazine, p. 1-5, 2005.

OPTECH Inc. **OPTECH ALTM 2025 Specifications Technics**. Toronto, dez. 2000. 1p.

PFEIFER, N. **Airborne Laser Scanning Strip. Adjustment And Automation Of Tie Surface Measurement**. Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 11, No. 1, p. 03-22, 2005.

RIEGL - Laser Measurement Systems, **Airborne laser scanner LMS-Q560 specifications technics**, Horn, 6 p. 2008.

RIES, C.; KAGER, H.; STADLER, P. **High-quality geo-referencing of GPS/IMU-supported multi-spectral airborne scanner data – experiences and results**. IAPRS, v. XXXIV, part. 3, Graz, p. 222–226, 2002.

RODRIGUES, M. **Geoprocessamento**. 347p. Dissertação (Tese de livre docência), Escola Politécnica/USP, São Paulo, 1987.

ROTTESTEINER, F., KAGER, H., BRIESE, C. & KRAUS, K. **Lidar activities at the viennese institute of photogrammetry and remote sensing**. Institute of Phogrammetry and Remote Sensing, 17 p, 2002.

ROTTESTEINER, F.; BRIESE, C. **A New Method For Building Extraction In Urban Areas From High-Resolution Lidar Data**. ASPRS Annual Convention, Commission III, WG III/3, Austria, p. A-295, 2004.

SANHUEZA, J. A. F. **Extração Semi-Automática de Feições Planas e Cálculo de Entidades Pontuais a Partir dos Dados Lidar para o apoio fotogramétrico.** Curitiba, 97p. Dissertação (mestrado em Ciências Geodésicas), Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2007.

SCHENK, T., **Modeling and analyzing systematic errors in Airborne Laser Scanners.** Technical Notes in Photogrammetry, n. 19, p. 1-46, 2001.

SILVA, A. S, **Optimisation of surveying monitoring networks.** 237p. Dissertação (Doutorado em engenharia cartográfica), Institute Of Engineering Surveying And Space Geodesy, 1997

SILVA, A. L.; ROMÃO, V. M. C.; SILVA, T. F.; SILVA, A. S. **Normalidade e correlação das observações GPS.** I Simposio de Ciencias Geodesicas e Tecnologias da GeoInformação, CD, 2004

SLOBODA, L. **A Proposta metodológica a partir de dados oriundos do Sistema Laser Scanner.** 109p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

TEMBA, P.; PHILIPS, J. **Análise da propagação de covariância na zona de sobreposição lateral de faixas de vôo.** Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis/SC, INPE, p. 3689-3691, 2007.

TORRES, J. M. C. & HEMERLY, E. M. **Caracterização de sensor inercial aplicação em barco autônomo.** VIII Encontro de iniciação científica e pós-graduação do ITA, São José dos Campos/SP, p. 157-163, 2002.

VARGAS, R. M. A. **Avaliação dos dados laser scanner para determinar modelos de terreno em áreas cobertas por floresta ombrófila densa alterada na amazônia.** 178p. Dissertação (Doutorado em engenharia civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

VOSSelman, G.; MAAS, H. G. **Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data.** ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, v. 54: p. 153–163, 1999.

WEHR, A., LOHR, U. **Airborne laser scanning-an introduction and overview.** ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, v. 54, p.68–82, 1999.

WU, J.; MA, H.; LI, Q. **Least squares matching with airborne lidar data for strip adjustment.** The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, v. XXXVII, part. 3b, p. 167-172, 2008.

Apêndice

Veja o CD incorporado nesta folha.

ANEXOS

ANEXO 1

Efeito de diferentes fontes de erros na precisão das coordenadas (centímetros)

Erro na coordenada	Altura de vôo(m)	ângulo de varredura β (grau)	erro devido ao movimento da aeronave			erro devido ao ângulo de varredura($\Delta\beta$)	erro devido à distância(ΔR)	erro devido à posição da origem do feixe laser			erro total
			asa($\Delta\omega$)	bico($\Delta\phi$)	deriva($\Delta\kappa$)			Δx_0	Δy_0	Δz_0	
Δx		0			0/0		0/0				22,4/24,5
		-7,5			3,7/2,6		0/0,5				22,7/24,7
	400	-15	-90,0/14,8	20,9/14,8	7,5/5,3	0/9,9	0/-0,9				23,6/25,1
		-30			16,1/11,4		0/-1,8				27,6/27,1
		0			0/0		0/0	8/5,7	0/5,7	0	53,0/58,4
		-7,5			9,2/6,5		0/0,5				53,8/58,8
	1000	-15	0/37,0	52,4/37,0	18,7/13,2	0/24,7	0/-0,9				56,2/59,9
		-30			40,3/28,5		0/-1,8				66,6/65,0
Δy		0			0/0		0/0				26,4/24,5
		-7,5			0/2,6		0,7/0,5				26,4/24,7
	400	-15	-20,90/-14,8	0/14,8	0/5,3	-14/-9,9	1,3/0,9				26,4/25,1
		-30			0/11,4		2,5/1,8				26,4/27,1
		0			0/0		0/0	0/5,7	8/5,7	0	63,5/58,4
		-7,5			0/6,5		0,7/0,5				63,5/58,8
	1000	-15	-52,4/-37,0	0/37,0	0/13,2	-35/-24,7	1,3/0,9				63,5/59,9
		-30			0/28,5		2,5/1,8				63,5/65,0
Δz		0	0	0	0	5	0/0				9,4
		-7,5	2,8		2	5	0,7/0,5				10,0
	400	-15	5,6		4	5	1,3/0,9				11,7
		-30	12,1		8	4	2,5/1,8				17,0
		0	0	0	0	0	5	0	0	8	9,4
		-7,5	6,9		5	5	0,7/0,5				12,7
	1000	-15	14		9	5	1,3/0,9				19,1
		-30	30,2		20	4	2,5/1,8				37,3

Fonte: BALTSAVIAS (1999)
 Valores praticados para $\kappa = 0^\circ/45^\circ$

ANEXO 2