

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**A QUALIDADE CARTOGRÁFICA DOS RESULTADOS
DO *LASERSCANNER* AEROTRANSPORTADO**

MARIA CECÍLIA BONATO BRANDALIZE

FLORIANÓPOLIS, 2004

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

MARIA CECÍLIA BONATO BRANDALIZE

**A QUALIDADE CARTOGRÁFICA DOS RESULTADOS
DO *LASERSCANNER* AEROTRANSPORTADO**

**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, 2004

**“A QUALIDADE CARTOGRÁFICA DOS RESULTADOS DO LASERSCANNER
AEROTRANSPORTADO”**

MARIA CECÍLIA BONATO BRANDALIZE

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^a. Dr^a. Henriette Lebre La Rovere - Coordenadora do PPGEC

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

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

Prof. Dr. Antônio Maria Garcia Tommaselli - UNESP

Prof. Dr. Francisco de Oliveira - UDESC

Prof. Dr. Ronaldo dos Santos da Rocha - UFRGS

Prof. Dr.-Ing. Frank Hrebabetsky - LABMETRO/UFSC

Prof. Dr. Jucilei Cordini - ECV/UFSC

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

*Ao meu marido e filhos,
razões pelas quais procuro manter-me perseverante
no aprimoramento do meu trabalho.
Sem eles, a vida não teria o menor sentido.*

AGRADECIMENTOS

À

Pontifícia Universidade Católica do Paraná,
pelo incentivo e apoio financeiro concedidos.

À

Universidade Federal de Santa Catarina
pela oportunidade de realização do Curso de Doutorado.

À

ESTEIO Engenharia e Aerolevantamentos S.A.,
pela disponibilização dos produtos e dados necessários à pesquisa e também pelo
apoio técnico.

Às contratantes de serviços de mapeamento:

DEINFRA/SC, DER/SP e PETROBRAS

pela autorização de uso dos produtos e dados disponibilizados.

Aos professores, funcionários e colegas do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC/UFSC
pelo apoio, companheirismo e amizade.

*When you can measure what you are speaking about,
and express it in numbers, you know something about it;
but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers,
your knowledge of it is of a meagre and unsatisfactory kind:
it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely,
in your thoughts,
advanced it to the stage of science.*

Sir William Tompson (1824 – 1907)

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

| | | |
|----------|--------------------------------------|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | O PROBLEMA | 5 |
| 1.2 | HIPÓTESES E VARIÁVEIS | 6 |
| 1.3 | LIMITAÇÕES | 8 |
| 1.4 | JUSTIFICATIVA | 11 |
| 1.5 | OBJETIVOS | 14 |
| 1.6 | ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO DE PESQUISA | 15 |
| 2 | A TÉCNICA ALS | 18 |
| 2.1 | PRINCÍPIOS | 18 |
| 2.1.1 | Unidade Laser de Medida | 19 |
| 2.1.2 | Unidade de Varredura | 21 |
| 2.1.3 | Unidade de Posicionamento | 22 |
| 2.1.4 | Unidade de Medida Inercial | 23 |
| 2.1.5 | Unidade de Imageamento | 25 |
| 2.1.6 | Unidade de Controle | 29 |
| 2.1.7 | Estações de Referência Terrestres | 30 |
| 2.1.8 | Unidade de Processamento | 31 |
| 2.2 | PARÂMETROS DE UM SISTEMA ALS | 34 |
| 2.3 | CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA ALS | 41 |
| 2.4 | PRODUTOS | 43 |
| 2.5 | APLICAÇÕES NA CARTOGRAFIA | 45 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.6 | COMPARAÇÃO COM OUTRAS TÉCNICAS | 48 |
| 2.7 | SISTEMAS ALS DISPONÍVEIS NO MERCADO | 51 |
| 3 | CONSIDERAÇÕES SOBRE A LEGISLAÇÃO CARTOGRÁFICA BRASILEIRA EM VIGOR | 54 |
| 3.1 | DECRETO-LEI Nº 243/67 - DIRETRIZES E BASES DA CARTOGRAFIA BRASILEIRA | 55 |
| 3.2 | DECRETO-LEI Nº 1.177/71 - AEROLEVANTAMENTOS NO TERRITÓRIO NACIONAL | 57 |
| 3.3 | RESOLUÇÃO PR Nº 22/83 - ESPECIFICAÇÕES E NORMAS GERAIS PARA LEVANTAMENTOS GEODÉSICOS | 60 |
| 3.4 | DECRETO Nº 89.817/84 - INSTRUÇÕES REGULADORAS DAS NORMAS TÉCNICAS DA CARTOGRAFIA NACIONAL | 61 |
| 4 | CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ERROS INERENTES AO PROCESSO DE OBTENÇÃO E AO PROCESSAMENTO DOS DADOS ALS | 65 |
| 4.1 | QUALIDADE CARTOGRÁFICA | 65 |
| 4.1.1 | Valor Verdadeiro, Valor Observado, Valor Estimado e Erro | 67 |
| 4.1.2 | Precisão e Exatidão | 71 |
| 4.1.3 | Exatidão, Acurácia ou Acuracidade? | 75 |
| 4.1.4 | Precisão e Exatidão (Acurácia): Ampliando Conceitos | 76 |
| 4.2 | ERROS INERENTES AO PROCESSO DE OBTENÇÃO DOS DADOS ALS | 78 |
| 4.2.1 | Unidade de Posicionamento e Orientação | 79 |
| 4.2.2 | Unidade Laser de Medida e Varredura | 98 |
| 4.2.3 | Integração das Diversas Unidades | 100 |
| 4.3 | ERROS INERENTES AO PROCESSAMENTO DOS DADOS ALS | 107 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5 | DESCRIÇÃO DOS DADOS ALS E NÃO-ALS UTILIZADOS NA PESQUISA | 113 |
| 5.1 | CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ALS EMPREGADO | 113 |
| 5.2 | CARACTERÍSTICAS DOS DADOS UTILIZADOS NA PESQUISA | 119 |
| 5.2.1 | Dados Obtidos com o ALTM 2025 | 120 |
| 5.2.2 | Dados Obtidos por Outras Técnicas | 130 |
| 6 | PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO PARA A COMPARAÇÃO DE DADOS ALS E NÃO-ALS | 135 |
| 6.1 | APRESENTAÇÃO DO MÉTODO PARA A COMPARAÇÃO DE DADOS: ALS x NÃO-ALS | 135 |
| 6.1.1 | Seleção de Áreas Levantadas Utilizando a Técnica ALS | 136 |
| 6.1.2 | Verificação da Existência de Outros Tipos de Dados para as Áreas Seleccionadas | 138 |
| 6.1.3 | Análise das Características da Superfície do Terreno para as Áreas Seleccionadas | 139 |
| 6.1.4 | Análise das Características Técnicas dos Levantamentos Executados | 145 |
| 6.1.5 | Análise das Características Técnicas dos Processamentos Realizados | 146 |
| 6.1.6 | Comparação dos Dados ALS Processados com os Dados Não-ALS Disponibilizados | 153 |
| 6.1.7 | Análise dos Resultados da Comparação | 155 |
| 6.2 | APLICAÇÃO DO MÉTODO AOS DADOS ALS E NÃO-ALS SELECIONADOS | 158 |
| 6.2.1 | Definição dos Parâmetros Compreendidos pelos Dados Seleccionados | 158 |
| 6.2.2 | Comparação dos Dados Seleccionados e Análise dos Resultados | 161 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7 | CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS | 199 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 207 |
| | ANEXOS | 222 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------|--|-----|
| FIGURA 1.1 | FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA | 17 |
| FIGURA 2.1 | ELEMENTOS DE UM LRF | 20 |
| FIGURA 2.2 | PADRÕES DE VARREDURA | 22 |
| FIGURA 2.3 | UNIDADE POS™/AV DA APPLANIX | 24 |
| FIGURA 2.4 | RETORNOS DE UM PULSO LASER | 26 |
| FIGURA 2.5 | IMAGENS DE INTENSIDADE E DE ELEVAÇÃO | 28 |
| FIGURA 2.6 | SISTEMA ALS: SEGMENTO AÉREO (MÓDULOS) | 30 |
| FIGURA 2.7 | FUNCIONAMENTO INTEGRADO DE UM SISTEMA ALS | 31 |
| FIGURA 2.8 | PROCESSAMENTO DOS DADOS ALS - ETAPAS | 32 |
| FIGURA 2.9 | PARÂMETROS DE UM SISTEMA ALS | 41 |
| FIGURA 4.1 | FILTRAGEM KALMAN DESCENTRALIZADA: SENSORES DESACLOPADOS | 92 |
| FIGURA 4.2 | FILTRAGEM KALMAN DESCENTRALIZADA: SENSORES FRACAMENTE ACOPLADOS | 92 |
| FIGURA 4.3 | FILTRAGEM KALMAN CENTRALIZADA: SENSORES FORTEMENTE ACOPLADOS | 92 |
| FIGURA 4.4 | INTEGRAÇÃO GPS/IMU (POSPAC™) | 94 |
| FIGURA 4.5 | SISTEMA DE REFERÊNCIA LOCAL DA PLATAFORMA | 104 |
| FIGURA 5.1 | ALTM 2025 - PARTE DIANTEIRA INFERIOR DO CONTROLE PRINCIPAL | 117 |
| FIGURA 5.2 | ALTM 2025 - PARTE DIANTEIRA SUPERIOR DO CONTROLE PRINCIPAL | 117 |
| FIGURA 5.3 | ALTM 2025 - RECEPTOR GPS E CÂMARA DE VÍDEO | 118 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| FIGURA 5.4 | ALTM 2025 - DISPOSIÇÃO NO INTERIOR DA AERONAVE | 119 |
| FIGURA 5.5 | ALTM 2025 - CONDIÇÕES DE VARREDURA | 124 |
| FIGURA 5.6 | SP-270: CLASSES DE DENSIDADE DA COBERTURA VEGETAL | 128 |
| FIGURA 5.7 | ÁGUA VERDE: CLASSES DE DENSIDADE DAS EDIFICAÇÕES | 129 |
| FIGURA 6.1 | ALCANCE MÁXIMO x REFLEXIBILIDADE DO ALVO | 140 |
| FIGURA 6.2 | ALVO ESPECULAR E ALVO DIFUSO | 142 |
| FIGURA 6.3 | ALVO ESPECULAR: REFLEXIBILIDADE x COMPRIMENTO DE ONDA | 143 |
| FIGURA 6.4 | REFLEXIBILIDADE: ÁGUA x VEGETAÇÃO x SOLO | 144 |
| FIGURA 6.5 | FUNÇÕES BÁSICAS DO REALM SURVEY SUITE | 147 |
| FIGURA 6.6 | TIPOS DE ARQUIVO DE PONTOS ALS | 151 |
| FIGURA 6.7 | CONTEÚDO DE UM ARQUIVO DE PONTOS ALS NO FORMATO ASCII | 152 |
| FIGURA 6.8 | FLUXOGRAMA DAS ETAPAS PARA AVALIAÇÃO DE RESULTADOS ALS | 157 |
| FIGURA 6.9 | ÁREA DE CALIBRAÇÃO: PONTOS TOPOGRÁFICOS | 163 |
| FIGURA 6.10 | ÁREA DE CALIBRAÇÃO: PONTOS ALS | 163 |
| FIGURA 6.11 | ÁREA DE CALIBRAÇÃO: ORTOFOTOGRAFIA x IMAGEM DE INTENSIDADE | 164 |
| FIGURA 6.12 | ÁGUA VERDE: ESTEREO-RESTITUIÇÃO x IMAGEM DE INTENSIDADE | 166 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| FIGURA 6.13 | ÁGUA VERDE: CURVAS RESTITUÍDAS x CURVAS ALS AUTOMÁTICAS | 167 |
| FIGURA 6.14 | BR-116: PONTOS DE NIVELAMENTO x PONTOS ALS | 169 |
| FIGURA 6.15 | OSBRA: CURVAS RESTITUÍDAS x CURVAS ALS AUTOMÁTICAS | 171 |
| FIGURA 6.16 | SC-414: PONTOS DE NIVELAMENTO x PONTOS ALS | 174 |
| FIGURA 6.17 | SC-414: CRITÉRIO DO “PONTO COMUM” | 175 |
| FIGURA 6.18 | SC-414: DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS AMOSTRADOS | 176 |
| FIGURA 6.19 | SC-471: DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS AMOSTRADOS | 179 |
| FIGURA 6.20 | SP-270: PONTOS DE NIVELAMENTO E PONTOS ALS SOBRE ORTOFOTOGRAFIA | 181 |
| FIGURA 6.21 | HIPSOMÉTRICO: RESTITUIÇÃO x ALS | 193 |
| FIGURA 6.22 | HISTOGRAMAS DOS ERROS ALTIMÉTRICOS | 195 |

LISTA DE QUADROS

| | | |
|------------|--|-----|
| QUADRO 2.1 | PRINCÍPIOS E PADRÕES DE VARREDURA | 21 |
| QUADRO 2.2 | ALS x AEROFOTOGRAMETRIA x IFSAR | 49 |
| QUADRO 2.3 | SISTEMAS ALS DISPONÍVEIS NO MERCADO | 51 |
| QUADRO 2.4 | ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS MAIS RECENTES | 52 |
| QUADRO 3.1 | DECRETOS E DECRETOS-LEI | 54 |
| QUADRO 3.2 | PORTARIAS | 54 |
| QUADRO 3.3 | RESOLUÇÕES | 54 |
| QUADRO 3.4 | NORMAS DE SERVIÇO E INSTRUÇÕES TÉCNICAS | 55 |
| QUADRO 3.5 | NORMAS TÉCNICAS | 55 |
| QUADRO 3.6 | CLASSIFICAÇÃO DE CARTAS | 63 |
| QUADRO 4.1 | ERROS DE MEDIDA: CARACTERÍSTICAS | 70 |
| QUADRO 4.2 | PRECISÃO x EXATIDÃO | 73 |
| QUADRO 4.3 | FONTES DE ERRO RELATIVAS À SINCRONIZAÇÃO GPS/IMU | 96 |
| QUADRO 4.4 | INTEGRAÇÃO GPS/IMU: VANTAGENS E DESVANTAGENS | 97 |
| QUADRO 4.5 | PRINCIPAIS FONTES DE ERRO DOS DADOS BRUTOS ALS | 100 |
| QUADRO 4.6 | FONTES DE ERRO RELATIVAS À SUPERFÍCIE DO TERRENO | 106 |
| QUADRO 5.1 | EVOLUÇÃO DO SISTEMA ALTM | 114 |
| QUADRO 5.2 | ESPECIFICAÇÕES DO SISTEMA ALTM 2025 | 115 |
| QUADRO 5.3 | PROJETOS DE MAPEAMENTO EXECUTADOS EM 2002 E QUE EMPREGARAM A TÉCNICA ALS | 121 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| QUADRO 5.4 | PARÂMETROS DO PLANEJAMENTO DE VÔO LASER | 123 |
| QUADRO 5.5 | CARACTERÍSTICAS DAS ÁREAS VARRIDAS | 126 |
| QUADRO 5.6 | DADOS NÃO-ALS DISPONIBILIZADOS PARA AS ÁREAS VARRIDAS | 134 |
| QUADRO 6.1 | PARÂMETROS RELEVANTES AOS LEVANTAMENTOS ALS | 137 |
| QUADRO 6.2 | PARÂMETROS RELEVANTES AOS LEVANTAMENTOS NÃO-ALS | 138 |
| QUADRO 6.3 | REFLEXIBILIDADE DE ALGUNS TIPOS DE ALVO | 141 |
| QUADRO 6.4 | SUPERFÍCIE DO TERRENO: CARACTERÍSTICAS | 145 |
| QUADRO 6.5 | ARQUIVOS DOS DADOS ALS: CARACTERÍSTICAS | 160 |
| QUADRO 6.6 | ARQUIVOS DOS DADOS NÃO-ALS: CARACTERÍSTICAS | 161 |
| QUADRO 6.7 | BAIRRO ÁGUA VERDE: LIMITES DA ÁREA COMPARADA | 165 |
| QUADRO 6.8 | BR-116: LIMITES DA ÁREA COMPARADA | 168 |
| QUADRO 6.9 | OSBRA: LIMITES DA ÁREA COMPARADA | 170 |
| QUADRO 6.10 | SC-414: LIMITES DA ÁREA COMPARADA | 172 |
| QUADRO 6.11 | SC-471: LIMITES DA ÁREA COMPARADA | 177 |
| QUADRO 6.12 | SP-270: LIMITES DA ÁREA COMPARADA | 180 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------|---|-----|
| TABELA 2.1 | DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS SISTEMAS ALS EM OPERAÇÃO | 53 |
| TABELA 4.1 | FONTES DE ERRO DO POSICIONAMENTO GPS | 86 |
| TABELA 4.2 | ACURÁCIA ABSOLUTA DOS PARÂMETROS DE NAVEGAÇÃO | 95 |
| TABELA 4.3 | ACURÁCIA RELATIVA DA ORIENTAÇÃO | 95 |
| TABELA 5.1 | CLASSES DE RELEVO | 127 |
| TABELA 5.2 | CLASSES DE DENSIDADE DA COBERTURA VEGETAL | 127 |
| TABELA 5.3 | CLASSES DE DENSIDADE DAS EDIFICAÇÕES | 129 |
| TABELA 6.1 | ÁREA DE CALIBRAÇÃO: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE NUVENS DE PONTOS (ALS x TOPOGRAFIA) | 164 |
| TABELA 6.2 | BAIRRO ÁGUA VERDE: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE NUVENS DE PONTOS (ALS x RESTITUIÇÃO) | 166 |
| TABELA 6.3 | BR-116: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE NUVENS DE PONTOS (ALS x TOPOGRAFIA) | 170 |
| TABELA 6.4 | OSBRA: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE GRADES REGULARES | 171 |
| TABELA 6.5 | SC-414: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE NUVENS DE PONTOS (ALS x TOPOGRAFIA) | 174 |
| TABELA 6.6 | SC-414: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE NUVENS DE PONTOS (ALS x RESTITUIÇÃO) | 175 |
| TABELA 6.7 | SC-471: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE NUVENS DE PONTOS (ALS x TOPOGRAFIA) | 178 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| TABELA 6.8 | SC-471: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE NUVENS DE PONTOS (ALS x RESTITUIÇÃO) | 178 |
| TABELA 6.9 | SP-270: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE NUVENS DE PONTOS (ALS x TOPOGRAFIA) | 181 |
| TABELA 6.10 | VALORES DO PEC PARA AS ÁREAS COMPARADAS | 184 |
| TABELA 6.11 | VALORES COMPUTADOS PARA O ERRO PADRÃO EM FUNÇÃO DOS PONTOS AMOSTRADOS | 184 |
| TABELA 6.12 | QUANTIDADE DE PONTOS DISPONIBILIZADOS E UTILIZADOS | 185 |
| TABELA 6.13 | ACURÁCIAS ESPECIFICADAS PELO FABRICANTE | 196 |

LISTA DE SIGLAS ESTRANGEIRAS

| | |
|-------|--|
| A/D | Analog/Digital |
| ALS | Airborne Laser Scanning |
| ALSM | Airborne Laser Swath Mapping |
| ALTM | Airborne Laser Terrain Mapper |
| ALTOA | Agence Laser de Topographie Aéroporté |
| ASCII | American Standard Code for Information Interchange |
| ASPRS | American Society for Photogrammetry and Remote Sensing |
| BIN | Binary Data File |
| BMP | Bitmap - Windows™ Image Format |
| CAD | Computer-Aided Design |
| CDRH | Center for Devices and Radiological Health |
| CFR | Code of Federal Regulations |
| CPU | Central Processing Unit |
| DCM | Digital City Model |
| DCM | Digital Crown Model |
| DEM | Digital Elevation Model |
| DG | Direct Georeferencing |
| DGM | Digital Ground Model |
| DGPS | Differential Global Positioning System |
| DHM | Digital Height Model |
| DIAL | Differential Absorption LIDAR |
| DLM | Digital Landscape Model |
| DSM | Digital Surface Model |

| | |
|--------|---|
| DSP | Digital Signal Processing |
| DTG | Dry Tuned Gyro |
| DTM | Digital Terrain Model |
| DVC | Digital Video Cassette |
| DVM | Digital Vegetation Model |
| DXF | AutoCAD Drawing Exchange Format |
| DWG | AutoCAD Drawing Format |
| EARSeL | European Association of Remote Sensing Laboratories |
| ECEF | Earth-Centered, Earth-Fixed |
| EDM | Electronic Distance Measuring |
| EOM | Earth Observation Magazine |
| FGDC | Federal Geographic Data Committee |
| FDA | Food and Drugs Administration |
| FEMA | Federal Emergency Management Agency |
| FIG | Fédération Internationale des Géomètres |
| FOG | Fiber Optic Gyro |
| FOV | Field of View |
| GIM | Geomatics Information Magazine |
| GIS | Geographic Information System |
| GPR | Ground Penetrating Radar |
| GPS | Global Positioning System |
| GRS-80 | Geodetic Reference System of 1980 |
| HD | Hard Disk |
| IAPRS | International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing |

| | |
|--------|---|
| ICZM | Integrated Coastal Zone Management |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IERS | International Earth Rotation and Reference System |
| IFOV | Instantaneous Field of View |
| IFSAR | Interferometric Synthetic Aperture Radar |
| IIN | Integrated Inertial Navigation |
| IMU | Inertial Measurement Unit |
| INS | Inertial Navigation System |
| I/O | Input/Output |
| IPF/TU | Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung/Technische Universität |
| IRQ | Interrupt Request |
| IRS | Inertial Reference System |
| ISEE | International Society of Explosives Engineers |
| ISO | International Organization for Standardization |
| ISPRS | International Society for Photogrammetry and Remote Sensing |
| ITRF | International Terrestrial Reference Frame |
| KAR | Kinematic Ambiguity Resolution |
| LADAR | Laser Detection and Ranging |
| LAS | LIDAR Data Exchange Format Standard |
| LASER | Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation |
| LED | Light Emitting Diode |
| LIDAR | Light Detection and Ranging |
| LINS | Laser Inertial Navigation System |
| LRF | Laser Rangefinder |

| | |
|------------------------|---|
| MD | Maryland State |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NATO | North Atlantic Treaty Organization |
| NCGS | North Carolina Geodetic Survey |
| NDEP | National Digital Elevation Program |
| NIR | Near Infra-Red (Spectral Channel) |
| NOAA | National Oceanic and Atmospheric Administration |
| NP | Navigation Processor |
| NSSDA | National Standards for Spatial Data Accuracy |
| OEEPE | Organisation Européenne d'Etudes Photogrammétriques Expérimentales |
| OTF | On-the-Fly |
| PCM | Pipeline Current Mapper |
| PCMCIA | Personal Computer Memory Card International Association |
| PCS | POS Computer System |
| PDOP | Positional Dilution of Precision |
| PE&RS | Photogrammetric Engineering & Remote Sensing |
| POST TM /AV | Position and Orientation System for Airborne Vehicles |
| PRF | Pulse Repetition Frequency |
| PRR | Pulse Repetition Rate |
| RADAR | Radio Detection and Ranging |
| REALM | Results of Airborne Laser Mapping |
| RGB | Red-Green-Blue (Spectral Channels) |
| RLG | Ring Laser Gyro |

| | |
|--------|-----------------------------------|
| RMSE | Root Mean Square Error |
| RTK | Real-Time Kinematic |
| S/N | Signal to Noise Ratio |
| SAD-69 | South American Datum of 1969 |
| SAR | Synthetic Aperture Radar |
| SBET | Smoothed Best Estimate Trajectory |
| STANAG | Standardization Agreement (NATO) |
| TIN | Triangulated Irregular Network |
| TXT | Text File Extension |
| WGS-84 | World Geodetic System of 1984 |
| WWW | World Wide Web |

LISTA DE SIGLAS NACIONAIS

| | |
|---------|---|
| AEB | Agência Espacial Brasileira |
| BR | Brasil - Prefixo das Rodovias Nacionais |
| CATEN | Cadastro de Aerolevanteamento do Território Nacional |
| CIM | Carta Internacional do Mundo ao Milionésimo |
| CLATEN | Cadastro de Levantamentos Aeroespaciais do Território Nacional |
| CLETEN | Cadastro de Levantamento Espacial do Território Nacional |
| CNPS | Centro Nacional de Pesquisa de Solos |
| CONCAR | Comissão Nacional de Cartografia |
| COPEL | Companhia Paranaense de Energia |
| CTA | Centro Técnico Aeroespacial |
| DAC | Departamento de Aviação Civil |
| DEINFRA | Departamento de Infraestrutura |
| DER | Departamento de Estradas de Rodagem |
| DHN | Diretoria de Hidrografia e Navegação |
| DSG | Diretoria do Serviço Geográfico |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| EMFA | Estado-Maior das Forças Armadas |
| EMPLASA | Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S.A. |
| EUA | Estados Unidos da América |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| ICA | Instituto Cartográfico da Aeronáutica |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial |
| IPPUC | Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba |

| | |
|-----------|---|
| IRA | Instruções Reguladoras de Aerolevantamento |
| LACTEC | Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento |
| LTM | Local Transversa de Mercator |
| MD | Ministério da Defesa |
| MDE | Modelo Digital de Elevação |
| MDS | Modelo Digital de Superfície |
| MDT | Modelo Digital de Terreno |
| MG | Minas Gerais |
| MMQ | Método dos Mínimos Quadrados |
| NT | Normas Técnicas |
| PEC | Padrão de Exatidão Cartográfica |
| PETROBRAS | Petróleo Brasileiro S.A. |
| PMC | Prefeitura Municipal de Curitiba |
| PR | Estado do Paraná |
| RAA | Regulamento das Atividades de Aerolevamentos |
| RBMC | Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo |
| SBCS | Sociedade Brasileira de Ciência do Solo |
| SCN | Sistema Cartográfico Nacional |
| SC | Estado de Santa Catarina |
| SGB | Sistema Geodésico Brasileiro |
| SICAFS | Sistema Cartográfico Municipal de Feira de Santana |
| SIRGAS | Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul |
| SIU | Sistema Internacional de Unidades |
| SP | Estado de São Paulo |

| | |
|------|---|
| UFPR | Universidade Federal do Paraná |
| UGGI | União Geodésica e Geofísica Internacional |
| URBS | Companhia de Urbanização e Saneamento de Curitiba |
| UTM | Universal Transversa de Mercator |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|------|--|
| 2D | Bidimensional |
| 3D | Tridimensional |
| AB | AktieBolag (Companhia Limitada) |
| art. | Artigo |
| Av. | Avenida |
| GmbH | Gesellschaft mit beschränkter Haftung (Companhia Limitada) |
| Inc. | Incorporated |
| LTDA | Limitada |
| S.A. | Sociedade Anônima |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------|---|
| E | Abscissa do Sistema de Coordenadas Planas UTM |
| h | Altitude Geométrica |
| H | Altitude Ortométrica |
| H' | Altura de Vôo Operacional |
| θ | Ângulo de Varredura |
| \approx | Aproximadamente |
| b | Bytes |
| r | Coefficiente de Reflexão |
| λ | Comprimento de Onda do Laser |
| D | Densidade de Pontos Laser |
| s | Desvio Padrão Amostral (Distribuição Normal) |
| σ | Desvio Padrão Populacional |
| d | Diâmetro de Abertura do Laser |
| D_P | Diâmetro do Pulso Laser sobre a Superfície do Terreno |
| Δ | Diferença |
| g | Divergência do Feixe Laser |
| t_P | Duração do Pulso Laser |
| T | Energia do Pulso Laser |
| D_{LONG} | Espaçamento Longitudinal dos Pontos Laser |
| D_{TRANS} | Espaçamento Transversal dos Pontos Laser |
| f_{SC} | Freqüência de Varredura |
| f_{GPS} | Freqüência do GPS |
| f_{INS} | Freqüência do INS |

| | |
|---------------------|---|
| ° | Grau - Unidade de Ângulo Plano |
| °C | Grau Celsius - Unidade de Temperatura |
| Hz | Hertz - Unidade de Freqüência |
| J | Joule - Unidade de Trabalho, Energia ou Quantidade de Calor |
| L | Largura da Faixa de Varredura |
| ϕ | Latitude Elipsoidal |
| λ | Longitude Elipsoidal |
| \bar{x} | Média Aritmética Amostral (Distribuição Normal) |
| m | Média Populacional |
| M | Mega (10^6) |
| m | Metro - Unidade de Comprimento |
| m ² | Metro Quadrado - Unidade de Área |
| μ | Micro (10^{-6}) |
| m | Mili (10^{-3}) |
| n | Nano (10^{-9}) |
| Nd:YAG | Neodymium Doped Yttrium Aluminium Garnet |
| Nd:YLF | Neodymium Doped Yttrium Lithium Fluoride |
| Nd:YVO ₄ | Neodymium Doped Yttrium Ortho Vanadate |
| N _e | Número |
| N _P | Número de Pontos por Linha Varrida |
| N | Ordenada do Sistema de Coordenadas Planas UTM |
| § | Parágrafo |
| % | Por Cento |

| | |
|------------|--|
| P | Potência do Laser |
| k | Quilo (10^3) |
| km/h | Quilômetros por Hora |
| rad | Radiano - Unidade de Ângulo Plano |
| s | Segundo - Unidade de Tempo |
| XYZ | Sistema de Coordenadas Cartesianas |
| Q | Subamostragem ou Superamostragem de Pontos |
| F | Taxa de Repetição do Pulso Laser |
| σ^2 | Variância de uma Distribuição Normal |
| v | Velocidade da Plataforma |
| W | Watt - Unidade de Potência ou Fluxo de Energia |

RESUMO

O presente trabalho de pesquisa objetivou desenvolver um método de avaliação e análise da qualidade cartográfica dos produtos obtidos de levantamentos que empregaram, durante o ano de 2002, a técnica da varredura laser aerotransportada. Estes levantamentos foram realizados em diversas regiões do território brasileiro e, devido à recente introdução dos sistemas de varredura laser (*laserscanner*) aerotransportados no mercado nacional, surgiu a necessidade de investigar os resultados obtidos do seu emprego na Cartografia. O método desenvolvido e empregado para avaliar e analisar tais resultados tem como base comparações entre nuvens de pontos, feições e grades regulares obtidas daqueles levantamentos e de outros convencionalmente utilizados (topográficos, geodésicos e/ou fotogramétricos). Os resultados obtidos dos levantamentos que empregaram a técnica de varredura laser aerotransportada foram descritos levando-se em consideração as características do relevo, a densidade das edificações e a densidade e tipo de cobertura vegetal das áreas varridas, bem como, os parâmetros programados para cada varredura. Das comparações entre os conjuntos de pontos, feições ou grades disponibilizados resultaram estatísticas que foram computadas de acordo com as especificações de qualidade impostas pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) constante do Decreto Nº 89.817/84 em vigor. Da análise estatística concluiu-se que os resultados gerados do emprego da técnica de varredura laser aerotransportada atendem às especificações de qualidade do referido padrão.

ABSTRACT

This work has as its goal the development of a cartographic quality evaluation and analysis method for surveys that used, during 2002, the airborne laserscanning technique. These surveys were done over several regions of Brazil's territory and, due to the recent introduction of the airborne laserscanning systems in the Brazilian market there was a need of an investigation of its results when employed in Cartography. The method developed and used to evaluate and analyze such results has as its basis the comparison between point clouds, features and regularly spaced grids obtained from the surveys being analyzed, and other results obtained from conventional techniques (such as topography, geodesy and photogrammetry). The results from the surveys using airborne laserscanning were described taking into account the terrain features, the building and vegetation density, and the vegetation type covering the areas being surveyed, as well as the programmed parameters for each scan. The comparisons between the available sets of points, features and grids resulted in statistics that were computed in accordance with the quality standards established in the Brazilian Cartographic Accuracy Standard (PEC) (Decree N° 89.817/84). From the statistical analysis it was concluded that the results from airborne laserscanning are in accordance with the specifications of the standard mentioned above.

1 INTRODUÇÃO

O emprego da tecnologia LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) na medida de distâncias, não constitui uma novidade, visto que instrumentos topográficos e geodésicos a laser têm sido utilizados em levantamentos terrestres desde meados da década de 60. Foi nesta mesma década que a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) iniciou o desenvolvimento de uma rede global de estações terrestres com o objetivo de medir distâncias a refletores transportados por satélites, determinando, inclusive, a distância à Lua por meio do rastreamento de refletores (espelhos) posicionados sobre a sua superfície. Mais tarde, em meados da década de 70, uma associação entre a NASA e o *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) resultou num programa para a coleta de dados atmosféricos, oceanográficos e topográficos, por meio de sistemas de sensoriamento remoto a laser denominados LIDAR, acrônimo para *Light Detection and Ranging*.

Embora a palavra "*Light*", da sigla LIDAR, subentenda a utilização de qualquer fonte luminosa, os sistemas atuais se utilizam apenas de fontes de luz laser e, por esta razão, tais sistemas são também denominados LADAR (*Laser Detection and Ranging*) (HANCOCK et al., 1998; WEHR & LOHR 1999), ou ainda, Laser RADAR (*Radio Detection and Ranging*) (WAGNER, 1995; FLOOD & GUTELIUS, 1997; ARGALL & SICA, 2002).

Atualmente, são três os tipos de sistemas LIDAR existentes (FOWLER, 2001):

- a) os utilizados na determinação das coordenadas tridimensionais absolutas de pontos e/ou objetos situados sobre a superfície do terreno, denominados LIDAR topográficos;

- b) os utilizados na determinação da profundidade de corpos d'água (como rios, mares e oceanos), denominados LIDAR batimétricos ou hidrográficos;
- c) os utilizados em estudos atmosféricos, como na determinação da velocidade dos ventos ou de alguns componentes da atmosfera terrestre (gases, vapor d'água, partículas em suspensão) e de seus respectivos níveis de concentração.

Segundo LILLESAND & KIEFER (2000), o LIDAR topográfico é um sistema ativo que envolve o uso de uma radiação laser emitida em direção à superfície do terreno e que tem por objetivo a determinação das elevações desta superfície.

Ainda segundo estes mesmos autores, os primeiros sistemas LIDAR exclusivamente topográficos envolviam o uso de dispositivos perfiladores (*profilers*) que obtinham dados de elevação ao longo de uma única linha do terreno (linha de passagem da aeronave) e, devido ao seu funcionamento complexo e utilização limitada, não permitiam o levantamento de grandes áreas da superfície terrestre a um custo viável.

Assim, somente a partir da década de 90, com o desenvolvimento dos dispositivos de varredura, tais sistemas passaram a ser utilizados com maiores vantagens.

Como um EDM (*Electronic Distance Measuring*), instrumento utilizado em levantamentos topográficos e geodésicos, um sistema LIDAR topográfico permite determinar distâncias a objetos refletores (naturais e artificiais) localizados sobre a superfície do terreno por meio da emissão e recepção de ondas luminosas (no caso, uma radiação laser, na forma contínua ou pulsada).

Embora ambos, LIDAR e EDM, partilhem dos mesmos princípios de funcionamento no que diz respeito à medida de distâncias, o primeiro contempla uma série de outras características bastante distintas. São elas:

- a) a plataforma utilizada, compreendendo aeronaves, espaçonaves e satélites artificiais;
- b) a utilização conjunta de um sistema de posicionamento (*Global Positioning System* - GPS), de um sistema de orientação (*Inertial Navigation System* - INS, *Inertial Reference System* - IRS ou *Inertial Measurement Unit* - IMU) e de um sistema de varredura (*scanner*);
- c) o controle de tais sistemas por meio de dispositivos físicos e lógicos sofisticados;
- d) a utilização de dispositivos especiais para o armazenamento dos dados coletados;
- e) a utilização de programas específicos para a coleta e o processamento destes dados.

Segundo DUBAYAH et al. (2000), os termos LIDAR e "altimetria laser" têm atualmente o mesmo significado, embora originalmente fossem considerados distintos. Estes mesmos autores afirmam, ainda, que existe um senso comum crescente no sentido de rotular todas as observações laser da superfície terrestre como "altimetria laser" (*laser altimetry*) e todas as observações laser da atmosfera terrestre como LIDAR.

Outros autores, tais como ACKERMANN (1999), BALTSAVIAS (1999a) e WEHR & LOHR (1999) associam o termo "varredura laser" (*laser scanning*) à técnica e o termo "varredor laser" (*laser scanner*) ao instrumento ou sistema, fazendo distinção entre os utilizados em levantamentos terrestres (posicionados sobre a

superfície do terreno em plataformas fixas ou móveis), os utilizados em levantamentos aéreos (a bordo de aeronaves) e os utilizados em levantamentos espaciais (a bordo de espaçonaves ou satélites artificiais).

JONAS & BYRNE (2003), por outro lado, afirmam que tanto as técnicas de perfilamento como as de varredura (terrestre e aérea) anteriormente mencionadas estão compreendidas pela tecnologia LIDAR. Estes mesmos autores afirmam, ainda, que os norte-americanos preferem o emprego do termo LIDAR ao termo *Airborne Laser Scanning* (ALS), usualmente empregado em outras partes do mundo. Mesmo assim, autores norte-americanos como CARTER et al. (2001) e SHRESTHA et al. (1999), vêm se referindo a esta técnica como *Airborne Laser Swath Mapping* (ALSM), termo totalmente distinto dos anteriormente apresentados.

Com tal terminologia à disposição e, a fim de evitar confusão, ao longo do presente trabalho de pesquisa, sempre que houver uma referência à técnica ou aos sistemas de varredura laser aerotransportados, o termo ALS será utilizado.

Assim, o emprego da técnica ALS para fins de mapeamento tem sido considerado, por diversos autores, uma prática relativamente recente (os primeiros sistemas comerciais surgiram na década passada) e, por esta razão, um número reduzido de sistemas ALS encontrava-se em operação, no mundo, até meados de 2003. Eram apenas 86, segundo dados compilados por FLOOD (2003). Este número pode ser considerado inexpressivo se comparado ao total de câmaras métricas aéreas (cerca de 2.000) atualmente utilizadas para os mesmos fins, também a nível mundial.

No entanto, e apesar de seu recente desenvolvimento, a referida técnica ALS vem sendo empregada em serviços de mapeamento, no Brasil, desde a entrada do primeiro sistema ALS no mercado nacional, em meados de 2001.

A aquisição de tal sistema por uma empresa nacional fez surgir, portanto, a necessidade de investigar seus resultados no que diz respeito ao seu emprego na cartografia, a fim de certificar se tais resultados são compatíveis, em qualidade, aos resultados normalmente obtidos por outras técnicas convencionalmente aplicadas (topográficas, geodésicas ou fotogramétricas) e já contempladas pela legislação cartográfica em vigor.

Assim, o tema proposto para a presente pesquisa diz respeito à análise da qualidade cartográfica dos resultados do *laserscanner* aerotransportado, resultados estes obtidos após o processamento dos dados brutos coletados.

Para tanto, desenvolveu-se e empregou-se um método que compreendeu a confrontação, por meio de técnicas estatísticas, entre os resultados obtidos do emprego do referido sistema ALS e os resultados obtidos do emprego de outras técnicas já mencionadas. Tal confrontação se deu com base nos dados levantados em diversas regiões do território nacional, que apresentaram diferentes características em relação ao relevo, à densidade das edificações e à densidade e tipo da cobertura vegetal.

Com o estabelecimento do referido método, pretende-se que os usuários de produtos cartográficos gerados a partir do emprego da técnica ALS possam avaliar, com maior segurança e confiabilidade, a qualidade de tais produtos, independentemente do sistema ALS utilizado.

1.1 O PROBLEMA

Enfrentar um problema significa priorizar dificuldades. E são muitas as dificuldades que se apresentam quando se pretende analisar o emprego de uma

determinada técnica, em um determinado contexto, principalmente quando tal técnica assume como principal característica, a novidade.

Acredita-se, portanto, que uma das dificuldades que se apresentam em relação ao emprego da técnica ALS, no Brasil, é justamente a falta de especificações ou padrões que permitam avaliar, com pertinência, os correspondentes resultados obtidos. Tal dificuldade tem como consequência o uso de padrões impostos pela legislação vigente, mesmo que estes padrões não sejam pertinentes à avaliação dos produtos gerados a partir do emprego da referida técnica.

A presente pesquisa propõe resolver, portanto, o seguinte problema:

Os resultados do *laserscanner* aerotransportado atendem às especificações de qualidade cartográfica impostas pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) constante do Decreto Nº 89.817, de 20 de Junho de 1984, obrigatoriamente adotado na avaliação e classificação de produtos de natureza cartográfica, no Brasil?

Uma vez explicitado o problema principal, é natural que surjam outras questões a ele relacionadas. Assim, pode-se indicar como problema subjacente:

Até que ponto é possível utilizar o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) constante do Decreto Nº 89.817, de 20 de Junho de 1984, para a avaliação e a classificação de produtos cartográficos gerados a partir do emprego da técnica ALS, independentemente do sistema ALS utilizado?

1.2 HIPÓTESES E VARIÁVEIS

A fim de orientar a pesquisa na busca de uma resposta para os problemas expostos anteriormente, formulou-se a seguinte Hipótese Básica ou Central:

Os resultados do *laserscanner* aerotransportado, obtidos após o processamento dos dados brutos coletados, atendem às especificações de qualidade cartográfica impostas pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) constante do Decreto Nº 89.817, de 20 de Junho de 1984.

Ao problema subjacente apresentado anteriormente, cabe a seguinte Hipótese:

O Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) constante do Decreto Nº 89.817, de 20 de Junho de 1984, é adequado à avaliação e classificação de produtos cartográficos gerados a partir do emprego da técnica ALS, independentemente do sistema ALS utilizado.

Tais hipóteses serão verificadas ao longo da presente pesquisa, podendo ser comprovadas ou rejeitadas. Para tanto, deverão ser levadas em consideração, as seguintes variáveis:

- PEC Altimétrico: expressa diferentes categorias de classificação dos produtos de natureza cartográfica (por meio de sua acurácia e precisão) e está relacionado à qualidade altimétrica destes.
- PEC Planimétrico: expressa diferentes categorias de classificação dos produtos de natureza cartográfica (por meio de sua acurácia e precisão) e está relacionado à qualidade planimétrica destes.
- Tipo de Relevo: não é levado em consideração pelos referidos PECs, porém, é extremamente importante na definição dos principais parâmetros de varredura de um sistema ALS, influenciando na qualidade dos seus resultados.
- Densidade e Tipo da Cobertura Vegetal: da mesma forma, não são levados em consideração pelos referidos PECs, mas, constituem parâmetros

importantes quando se pretende gerar modelos digitais de elevação a partir do emprego da técnica ALS.

- Densidade das Edificações: também não é levada em consideração pelos referidos PECs e, no entanto, é um dos parâmetros limitadores de uso dos sistemas ALS em áreas urbanas, quando a intenção é gerar modelos digitais de elevação.

1.3 LIMITAÇÕES

Com a introdução do primeiro sistema ALS no mercado nacional, levantamentos foram executados, em território brasileiro, com o intuito de atender aos propósitos cartográficos de diversas contratações, no menor período de tempo e com a maior economia e qualidade possíveis. Destes levantamentos resultaram varreduras realizadas sobre os mais variados tipos de terreno, em áreas urbanas e rurais, que incluíram diferentes características de relevo e cobertura vegetal.

A quantidade de dados ALS, provenientes de tais contratações, é, portanto, grande e diversificada. Como não é possível verificar todo o universo de dados ALS levantados, certas limitações foram impostas à presente pesquisa a fim de torná-la viável. Estas limitações encontram-se enumeradas a seguir:

- 1) Tipo de Relevo
- 2) Densidade da Cobertura Vegetal
- 3) Tipo de Cobertura Vegetal
- 4) Densidade das Edificações
- 5) Existência de Resultados Provenientes de Outras Técnicas
- 6) Período de Varredura

Assim, foram consideradas relevantes para a análise da qualidade dos resultados do *laserscanner* aerotransportado, as varreduras realizadas:

a) em Áreas Rurais:

- sobre relevos que compreendem as seguintes classes: plano, suave ondulado, ondulado, forte ondulado, montanhoso e escarpado (segundo classificação da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - SBCS e do Centro Nacional de Pesquisa de Solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA/CNPS);
- com densidade da cobertura vegetal do tipo alta, média e baixa (conforme classificação proposta por SHRESTHA & ZINCH (2001));
- levando em consideração a taxa de penetração do feixe laser nos diversos tipos de cobertura vegetal, que incluem: floresta, mata e bosque; cerrado, caatinga e chavascal; campo; brejo ou pântano; mangue; reflorestamento; e cultura (segundo convenções da Diretoria do Serviço Geográfico - DSG).

b) em Áreas Urbanas:

- sobre relevos que compreendem as seguintes classes: plano, suave ondulado, ondulado, forte ondulado, montanhoso e escarpado (segundo classificação da SBCS e EMBRAPA/CNPS);
- com densidade das edificações do tipo alta, média e baixa (conforma classificação proposta por SHRESTHA & ZINCH (2001)).

c) em Áreas Rurais e Urbanas:

- que, além de apresentarem as características delimitadas pelos itens a e b acima, também foram levantadas por outras técnicas (topográficas,

geodésicas ou fotogramétricas) e cujos dados estejam disponíveis para uso.

É importante ressaltar que as quatro primeiras limitações enumeradas anteriormente (1 a 4) afetam os parâmetros de varredura de qualquer sistema ALS e, conseqüentemente, a qualidade dos seus resultados.

Quanto ao período considerado para as varreduras realizadas, optou-se pelos levantamentos executados pelo sistema ALTM 2025 durante o ano de 2002 (janeiro a dezembro), ou seja, aqueles que tiveram início logo após a homologação do referido sistema pelo Centro Técnico Aeroespacial (CTA), em dezembro de 2001.

A preferência pelos resultados obtidos de levantamentos realizados com o ALTM 2025 justifica-se pela seguinte razão: por ter sido o primeiro sistema ALS a entrar em operação no Brasil, a série de varreduras realizadas é considerável e bastante diversificada.

Da mesma forma, a preferência pelos resultados obtidos de levantamentos realizados com o referido sistema durante o ano de 2002, justifica-se pelas seguintes razões: a) ter à disposição uma quantidade significativa de varreduras que possam atender às limitações impostas pelos itens 1 a 5 apresentados anteriormente; e, b) ter a possibilidade de analisar a capacidade do sistema em determinar pontos sobre a superfície nua do terreno, levando em consideração as diferentes estações do ano (verão, outono, inverno e primavera).

Assim, foram escolhidas para análise as áreas varridas relacionadas a seguir:

- Área Rural: rodovia SC-414, entre as cidades de Belchior e Luís Alves; rodovia SC-471, entre as cidades de Romelândia e Anchieta; rodovia SP-270, entre as cidades de Assis e Presidente Prudente; e parte da malha de dutos da PETROBRAS (trechos variados).

- Área Urbana: cidade de Curitiba, bairro Água Verde, ao longo da avenida República Argentina; cidade de Curitiba, bairro Parolin/Prado Velho, sobre a área predial e de estacionamento do Supermercado Carrefour (área de calibração); e cidade de Curitiba, ao longo da rodovia BR-116, entre o trevo do Atuba e a avenida Salgado Filho.

A descrição detalhada dos dados ALS coletados para cada uma das áreas acima citadas está contida no Capítulo 5 do presente trabalho de pesquisa.

1.4 JUSTIFICATIVA

De acordo com SCHULMEISTER (2001), um padrão nada mais é que um meio utilizado na definição de especificações técnicas para um determinado grupo de produtos, com a finalidade de assegurar a compatibilidade entre os produtos de um mesmo grupo. Este pode ser desenvolvido para uso a nível mundial, regional (um continente ou parte dele), nacional (um único país) e, até mesmo, institucional (uma única instituição). Por definição, não é um conjunto de leis ou regulamentações mas pode vir a ser citado por elas, tornando-se, assim, legalmente obrigatório.

O Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) constante do Decreto Nº 89.817, de 20 de Junho de 1984, é, portanto, obrigatório e deve ser empregado por todas as entidades públicas e privadas, produtoras e usuárias de serviços cartográficos ou de natureza cartográfica e de atividades correlatas do Brasil. O referido padrão, no entanto, possui limitações, que serão melhor explicitadas no Capítulo 3.

Assim, uma vez que os resultados obtidos com o emprego da técnica ALS são utilizados como suporte à geração de modelos digitais tridimensionais da superfície do terreno, posteriormente utilizados no processo de produção de ortofotocartas ou na geração automática de curvas de nível, pode-se afirmar que

aqueles constituem um produto de natureza cartográfica e, portanto, estão sujeitos ao PEC estabelecido pelo referido decreto. Daí a importância de uma análise mais profunda de tais resultados.

Outro aspecto relevante da presente pesquisa diz respeito ao tratamento científico dispensado aos resultados obtidos com os sistemas ALS. Nas consultas à bibliografia disponível, verificou-se que existem tendências e que as pesquisas realizadas mundialmente seguem linhas bastante distintas. Entre elas:

- O desenvolvimento de algoritmos para a filtragem dos dados coletados e pré-processados, visando a separação entre os dados relativos à superfície nua do terreno e os relativos aos objetos detectados sobre esta superfície.
- O desenvolvimento de algoritmos para a extração de feições, normalmente associando dados provenientes do emprego da técnica ALS aos dados provenientes do emprego de técnicas fotogramétricas ou de sensoriamento remoto convencionais.
- O mapeamento de corredores, tais como linhas de transmissão de energia, dutos, estradas, entre outros.
- A modelagem tridimensional urbana, normalmente associando dados provenientes do emprego da técnica ALS aos dados provenientes de levantamentos fotogramétricos terrestres e/ou aéreos convencionais.
- Estudos florestais, objetivando determinar algumas características estruturais da cobertura vegetal.

Além disso, uma pesquisa realizada em 1999 pela *Organisation Européenne d'Etudes Photogrammétriques Expérimentales* (OEEPE) junto a 79 organizações de 32 países da Europa, constatou que, das organizações pesquisadas, apenas 18% encontravam-se utilizando a técnica ALS para fins de mapeamento, enquanto outros

19%, encontravam-se avaliando a qualidade do seu emprego na cartografia, tendo seu interesse voltado, principalmente, para a modelagem 3D urbana.

Isto significa, que diversos sistemas ALS tiveram seus resultados avaliados em pesquisas conduzidas com o objetivo de comprovar a adequação de tais sistemas a determinadas aplicações. A necessidade de tal comprovação, por parte dos pesquisadores, é consequência da não existência de uma padronização acerca da precisão e confiabilidade com que os dados ALS são obtidos e de recomendações para os diferentes parâmetros considerados adequados a uma determinada aplicação (PETZOLD & AXELSSON, 2000).

Por outro lado, o Sub-Comitê LIDAR, da Divisão de Aplicações Fotogramétricas da *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS), tem focalizado seus esforços na profissionalização da prática da altimetria laser uma vez que o seu rápido desenvolvimento comercial, nos últimos cinco anos, criou a necessidade do estabelecimento de diretrizes para o planejamento, implementação, processamento, avaliação e controle de qualidade apropriados aos produtos ALS. Tais diretrizes pretendem especificar formatos para a comercialização dos dados, parâmetros para a análise da precisão destes dados e rotinas para a calibração dos sensores.

Consultas à bibliografia disponível revelaram, ainda, que avaliações acerca da qualidade dos resultados de diferentes sistemas ALS foram realizadas com base nos dados coletados pelos primeiros sistemas disponibilizados para o mercado. Entre eles, o ALTM 1020 da Optech Inc. - Canadá (1995), o TopoSys da TopoSys GmbH - Alemanha (1995) e o TopEye da Saab Survey Systems AB - Suécia (1996). Testes para verificação da qualidade dos resultados obtidos com sistemas mais modernos, tecnicamente aprimorados e teoricamente mais precisos, têm sido realizados pelas

organizações que os adquirem, com o intuito de confirmar, pura e simplesmente, os valores especificados por cada fabricante.

Assim, o sistema ALTM 2025, desde que passou a ser empregado na geração de produtos cartográficos, em território nacional, não teve seus resultados analisados cientificamente e tampouco acordados aos padrões de exatidão estabelecidos para a cartografia brasileira. Não se pode ignorar o fato de que a introdução de tal sistema, no mercado nacional, requer que seus resultados sejam verificados.

Tal fato revela, portanto, a importância desta pesquisa tanto para as empresas brasileiras que atualmente oferecem serviços de mapeamento com o emprego da técnica ALS, como para os usuários dos produtos advindos da execução de tais serviços.

1.5 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo principal e geral a proposição de um método para a análise da qualidade dos resultados de qualquer sistema de varredura laser (*laserscanner*) aerotransportado, tendo como base suas principais características de funcionamento e operação e os padrões impostos pela legislação vigente.

Como objetivos específicos, podem ser enumerados:

- 1) Desenvolver e descrever o método para a análise da qualidade dos resultados de um sistema ALS.
- 2) Aplicar o método a diferentes conjuntos de dados ALS obtidos no território brasileiro.
- 3) Utilizar indicadores de qualidade que permitam confrontar os resultados das avaliações com o PEC, bem como, classificar os produtos ALS

disponibilizados segundo este padrão.

- 4) Verificar se os resultados das avaliações concordam com as especificações do fabricante do sistema avaliado.

1.6 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO DE PESQUISA

Para o desenvolvimento do presente trabalho de pesquisa, este foi estruturado em sete capítulos, descritos na seqüência.

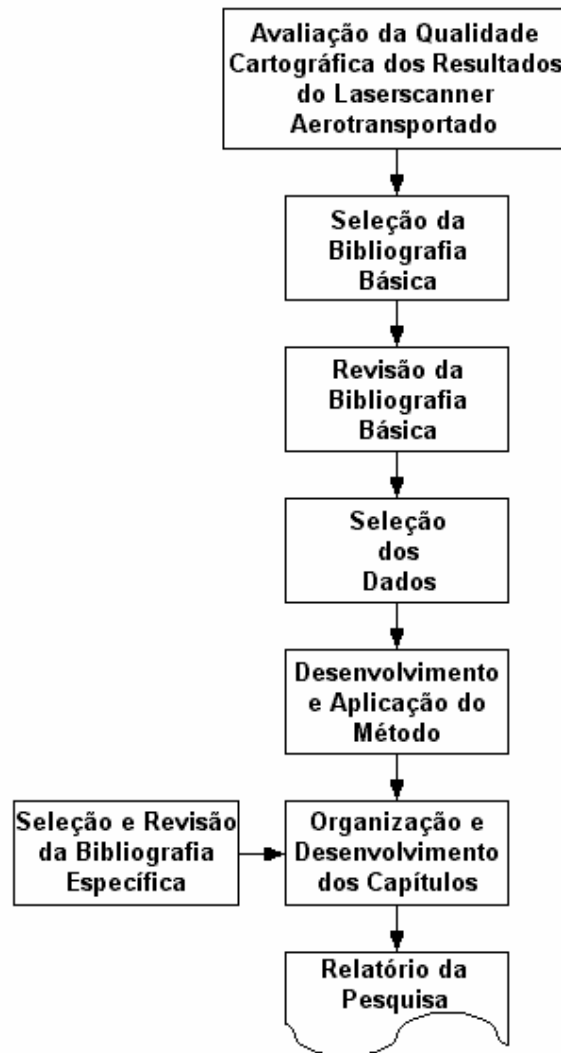
- Capítulo 1: especifica o problema a ser solucionado durante a pesquisa, justificando sua relevância para a ciência e apontando suas limitações, bem como, apresenta os objetivos (geral e específicos), as hipóteses formuladas e suas variáveis.
- Capítulo 2: compreende a revisão de toda bibliografia pesquisada acerca da técnica de varredura laser aerotransportada. Este constitui um capítulo importante, uma vez que não existem livros (nacionais ou estrangeiros), tratando especificamente deste tema.
- Capítulo 3: compreende pontos importantes da legislação cartográfica atualmente em vigor, no Brasil, bem como, traz algumas considerações importantes acerca desta legislação.
- Capítulo 4: aprofunda os conceitos pesquisados no Capítulo 2, relativamente aos erros inerentes ao processo de obtenção e ao processamento dos dados obtidos por meio da técnica de varredura laser aerotransportada. Relaciona a qualidade cartográfica à legislação vigente, bem como, aos conceitos de precisão e acurácia.
- Capítulo 5: compreende o levantamento e a descrição dos dados selecionados para a pesquisa, relativamente àqueles derivados do

emprego da técnica de varredura laser aerotransportada e àqueles derivados de outras técnicas, como a fotogramétrica e a topográfica. As características do sistema de varredura laser empregado na obtenção daqueles dados também encontram-se descritas neste capítulo.

- Capítulo 6: compreende as etapas do método proposto para avaliação da qualidade geométrica dos resultados (ou produtos) obtidos com o emprego da técnica de varredura laser aerotransportada, bem como, a aplicação do referido método aos dados selecionados e descritos no Capítulo 5. Apresenta ainda uma análise dos resultados obtidos da aplicação do método proposto.
- Capítulo 7: apresenta as principais conclusões do trabalho, em função da análise dos resultados obtidos da aplicação do método proposto no Capítulo 6. Apresenta ainda algumas considerações importantes acerca das acurácias absolutas alcançadas, sua relação com o PEC e com as acurácias estabelecidas pelos fabricantes de sistemas de varredura laser.

Os Capítulos 2 a 6 constituem, portanto, o procedimento metodológico da pesquisa e evidenciam, além da bibliografia revisada, os dados selecionados e o método proposto e aplicado, sendo a análise dos resultados obtidos do emprego do referido método, de natureza puramente quantitativa. Para melhor visualizar as etapas compreendidas pela metodologia adotada, apresenta-se, a seguir, um fluxograma.

FIGURA 1.1 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA



2 A TÉCNICA ALS

2.1 PRINCÍPIOS

A técnica ALS compreende a operação de um sistema que integra uma série de sensores que, juntos, permitem determinar a posição tridimensional georeferenciada de pontos amostrados sobre a superfície do terreno.

Para ACKERMANN (1999), tal técnica estabeleceu-se com sucesso, nos últimos anos, por ter sido o seu desenvolvimento tecnologicamente dirigido.

Isto significa, que se não fosse pela incorporação de diversas descobertas científicas e diferentes tecnologias, casadas em um único e complexo pacote de componentes eletrônicos (FOWLER, 2001), o emprego da referida técnica não seria possível. Assim, dentre as descobertas científicas e tecnológicas utilizadas pela técnica ALS, pode-se citar:

- O desenvolvimento dos lasers de alta potência que operam na região do infravermelho próximo, comprimento de onda que é melhor refletido pelos objetos que compõem a superfície do terreno (dependendo das propriedades físicas destes objetos) e que faz com que um sistema ALS capte e registre mais facilmente os sinais emitidos que retornam para o sensor.
- O aprimoramento das técnicas de posicionamento utilizando GPS, marcado pelos recentes avanços alcançados pelas metodologias *Kinematic Ambiguity Resolution* (KAR) e *Real Time Kinematic* (RTK) (pós-processado), permitindo que a posição relativa de um receptor em movimento (em relação a um outro fixo) seja determinada com precisão da ordem de poucos centímetros (SCHERZINGER et al., 2001).

- O desenvolvimento dos giroscópios a laser (*Ring Laser Gyro* - RLG), base para o funcionamento dos modernos sistemas de navegação inercial (*strapdown* INS) (SCHERZINGER et al., 2001).
- O desenvolvimento da tecnologia *Direct Georeferencing* (DG) por meio da integração GPS/INS, o que possibilitou a medida direta da posição e dos parâmetros de orientação de um sensor remoto, a fim de estabilizar e registrar os dados coletados, em coordenadas geográficas (SCHERZINGER et al., 2001).

Basicamente, um sistema ALS compreende dois segmentos: o aéreo e o terrestre. O primeiro consiste de toda a eletrônica e *firmware* (*software* dedicado a um *hardware*) responsáveis pela medida e registro dos dados coletados pelos diversos sensores, sendo normalmente denominado "sistema ativo" (OPTECH, 2000a). O segundo consiste dos *hardwares* e *softwares* responsáveis pela transformação dos referidos dados coletados em pontos de coordenadas 3D georeferenciadas, sendo denominado "sistema reativo" (OPTECH, 2000a).

O Segmento Aéreo, de modo geral, compreende as unidades descritas na seqüência.

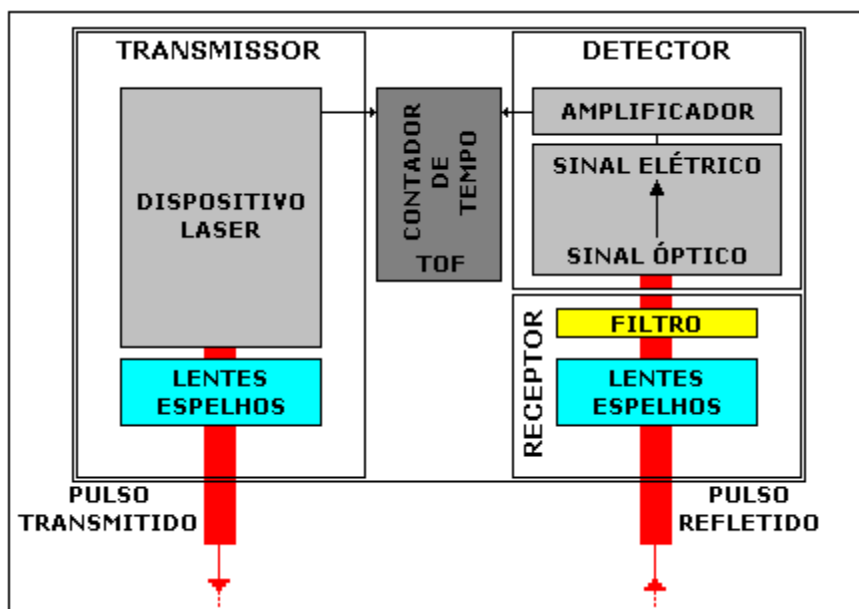
2.1.1. Unidade Laser de Medida

A "unidade laser de medida" (WEHR & LOHR, 1999) ou *Laser Rangefinder* (LRF) (STERNER, 1997; AXELSSON, 1998a e 1998b; BALTSAVIAS, 1999c) é o dispositivo responsável pela medida das distâncias entre o sistema ALS e a superfície do terreno.

BALTSAVIAS (1999c) descreve o LRF como um dispositivo que compreende, basicamente, um laser pulsado, a óptica (lentes e espelhos) de transmissão e

recepção dos pulsos laser, um detector, um amplificador e um contador de tempo (figura 2.1). CARTER et. al. (2001) e ARGALL & SICA (2002) afirmam que o LRF utilizado por um sistema ALS também é dotado de um filtro óptico ou espectral de interferência, cuja função é permitir que somente o comprimento de onda específico, emitido pelo laser, alcance o detector.

FIGURA 2.1 - ELEMENTOS DE UM LRF



FONTE: Criada com base em ARGALL & SICA (2002)

Assim, as distâncias entre o sistema ALS e a superfície do terreno são determinadas em função da velocidade e do tempo de viagem de cada pulso laser emitido e recebido de volta pelo LRF. Este método de medida de distâncias é bastante conhecido, na literatura, como *Time-of-Flight* (TOF) (WEHR & LOHR, 1999; BERARDIN et al., 2000; FLOOD, 2001; BURTCHE, 2002).

É importante ressaltar que o LRF, por fazer parte de um sistema que é aerotransportado, tem os seus elementos ópticos de transmissão e recepção dos pulsos laser direcionados para a superfície do terreno, ou seja, apontando verticalmente para baixo, em direção ao Nadir.

2.1.2. Unidade de Varredura

A unidade de varredura ou *scanner* é o dispositivo responsável pela deflexão dos pulsos laser emitidos pelo LRF, transversalmente à linha de vôo, e, como resultado, "uma faixa do terreno é amostrada ao longo desta linha" (WEVER & LINDENBERGER, 1999).

Todo *scanner* emprega um princípio ou método de varredura e, de cada princípio ou método, resulta um padrão de varredura característico (forma como se encontram distribuídos, sobre a faixa do terreno amostrada, os pontos medidos).

O quadro 2.1, criado a partir de informações contidas em BALTSAVIAS (1999c) e WEHR & LOHR (1999), identifica os princípios de varredura mais comuns entre os sistemas ALS existentes e seus correspondentes padrões de varredura.

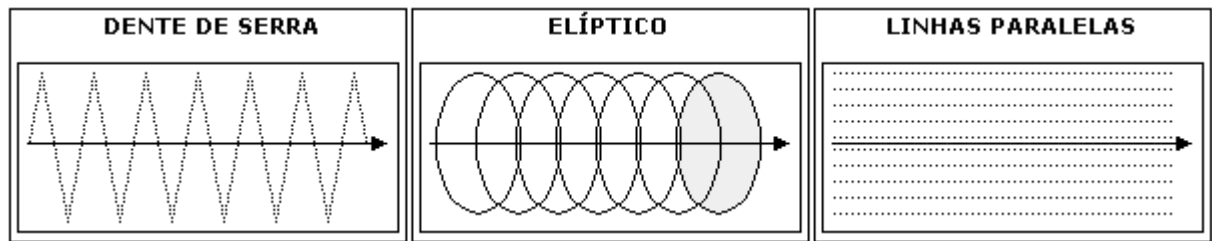
QUADRO 2.1 - PRINCÍPIOS E PADRÕES DE VARREDURA

| VARREDURA | | |
|---------------------------------------|-----------------|---|
| PRINCÍPIO | PADRÃO | |
| | Direção | Tipo |
| <i>Oscillating Mirror</i> | Bidirecional | Zigue-Zague Dente de Serra Senoidal |
| <i>Oscillating or Rotating Mirror</i> | Unidirecional | Linhas Paralelas |
| <i>Nutating Mirror</i> | Multidirecional | Elíptico Espiral |
| <i>Two-Axis Galvanometer</i> | Bidirecional | Zigue-Zague |
| | Unidirecional | Meândrico Linhas Paralelas |
| <i>Optical Fiber</i> | Unidirecional | Linhas Paralelas |
| <i>Profiler</i> | Unidirecional | Perfil Longitudinal |

FONTES: BALTSAVIAS (1999c) e WEHR & LOHR (1999)

Por sua vez, a figura 2.2, criada a partir de ilustrações contidas em LOHMANN (2003), ilustra os padrões de varredura apresentados no quadro acima (obs.: a seta indica a direção do vôo).

FIGURA 2.2 - PADRÕES DE VARREDURA



FONTE: Criada com base em LOHMANN (2003)

BURTCH (2002) afirma que os *scanners* que funcionam à base de espelhos, normalmente, encontram-se integrados à óptica do transmissor de pulsos laser (LRF). Ambos (LRF e *scanner*) fazem parte de um componente do sistema ALS que alguns autores denominam "cabeça do sensor" (OKUBO, 2001; VENEZIANO et al., 2002).

Segundo WEVER & LINDENBERGER (1999), a deflexão dos pulsos laser emitidos pelo LRF é feita a intervalos angulares regulares. A cada deflexão corresponde, portanto, uma distância angular relativa ao deslocamento sofrido pelo espelho no instante do disparo do dispositivo laser. Tanto a referida distância angular como o intervalo de tempo de viagem do pulso laser, são registrados pelo sistema.

2.1.3. Unidade de Posicionamento

A unidade de posicionamento é normalmente constituída por um receptor GPS de dupla freqüência cuja antena está localizada na parte superior externa da aeronave utilizada como plataforma e, portanto, deslocada (*offset*) em relação à unidade de medida e varredura (cabeça do sensor), geralmente acomodada numa abertura localizada na parte inferior desta mesma aeronave.

Tal unidade de posicionamento requer a utilização conjunta de outro receptor GPS, também de dupla freqüência, localizado sobre a superfície do terreno, numa

estação de referência (ponto de coordenadas conhecidas).

Desta forma, os receptores GPS (aéreo e terrestre), trabalhando no modo diferencial (DGPS), são capazes de fornecer o vetor translacional para a reconstrução da trajetória da aeronave (e, conseqüentemente, do sistema ALS como um todo), para cada faixa de vôo amostrada. Os dados coletados pelo receptor GPS, a bordo da aeronave, também são registrados pelo sistema.

É importante ressaltar que o receptor GPS utilizado por um sistema ALS encontra-se integrado, física e logicamente, à unidade de medida inercial (descrita no item 2.1.4) utilizada por este mesmo sistema, não devendo ser confundido com o receptor GPS normalmente utilizado pela aeronave, para navegação.

2.1.4. Unidade de Medida Inercial

A unidade de medida inercial é um dispositivo que controla a orientação ou atitude da aeronave e é normalmente referida, por diversos autores, como IMU, INS ou IRS.

SCHERZINGER et al. (2001) observam, porém, que os termos IMU e INS não são sinônimos. Segundo estes mesmos autores, a IMU é, de fato, um dos principais componentes de um sistema INS, que também compreende outro componente igualmente importante denominado *Navigation Processor* (NP).

LITHOPOULOS (1999) descreve a IMU como uma unidade que compreende: três acelerômetros, três giroscópios e um conversor de sinal, além de outros componentes eletrônicos. Esta tem por objetivo medir os movimentos dinâmicos da aeronave (sobre três eixos ortogonais entre si), levando em consideração as alterações de atitude causadas por flutuações nos seus ângulos de orientação (*roll*, *pitch* e *heading* ou *yaw*). Tais movimentos são continuamente monitorados e

registrados pelo sistema e, posteriormente correlacionados às informações da trajetória GPS, a fim de derivar informações acuradas acerca da posição de cada pulso laser, no instante de sua emissão pelo LRF.

O uso integrado de unidades GPS e INS é, atualmente, condição *sine qua non* para o emprego da técnica ALS. Neste caso, as IMUs utilizadas são compactas, leves e precisas, podendo ser posicionadas junto ao instrumento laser de medida e varredura (localizado na cabeça do sensor), sem maiores problemas.

Segundo SCHERZINGER et al. (2001), a Applanix (empresa canadense) foi a primeira organização a fabricar unidades que integram GPS de precisão a tecnologias inerciais avançadas especificamente para sistemas comerciais de mapeamento.

FIGURA 2.3 - UNIDADE POS™/AV DA APPLANIX



FONTE: Applanix - <http://www.applanix.com> - 09/07/2003

As primeiras unidades, para uso exclusivo em plataformas terrestres, surgiram em 1993, enquanto as apropriadas para uso em plataformas aéreas tornaram-se disponíveis a partir de 1997. Tais unidades, conhecidas como *Position and Orientation System for Airborne Vehicles* (POS™/AV) (figura 2.3), foram, efetivamente, as responsáveis pelo uso dos sistemas ALS como ferramentas de mapeamento (LITHOPOULOS, 1999).

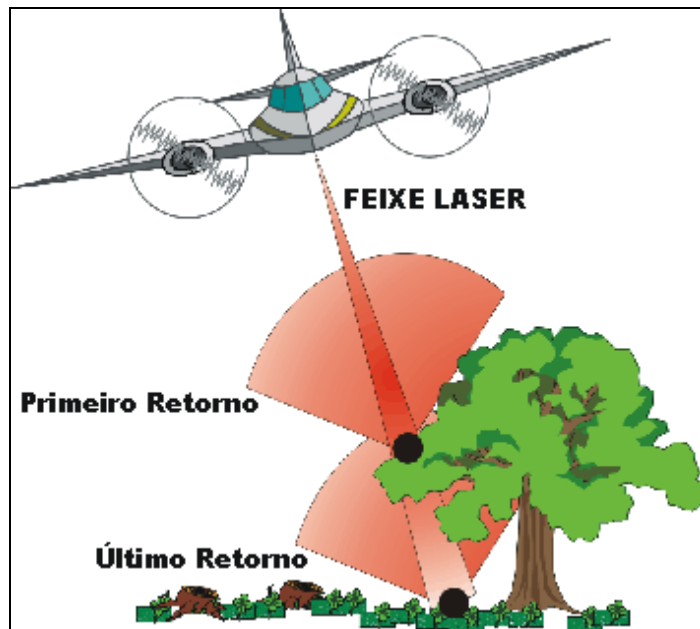
2.1.5. Unidade de Imageamento

Um sistema ALS, apesar de classificado como um sistema de sensoriamento remoto ativo, não é capaz de registrar, na forma de imagem, os pontos amostrados sobre a superfície do terreno.

Isto se deve ao fato de os sensores que integram tal sistema serem capazes de registrar apenas os dados relativos à posição e à atitude da plataforma, além do intervalo de tempo e da inclinação do *scanner*, para cada pulso laser emitido.

Uma vez que cada pulso laser, em função da divergência do seu feixe, acaba atingindo a superfície do terreno não em um único ponto mas, sobre uma área de tamanho predeterminado, este feixe pode, simultaneamente, atingir parte de um objeto localizado sobre aquela superfície (ex.: a copa de uma árvore ou o telhado de uma edificação) e parte da superfície do terreno propriamente dita (ex.: solo). Assim, a parte do feixe que atinge e é refletida por um determinado objeto (mais próximo), chega antes ao sensor e é registrado por ele como o primeiro retorno (ou eco) do pulso emitido, enquanto a parte do feixe que atinge a superfície do terreno (mais distante) e que retorna ao sensor logo depois, é registrado por ele como o último retorno daquele mesmo pulso. Este princípio encontra-se ilustrado na figura 2.4.

FIGURA 2.4 - RETORNOS DE UM PULSO LASER



FONTE: Adaptada de IPF/TU Vienna (2003)

A capacidade de registrar múltiplos retornos (mínimo 2 e máximo 5) por pulso é característica dos sistemas ALS mais modernos, pois, os primeiros modelos lançados no mercado, registravam apenas um dos retornos mencionados (primeiro ou último).

A tecnologia que permite o registro de múltiplos retornos por pulso permite, também, o registro da intensidade ou reflectância de cada um destes retornos.

Portanto, na prática, apesar de um sistema ALS não ter sido desenvolvido para a captura direta de imagens da superfície do terreno, os resultados do processamento dos dados coletados permite gerar os seguintes tipos de imagens:

- Imagem de Distância ou de Elevação (*Range Image* ou *Elevation Image*)

Esta imagem é formada por uma matriz de pontos cujas posições são determinadas pelas suas coordenadas 2D geo-referenciadas (E, N). A cada ponto é atribuído um valor de cor que corresponde ao seu afastamento em relação ao sensor, ou seja, que corresponde à sua altitude (H). Normalmente, a escala de cores adotada para a representação da referida

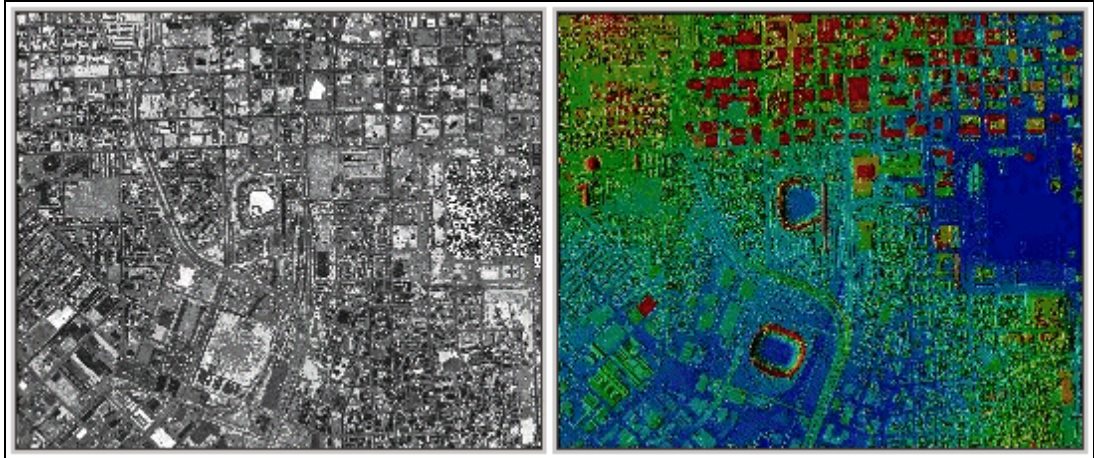
matriz de pontos está compreendida entre o vermelho e o azul. Assim, os pontos vermelhos devem ser interpretados como aqueles que se encontravam mais próximos ao sensor durante a varredura (pontos de maior altitude), enquanto os pontos azuis devem ser interpretados como aqueles que se encontravam mais afastados (pontos de menor altitude). Os pontos da superfície do terreno que absorvem grande parte da radiação laser emitida e que, nestes casos, não retornam qualquer tipo de sinal ao sensor, são normalmente representados na cor preta.

- Imagem de Intensidade (*Intensity Image*)

Esta imagem também é formada por uma matriz de pontos cujas posições são determinadas pelas suas coordenadas 2D geo-referenciadas (E, N). Porém, ao invés de atribuir um valor de cor que corresponde à altitude (H) de cada ponto, é atribuído um valor de cor (normalmente numa escala de 256 tons de cinza) que corresponde à quantidade de luz laser refletida por cada ponto amostrado sobre a superfície do terreno.

A figura 2.5 apresenta imagens de intensidade e de elevação (relativas ao primeiro retorno) de uma mesma área da cidade de Baltimore-MD (EUA), obtidas de uma varredura realizada em 09/1999 com o sistema ALTM 1210 (Optech Inc.).

FIGURA 2.5 - IMAGENS DE INTENSIDADE E DE ELEVAÇÃO



FONTE: OPTECH (2001)

Para FOWLER (2001), 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 (1998), 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.

Esta é uma das razões pelas quais os sistemas ALS vêm sendo comercializados integrados a sensores imageadores passivos de diferentes tipos (câmaras de vídeo analógicas ou digitais, câmaras digitais não métricas, câmaras métricas analógicas ou digitais, sensores multi e hiperespectrais).

De acordo com BALTSAVIAS (1999c), as câmaras de vídeo que normalmente acompanham os sistemas ALS têm por objetivos documentar a superfície do terreno levantada e permitir a inspeção visual dos vôos realizados. Tais câmaras, assim como algumas das unidades descritas anteriormente (LRF, *scanner* e IMU), encontram-se acomodadas na cabeça do sensor e, as imagens por elas obtidas, são registradas e marcadas temporalmente de forma a permitir que sejam posteriormente equiparadas aos dados coletados.

2.1.6. Unidade de Controle

A unidade de controle é responsável, basicamente, pelo suprimento de energia necessária ao funcionamento das demais unidades, pela contagem e marcação do tempo relativo a cada medida realizada pelo sistema e, pelo armazenamento dos dados coletados (LRF, *scanner*, GPS/IMU e câmara).

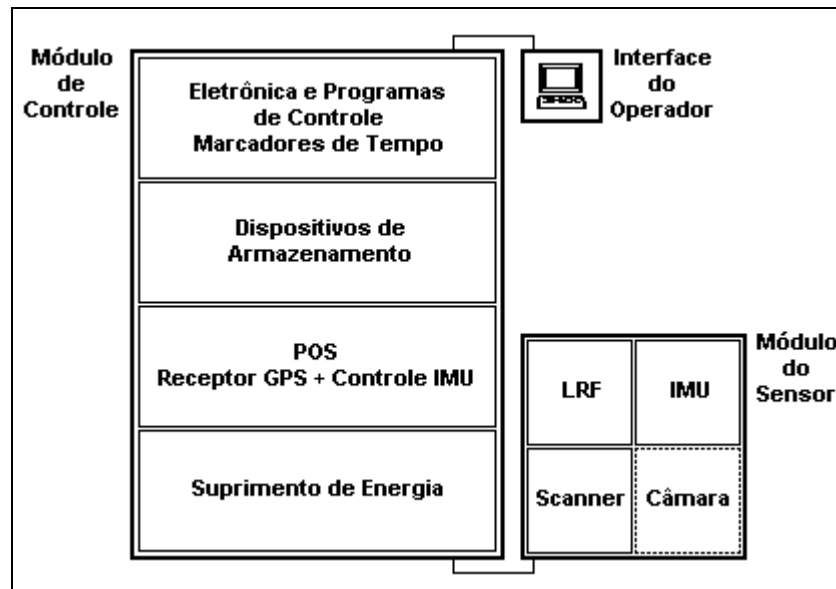
Uma unidade de controle compreende, portanto, os seguintes elementos:

- a) eletrônica e programas para o controle do LRF, *scanner*, GPS/IMU (POS) e câmara (incluindo os marcadores de tempo);
- b) módulo para o suprimento de energia;
- c) dispositivos para o registro dos dados coletados (ex.: cartão PCMCIA para os dados GPS/IMU, fita digital 8mm para os dados laser, mini DVC para as imagens e, mais recentemente, HDs);
- d) interface do operador (ex.: *laptop*);
- e) cabos e conectores.

FLOOD (2001) aponta para o fato de que a maioria dos sistemas ALS opera lasers classe IV (ou seja, aqueles que apresentam maior risco de danos à pele e aos olhos humanos) e, portanto, tais sistemas requerem alguns controles padrões de engenharia para operarem com segurança. Estes controles incluem interruptores e engrenagens de segurança (que não permitem o disparo do laser abaixo de determinadas alturas de vôo) além de etiquetas e avisos que alertam para os perigos de uma possível exposição à radiação laser.

A figura 2.6 ilustra, esquematicamente, como se encontram integradas as unidades que compõem o segmento aéreo de um sistema ALS.

FIGURA 2.6 - SISTEMA ALS: SEGMENTO AÉREO (MÓDULOS)



FONTES: Criada com base em LOHR (1999), WEHR & LOHR (1999) e OPTECH (2000a)

O Segmento Terrestre, por sua vez, compreende as seguintes unidades.

2.1.7. Estações de Referência Terrestres

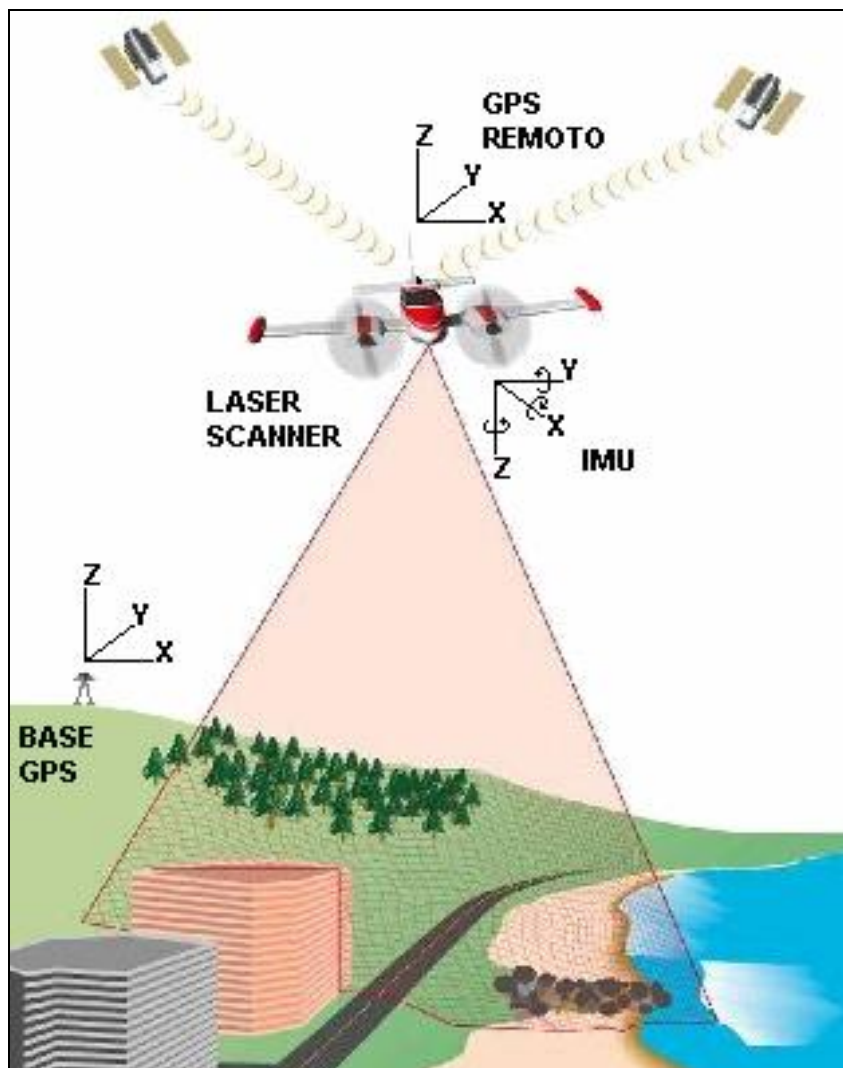
Na técnica ALS, diferentemente da técnica fotogramétrica convencional (onde é possível estabelecer um controle terrestre por meio de pontos fotoidentificáveis), "os levantamentos são conduzidos somente com o uso de estações base GPS" (LITHOPOULOS, 1999).

Assim, as observações feitas nestas estações e na estação móvel (aeronave), são integradas e pós-processadas a fim de "referenciar os pontos laser medidos a um sistema de coordenadas externo" (ACKERMANN, 1999).

O número de estações base ou de referência, bem como, sua distribuição e distâncias em relação à plataforma, dependem da finalidade do levantamento realizado (BALTSAVIAS, 1999b).

Um esquema do funcionamento integrado do segmento aéreo e das estações de referência terrestres é apresentado pela figura 2.7.

FIGURA 2.7 - FUNCIONAMENTO INTEGRADO DE UM SISTEMA ALS



FONTES: Adaptada de OPTECH (2000a) com base em TURTON & JONAS (1999), HARDING (2000) e BURTCCH (2002)

2.1.8. Unidade de Processamento

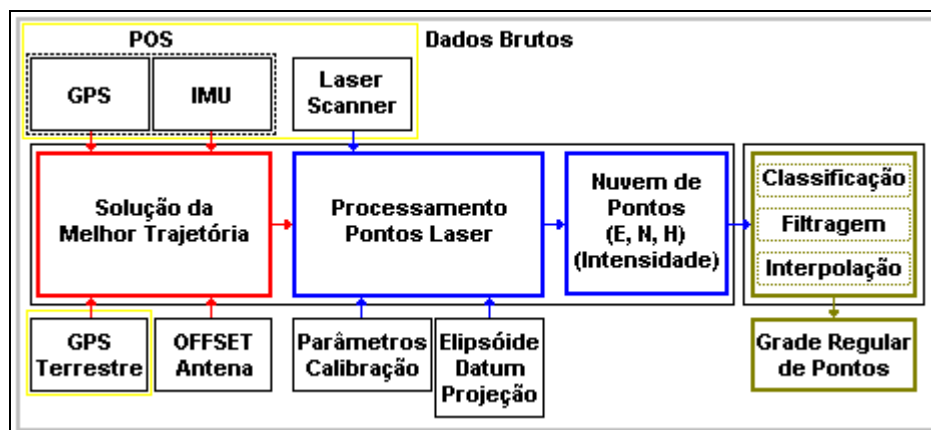
O processamento dos dados coletados por um sistema ALS compreende um conjunto de *hardwares* e *softwares* necessários à transformação dos "dados brutos" (KILIAN et al., 1996; KNABENSCHUH & PETZOLD, 1999; ROTTENSTEINER et al., 2002) em uma grade regular de pontos 3D geo-referenciados.

Fazem parte do referido conjunto: computadores; dispositivos de entrada (leitura dos dados coletados) e saída (registro e visualização dos dados transformados); dispositivos de segurança contra cópias não autorizadas (*hardlocks*) dos programas de processamento; e, os programas de processamento propriamente ditos.

Uma vez que a quantidade de dados coletados é bastante grande (devido às características dos vários sensores envolvidos no emprego da técnica ALS), os computadores utilizados no processamento destes dados devem obedecer a uma certa configuração mínima em relação, principalmente, à velocidade de processamento e memória disponível.

A figura 2.8 apresenta as principais etapas envolvidas no processamento dos dados coletados por um sistema ALS.

FIGURA 2.8 - PROCESSAMENTO DOS DADOS ALS - ETAPAS



FONTES: Criada com base em OKUBO (2001), SEO & HAN (2001) e OPTECH (2002a)

Assim, é por meio da solução da melhor trajetória (dada pela integração DGPS/IMU combinada a parâmetros de montagem, como o *offset* da antena) que os dados *laserscanner* coletados (distâncias e ângulos de varredura) são transformados em uma nuvem de pontos de coordenadas 3D geo-referenciadas (numa primeira etapa, relativamente ao sistema geodésico WGS-84, próprio do GPS e, numa etapa

posterior, relativamente ao sistema geodésico local, definido por um elipsóide, um datum e uma projeção cartográfica).

Para WEHR & LOHR (1999), o geo-referenciamento (ou geocodificação) dos pontos ALS coletados requer a exata sincronização das medidas de todos os sensores envolvidos. A medida do tempo é, portanto, tão importante para a aplicação da técnica ALS, que esta é freqüentemente apontada como o quarto componente do sistema (os outros três seriam o GPS, a IMU e o *laserscanner*).

Por sua vez, as etapas de classificação, filtragem e interpolação envolvem a discriminação dos pontos (distinção entre os pontos coletados sobre a vegetação ou edificações daqueles coletados sobre a superfície nua do terreno) e a conseqüente redução e reamostragem (gradeamento) destes pontos (função dos objetivos do levantamento). Tais etapas não precisam, necessariamente, ser realizadas nesta ordem, podendo, inclusive, ser realizadas simultaneamente, depende dos algoritmos ou programas de processamento empregados.

Os programas utilizados no processamento das etapas anteriormente citadas são apontados por AXELSSON (1999), FLOOD (2001) e VAN DER VEGT & HOFFMANN (2001) como "proprietários". Tais programas são, portanto, desenvolvidos pelos fabricantes dos sistemas ALS (ou seus associados) exclusivamente para os compradores destes sistemas, sendo que, os algoritmos empregados na transformação dos dados brutos em uma nuvem de pontos 3D geo-referenciados, raramente são divulgados. Como exemplos de programas proprietários podem ser citados: o REALM, utilizado no processamento dos dados coletados pelos sistemas ALTM da Optech Inc.; e, o TopPIT (compreendendo vários módulos), utilizado no processamento dos dados coletados pelo sistema FALCON da TopoSys GmbH.

É importante ressaltar que nem todos os programas proprietários fornecidos com os sistemas ALS incluem algoritmos para a classificação, filtragem e/ou interpolação da nuvem de pontos laser processados. Muitas vezes, uma ou mais destas etapas, para serem realizadas, requerem a aquisição de um outro tipo de programa disponível no mercado. Como exemplos, podem ser citados os programas TerraModeler™ e TerraScan™ (TerraSolid Ltd.), capazes de processar dados provenientes de sistemas de varredura laser aerotransportados ou terrestres, de projetos fotogramétricos e, até mesmo, de sistemas batimétricos ou hidrográficos.

Por ser executado somente após o levantamento, o processamento dos dados brutos ALS é normalmente denominado "pós-processamento" (pela grande maioria dos autores). Autores como LOHR & EIBERT (1995) e THIEL & WEHR (1999) referem-se a ele como "processamento *off-line*". Outras denominações também utilizadas são "processamento pós-missão" e "processamento pós-vôo".

2.2 PARÂMETROS DE UM SISTEMA ALS

Para FOWLER (2001), um sistema ALS é definido, basicamente, pelos parâmetros apresentados a seguir.

Relativamente ao dispositivo laser empregado:

- Comprimento de Onda do Laser (*l*)

É função do tipo de laser empregado. Geralmente, este é um laser de estado sólido do tipo Nd:YAG, Nd:YLF ou Nd:YVO₄. Sua unidade de medida é um submúltiplo do metro (m), normalmente, o nanometro (nm) ou o micrometro (μm).

- Divergência do Feixe Laser (*g*)

É o ângulo sob o qual o feixe laser se espalha após ter sido emitido. Este é função do comprimento de onda e do diâmetro de abertura do laser (d). Diversos autores, entre eles KELLY (1994), HANCOCK et al. (1998) e WEHR & LOHR (1999), o denominam IFOV (*Instantaneous Field of View*). Sua unidade de medida é um submúltiplo do radiano (rad), normalmente, o miliradiano (mrad). Em BALTSAVIAS (1999b), a divergência mínima do feixe laser (limitada pela difração) é definida por:

$$g = 2.44 \frac{\lambda}{d} \quad (2.1)$$

- Duração do Pulso Laser (t_p)

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

- 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 (1999b), para uma dada potência média, quanto maior a taxa de repetição do pulso laser, menor a sua energia. Sua unidade de medida é um submúltiplo do joule (J), normalmente, o microjoule (μJ).

- Potência Média do Pulso Laser (P)

É função da duração do pulso laser e de sua taxa de repetição (WEHR & LOHR, 1999). Também constitui um dos parâmetros limitantes do alcance máximo de um sistema ALS. De acordo com BALTSAVIAS (1999b), 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. Sua unidade de medida é o watt (W).

- Taxa de Repetição do Pulso Laser (F)

Expressa o número de pulsos emitidos por segundo. É freqüentemente designada pelas siglas PRF (*Pulse Repetition Frequency*) ou PRR (*Pulse Repetition Rate*). Sua unidade de medida é um múltiplo do hertz (Hz), normalmente, o quilohertz (kHz).

Relativamente ao *scanner* empregado:

- Ângulo de Varredura (θ)

Corresponde ao ângulo máximo de abertura ou giro do *scanner*. Diversos autores, entre eles AXELSSON (1999), FLOOD (1999) e DUBAYAH et al. (2000), referem-se ao ângulo de varredura como FOV (*Field of View*). Sua unidade de medida é o grau ($^{\circ}$).

- Freqüência de Varredura (f_{sc})

Ou freqüência do *scanner*, expressa o número de vezes que o *scanner* percorre o FOV (movimento de ida e volta) em um segundo (FRASER et al., 2000). Sua unidade de medida é o hertz (Hz).

- Padrão de Varredura

Depende do sistema ALS utilizado. Como explicitado anteriormente, os principais são zigue-zague, linhas paralelas e elíptico. Para ACKERMANN (1999) e WEHR & LOHR (1999), estes sofrem influência da velocidade da plataforma (v), da direção do vôo e do tipo de terreno levantado.

Relativamente ao POS empregado:

- Freqüência do GPS (f_{GPS})

Expressa o número de posições coletadas e registradas pelo receptor GPS

(a bordo da aeronave) em um segundo. Sua unidade de medida é o hertz (Hz).

- Frequência do INS (f_{INS})

Expressa o número de variações em *roll*, *pitch* e *heading* detectadas e registradas pela IMU (a bordo da aeronave) em um segundo. Sua unidade de medida também é o hertz (Hz).

Relativamente à plataforma utilizada:

- Altura de Vôo Operacional (H')

Corresponde à distância vertical máxima entre a plataforma 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).

Outros parâmetros apontados por FOWLER (2001) são:

- Registro de Múltiplos Retornos

Expressa a capacidade do sistema ALS em discriminar e registrar múltiplos retornos ou ecos (normalmente o primeiro e o último) para cada pulso laser emitido.

- Registro da Intensidade

Expressa a capacidade do sistema ALS em captar e registrar a intensidade, ou valor de reflectância, de cada um dos retornos de um pulso laser emitido.

Para BALTSAVIAS (1999a), os sistemas ALS são também definidos por parâmetros que dependem dos acima citados. Entre eles:

- Largura da Faixa de Varredura (L)

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

$$L = 2.H'.\text{tg}(\theta/2) \quad (2.2)$$

- Número de Pontos por Linha Varrida (N_P)

Expressa o número de pontos laser coletados a cada linha varrida pelo *scanner*. É função da taxa de repetição do pulso laser e da frequência de varredura. Assim, para BALTSAVIAS (1999b), o número de pontos por linha varrida é definido por:

$$N_P = \frac{F}{f_{SC}} \quad (2.3)$$

- Densidade de Pontos (D)

Expressa o número de pontos laser amostrados por unidade de área. Para ACKERMANN (1999), a densidade é função da altura e velocidade da plataforma, do ângulo de varredura, da taxa de repetição do pulso laser, da direção do vôo e do tipo de terreno levantado. Sua unidade de medida são pontos por metro quadrado (pontos/m²). De BALTSAVIAS (1999b) deduz-se que a densidade de pontos por unidade de área, para uma única faixa de vôo, é:

$$D = \frac{F}{(2.H'.\text{tg}(\theta/2)).v} = \frac{F}{L.v} \quad (2.4)$$

- Espaçamento Longitudinal dos Pontos (D_{LONG})

Ou seja, ao longo da linha de vôo. É função da freqüência de varredura e da velocidade da plataforma (BALTSAVIAS, 1999b). Sua unidade de medida é o metro (m). Em BALTSAVIAS (1999b), o espaçamento longitudinal dos pontos laser coletados é definido por:

$$D_{\text{LONG}} = \frac{v}{f_{\text{SC}}} \quad (2.5)$$

- Espaçamento Transversal dos Pontos (D_{TRANS})

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 (BALTSAVIAS, 1999b). Sua unidade de medida também é o metro (m). De BALTSAVIAS (1999b) deduz-se que o espaçamento transversal dos pontos laser é:

$$D_{\text{TRANS}} = \frac{(2.H'.\text{tg}(\theta/2))}{F} . f_{\text{SC}} = \frac{L}{N_P} \quad (2.6)$$

WEHR & LOHR (1999) apontam ainda como parâmetro dependente dos citados por FOWLER (2001):

- 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 (1999b) 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 pegada laser (*laser footprint*) sobre o terreno, no caso de terreno plano e ângulo de varredura igual a zero (posição de perfilamento), é definido por:

$$D_p = H' \cdot g \quad (2.7)$$

BALTSAVIAS (1999b) e WEHR & LOHR (1999) apresentam, também, fórmulas para o cálculo do diâmetro da pegada laser para terrenos planos e inclinados e com ângulo de varredura diferente de zero.

Finalmente, pode-se acrescentar à lista de parâmetros dependentes:

- Subamostragem ou Superamostragem de Pontos (Q)

É função do diâmetro da pegada laser e do espaçamento (longitudinal e transversal) dos pontos. Sua unidade de medida é o por cento (%). Para BALTSAVIAS (1999b), a quantidade de pontos laser amostrados sobre o terreno pode ser avaliada por meio das seguintes expressões:

$$Q_{\text{LONG}} = 100 \cdot \frac{D_p}{D_{\text{LONG}}} \quad (2.8)$$

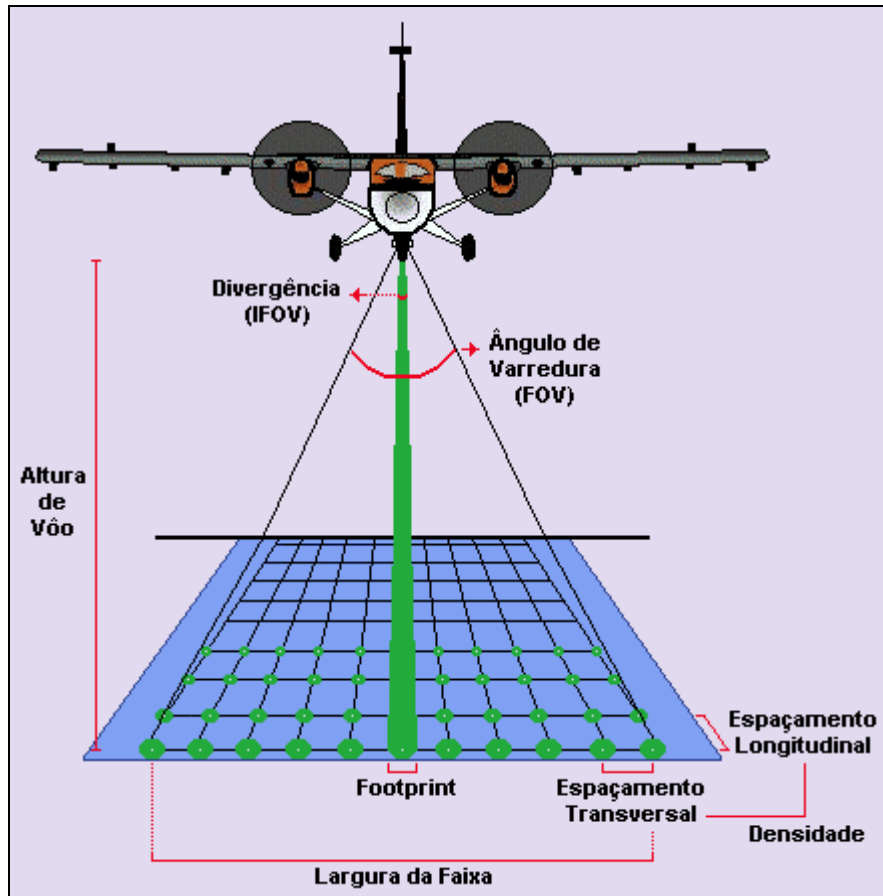
e

$$Q_{\text{TRANS}} = 100 \cdot \frac{D_p}{D_{\text{TRANS}}} \quad (2.9)$$

Se Q_{LONG} e Q_{TRANS} resultam iguais a 100%, o número de pontos amostrados é considerado ideal. Caso Q_{LONG} e Q_{TRANS} resultem inferiores a 100%, houve uma subamostragem da área varrida. Caso contrário, houve uma superamostragem.

A figura 2.9 ilustra alguns dos parâmetros descritos anteriormente.

FIGURA 2.9 - PARÂMETROS DE UM SISTEMA ALS



FONTE: Adaptada de OPTECH (2002a)

2.3 CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA ALS

Toda técnica de medição que se preocupa com a qualidade dos dados coletados e, conseqüentemente, com a qualidade dos resultados obtidos, requer que os instrumentos ou sistemas utilizados sejam periodicamente calibrados.

Para FILIN & CSATHO (1999), 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. Estes mesmos autores afirmam que a calibração dos sistemas de varredura laser aerotransportados não é trivial, pois, tudo que se tem disponível é uma nuvem de pontos 3D que não possui relação com os objetos da superfície do terreno e, é por esta razão, que

WEHR & LOHR (1999) afirmam não existirem procedimentos padrões para a calibração deste tipo de 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 fim de evitar o problema da correspondência.

A calibração da maioria dos sistemas ALS é, portanto, realizada sobre locais considerados adequados, ou seja, 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. Tais locais devem ser prévia e completamente levantados por meio de técnicas independentes e cujos resultados ofereçam melhor acurácia que aquela esperada para os dados ALS.

De fato, a calibração de um sistema ALS é realizada em duas etapas: a de laboratório e a de campo. A etapa de laboratório é realizada pelo fabricante enquanto a etapa de campo é realizada pelo proprietário do sistema ALS. Como resultado (de ambas as etapas), são computados nove componentes para a correção dos erros sistemáticos do referido sistema. São eles: três parâmetros para os ângulos de montagem do *laserscanner*, três parâmetros de translação para o GPS (*offset* da antena) e três parâmetros de rotação para o IMU (LOHMANN & KOCH, 1999).

Para MOLANDER (2001), o IMU 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.

Da mesma forma, FOWLER (2001) aconselha que os sistemas ALS sejam calibrados mais de uma vez durante aqueles projetos que requerem a varredura de grandes áreas ou faixas bastante extensas da superfície do terreno. Este mesmo autor afirma ainda que uma nova calibração deve ser realizada toda vez que o equipamento for removido e reinstalado e que um levantamento de verificação deve ser concluído periodicamente a fim de assegurar a integridade da calibração.

Conclui-se, portanto, que a calibração de cada um dos componentes de um sistema ALS é de extrema importância para a determinação da precisão do sistema como um todo (LOHMANN & KOCH, 1999).

2.4 PRODUTOS

Os produtos gerados a partir do processamento dos dados brutos coletados por um sistema ALS são, basicamente, grades ou malhas regulares de pontos 3D geo-referenciados (E, N, H).

Ressalta-se que tal processamento é totalmente automático, mesmo quando as etapas de classificação, filtragem e/ou interpolação não são realizadas pelos programas fornecidos pelos fabricantes de tais sistemas.

De acordo com WATSON (1992), quando a interpolação dos pontos laser processados é feita a intervalos fixos, o resultado é uma grade regular de pontos 3D geo-referenciados. Normalmente, tal grade pode ser visualizada, analisada e editada (relativamente a qualquer anomalia decorrente do processamento automático) pelos mesmos programas que a geraram.

Ainda de acordo com o mesmo autor, a interpolação nada mais é do que um método de geração de superfícies. Logo, as superfícies que podem ser geradas a

partir do processamento dos dados obtidos com o emprego da técnica ALS, podem ser classificadas como (MAUNE et al., 2001a):

- *Digital Elevation Model* (DEM) ou Modelo Digital de Elevação (MDE): grade de valores de elevação (z) regularmente espaçada (em x e y), referenciada a um datum (horizontal e vertical) e a um sistema de coordenadas, que representa a superfície nua do terreno (exclui a vegetação e as feições artificiais).
- *Digital Terrain Model* (DTM) ou Modelo Digital de Terreno (MDT): similar ao DEM, incorpora valores de elevação (z) de feições topográficas importantes e irregularmente espaçadas (divisores de água, fundos de vale, estradas, pontos cotados) a fim de caracterizar melhor a superfície nua do terreno.
- *Digital Surface Model* (DSM) ou Modelo Digital de Superfície (MDS): similar ao DEM e DTM, incorpora valores de elevação (z) das feições naturais e artificiais que se encontram acima da superfície nua do terreno, como edificações, árvores e torres de energia.

Portanto, para MAUNE et al. (2001a), DEMs, DTMs e DSMs são superfícies gradeadas onde, cada grade, constitui um arranjo de células organizadas em linhas (x) e colunas (y) e que armazenam, cada uma, um determinado valor de elevação relativo ao seu centróide. Desta forma, a superfície do terreno, matematicamente contínua e compreendendo um número infinito de pontos, pode, por meio de uma amostragem (como a resultante do emprego da técnica ALS), ser interpolada e modelada digitalmente.

É durante o processamento dos dados ALS coletados que se especificam quais pontos farão parte de uma determinada grade (os pertencentes só à superfície nua do terreno, os pertencentes só aos objetos localizados sobre esta superfície, ou,

os pertencentes às duas categorias). É nesta fase que se especificam, também, os formatos dos arquivos de saída para as grades geradas (ASCII; binário: E, N e h em formato 8 bits; DXF; entre outros).

Um aspecto importante a ressaltar é o fato que, em função do destino dado aos modelos digitais 3D gerados (independentemente da técnica utilizada para a obtenção dos dados de elevação), diversos autores acabaram atribuindo, a estes modelos, diferentes denominações. Na bibliografia, portanto, podem ser encontradas as relacionadas a seguir:

- w *Digital Building Model* (DBM): citada por AMHAR & ECKER (1995), HASKELL & O'DONNELL (2001) e SURMANN et al. (2001);
- w *Digital City Model* (DCM): citada por WEHR & LOHR (1999), WEVER & LINDENBERGER (1999) e LEMMENS (2001);
- w *Digital Crown Model* (DCM): citada por HYYPPÄ et al. (2000);
- w *Digital Ground Model* (DGM): citada por THOMAS (1999), MOREIRA et al. (2001) e RIAÑO et al. (2003);
- w *Digital Height Model* (DHM): citada por KLEUSBERG & KLAEDTKE (1999), WOLF (1999) e STIES et al. (2000);
- w *Digital Landscape Model* (DLM): citada por HOSS (1996), PETZOLD & WALTER (1999) e HATGER (2002);
- w *Digital Vegetation Model* (DVM): citada por HYYPPÄ et al. (2000).

2.5 APLICAÇÕES NA CARTOGRAFIA

Para FOWLER (2001), a utilização dos dados ALS é apenas limitada pelas necessidades, imaginação e disponibilidade de *softwares* dos usuários.

Assim, dentre as aplicações mais comuns para os produtos provenientes do emprego da técnica ALS, podem ser relacionadas:

1) Mapeamento Topográfico

- De corredores ou feições lineares como estradas (rodovias e ferrovias), linhas de transmissão de energia e dutos (gás e óleo). A técnica tem sido empregada também no estudo do potencial hidrelétrico de bacias hidrográficas, o que implica no levantamento de algumas feições hidrográficas lineares como vales de rios.
- De zonas costeiras como praias e dunas, para análise da topografia, da estrutura e dos processos de transporte de sedimentos, oferecendo vantagens em relação ao emprego da técnica fotogramétrica tradicional, dificultado pelo relevo quase plano e pela homogeneidade (pouco contraste) característicos daquelas feições (FLOOD, 2000).
- De áreas florestadas. Por ser uma das primeiras áreas comerciais investigadas pelo emprego da técnica ALS (FOWLER, 2001), este é extremamente importante para o gerenciamento dos recursos naturais e para a indústria florestal. A técnica ALS permite obter informações acuradas sobre a altura da vegetação e sua densidade (distribuição espacial). Os sistemas capazes de captar mais de dois retornos por pulso, ou, até mesmo, de captar o feixe laser emitido na forma de uma onda contínua, são especialmente úteis na determinação de algumas das principais características estruturais da vegetação como "altura, diâmetro, espécie, volume e condição" (ANDERSEN et al., 2001) das árvores, base para o preparo de inventários florestais.

- De áreas urbanas, onde modelos digitais de superfície são utilizados na geração de ortofotocartas e também em outros estudos, como os realizados pela indústria das comunicações, relativamente à definição de áreas de sombras nas simulações de propagação de ondas eletromagnéticas, ou ainda, nas simulações do impacto de ruídos em edificações que cercam uma rota de tráfego planejada.

2) Avaliação e Análise Ambientais

- Dos danos provocados por terremotos, maremotos, furacões, entre outros, relativamente à sua magnitude e extensão.
- De riscos, principalmente os relativos a inundações e incêndios. Modelos digitais de superfície e de elevação são utilizados, por planejadores urbanos e regionais, no estudo de tais riscos e no desenvolvimento e implementação de planos de prevenção. Outros riscos normalmente analisados por meio da técnica ALS são os de erosão e de deslizamento de encostas.

3) Processamento de Imagens

Por ser uma área de aplicação muito recente, só possível depois que os sistemas ALS passaram a registrar a intensidade de cada retorno dos pulsos laser emitidos, ainda se encontra na sua fase inicial de desenvolvimento. Algumas das técnicas já consagradas no processamento de imagens de satélites têm sido aplicadas no processamento de imagens de intensidade, porém, melhores resultados têm sido obtidos de estudos que integram estas imagens aos próprios modelos digitais 3D obtidos com o emprego da técnica ALS e às imagens obtidas por outras técnicas (fotogrametria e/ou sensoriamento remoto). A extração automática de

feições tem sido o principal objetivo de tais estudos.

Outras aplicações incluem ainda, pesquisas recentes na área da exploração mineral (determinação do volume de material escavado), da arqueologia (mapeamento de ruínas) e da análise e monitoramento do tráfego em estradas (contagem de veículos e cálculo do volume de tráfego).

É importante ressaltar que o emprego da técnica ALS, nas aplicações descritas anteriormente, normalmente vem acompanhado do emprego (simultâneo, prévio ou posterior) de alguma outra técnica de imageamento, como a aerofotogramétrica, que utiliza câmaras métricas analógicas para o levantamento detalhado da superfície do terreno.

2.6 COMPARAÇÃO COM OUTRAS TÉCNICAS

O emprego da técnica ALS, assim como o de qualquer outra técnica, apresenta vantagens e desvantagens. Normalmente, as vantagens e desvantagens enumeradas para uma determinada técnica são resultado de uma análise comparativa entre esta e outras técnicas que, apesar de distintas, são capazes de gerar produtos considerados similares.

Como apresentado anteriormente, a técnica ALS permite levantar, sobre a superfície do terreno, uma "nuvem de pontos semi-aleatoriamente distribuídos" (PETZOLD et al., 1999) e gerar, a partir desta nuvem, uma grade regular de pontos 3D geo-referenciados (expressa sob a forma de um DSM, DEM ou DTM). Sabe-se, no entanto, que uma grade deste tipo também pode ser gerada a partir do emprego de técnicas como a taqueometria e aerofotogrametria tradicionais e, mais recentemente, a partir da interferometria por radar (*Interferometric Synthetic Aperture Radar* - IFSAR). Assim, o quadro 2.2 apresenta, relativamente aos sensores ou

sistemas aerotransportados e à sua capacidade de coletar dados de elevação, as características gerais que permitem distinguir a técnica ALS das técnicas aerofotogramétrica e IFSAR.

QUADRO 2.2 - ALS x AEROFOTOGRAFIA x IFSAR

| CARACTERÍSTICAS | | ALS | AERO FOTO | IFSAR |
|-----------------|---|-----|-----------|-------|
| Sensor | Ativo | X | - | X |
| | Óptico | X | X | - |
| | Imageador | - | X | X |
| | Exige calibração periódica | X | X | X |
| Altitude de Voo | Baixa (até 5km) | X | X | X |
| | Média (5 a 10km) | - | X | X |
| | Alta (acima de 10km) | - | (1) | X |
| Dados | Geo-referenciados (POS) | X | (2) | X |
| | Coletados digitalmente | X | (3) | X |
| | Processados automaticamente | X | (4) | X |
| | Podem ser integrados aos dados obtidos por outras técnicas | X | X | X |
| Obstáculos | Condições climáticas (vento, nuvem, chuva, névoa, neve) | X | X | (5) |
| | Inclinação do sol | - | X | - |
| | Uso noturno | - | X | - |
| Problemas | Provoca áreas de sombras devido à inclinação do sinal emitido | X | - | X |
| | Na presença de declividades intensas | - | X | X |
| Uso Restrito | Em áreas de vegetação densa | - | X | X |
| | Em áreas urbanas densamente edificadas | - | - | X |
| | Em regiões costeiras e em regiões cobertas por gelo ou neve | - | X | - |
| | Em áreas alagadas | X | - | - |
| Apropriada | Para a cobertura de grandes áreas do terreno | - | X | X |
| | Para a cobertura de faixas estreitas do terreno | X | X | - |

FONTES: BALTSAVIAS (1999a), KIM et al. (2000), SLATTON et al. (2000), HENSLEY et al. (2001), MERCER (2001) e BURTCH (2002)

NOTA: Sinais convencionais utilizados: X Sim; - Não.

(1) Não convencional.

(2) e (3) Aplica-se ao emprego de câmaras métricas digitais (prática ainda bastante restrita).

(4) Depende do método empregado e do produto gerado.

(5) Existem divergências entre autores quanto à sua capacidade de penetrar nuvens.

Em linhas gerais, a interferometria por radar é uma técnica de mapeamento por sensoriamento remoto que combina os radares de abertura sintética (SAR) tradicionais a técnicas interferométricas desenvolvidas pela comunidade científica de rádio-astronomia (HENSLEY et al., 2001). As principais diferenças entre as técnicas IFSAR e ALS são o tipo de onda emitida pelos sensores (microondas x laser) e o método empregado na obtenção das altitudes dos pontos que compõem a superfície do terreno (antenas x LRF). Segundo HENSLEY et al. (2001), apenas três dos sistemas IFSAR em operação, no mundo, são aerotransportados (os sensores espaçotransportados são em maior número e vêm coletando imagens e dados de elevação desde a década de 80). A geração de modelos digitais por meio da técnica IFSAR aerotransportada é, portanto, ainda mais recente e restrita que a realizada por meio da técnica ALS.

A aerofotogrametria, diferentemente da interferometria por radar, opera sensores passivos que obtêm somente imagens (fotográficas ou digitais) da superfície do terreno. A partir de levantamentos terrestres e do processamento destas imagens é possível obter modelos digitais semelhantes aos obtidos pela técnica ALS (cuja maior vantagem está na rapidez com que os dados são coletados e processados). Assim, o método tradicionalmente empregado na geração de DEMs é o estereofotogramétrico baseado no perfilamento de estereomodelos. Neste método, uma grade uniformemente espaçada pode ser compilada diretamente por meio de procedimentos que dirigem, automaticamente, o operador fotogramétrico ou o estereoinstrumento a coordenadas pré-calculadas onde as elevações são determinadas (MAUNE et al., 2001a). Outro método estereofotogramétrico empregado é o por correlação de imagens (também denominado autocorrelação). Este é um método automático desenvolvido com base no processamento de

imagens digitais (obtidas diretamente por meio de câmaras digitais, ou, por meio da digitalização do filme utilizando *scanner* fotogramétrico), porém, seu uso, na prática, tem sido restrito devido ao tempo (pós-processamento) requerido para a edição dos modelos digitais gerados (sua maior desvantagem).

Para PETRIE (2000), quase todo mapeamento topográfico (99%) executado no mundo ainda é feito utilizando câmaras aerofotogramétricas convencionais (analógicas) e, portanto, os produtos advindos do emprego desta técnica ainda são considerados padrão no julgamento dos produtos gerados a partir do emprego de outras técnicas, como a ALS e a IFSAR.

2.7 SISTEMAS ALS DISPONÍVEIS NO MERCADO

Os sistemas ALS atualmente disponíveis no mercado mundial, assim como seus respectivos fabricantes, encontram-se apresentados no quadro 2.3.

QUADRO 2.3 - SISTEMAS ALS DISPONÍVEIS NO MERCADO

| Fabricante | Sistemas em Operação | Primeiro Modelo | Ano de Lançamento | Modelo Mais Recente | Ano de Lançamento |
|--------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| Leica Geosystems (Suíça) | 16 | AeroScan ⁽¹⁾ | 1998 | ALS50 | 2003 |
| Optech Inc. (Canadá) | 42 | ALTM 1020 | 1995 | ALTM 3100 | 2004 |
| TopEye AB (Suécia) | 7 | TopEye | 1996 | TopEye ⁽²⁾ | 1996 |
| TopoSys GmbH (Alemanha) | 2 ⁽³⁾ | TopoSys | 1995 | Falcon | 2003 |

FONTES: FLOOD (2003), TOPOSYS (2003) e OPTECH (2004)

(1) Sistema da Azimuth Corporation, empresa adquirida pela Leica Geosystems em abril/2001.

(2) Sistema que tornou-se específico para uso em helicópteros.

(3) Sistemas proprietários/customizados.

Destes sistemas, o TopEye™, atualmente fabricado pela TopEye AB (ex Saab Survey Systems AB), parece ser o único que conservou as mesmas

características técnicas da época do seu lançamento, em 1996. Os demais têm sofrido constantes atualizações, nos últimos anos, em função das inúmeras inovações tecnológicas alcançadas pela comunidade científica mundial e, também, pelos próprios fabricantes. O quadro 2.4, criado a partir de informações obtidas dos referidos fabricantes de sistemas ALS, apresenta algumas das características mais marcantes dos modelos apresentados.

QUADRO 2.4 - ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS MAIS RECENTES

| | ALS50 | ALTM 3100 | TopEye | Falcon |
|--------------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Altitude Operacional | 500 - 4.000 m | 80 - 3.500 m | 60 - 480 m | 500 - 1.600 m |
| PRR | Variável 52 kHz (máx) | Selecionável 100 kHz (máx) | 6 kHz | 83 kHz |
| FOV | 10° - 75° | 0° - 50° | 20° ou 40° | 14° |
| Padrão de Varredura | Senoidal | Dente de Serra | Dente de Serra | Linhas Paralelas |
| Retornos por Pulso | 3 | 4 | 4 | 2 |
| Registro da Intensidade | Sim | Sim | Sim | Possível |
| Opcional | ADS40 Digital Sensor | 4k x 4k Digital Camera | 2k x 2k Digital Camera | RGB-NIR Line Camera ⁽¹⁾ |

FONTES: LEICA GEOSYSTEMS (2003), TOPEYE (2003), TOPOSYS (2003) e OPTECH (2004)

(1) Não é opcional, faz parte do sistema.

Segundo dados compilados por FLOOD (2003), cada um dos fabricantes apresentados anteriormente é responsável, respectivamente, por 18,6% (Leica Geosystems), 48,8% (Optech Inc.) e 8,2% (TopEye AB) dos sistemas comercializados em todo o mundo. Por sua vez, os sistemas fabricados e utilizados pela TopoSys GmbH, assim como os fabricados e utilizados por outras 11 organizações (e também classificados como sistemas proprietários/customizados), representam 24,4% do total de sistemas em operação (FLOOD, 2003). Assim, a

tabela 2.1, criada a partir de informações compiladas por FLOOD (2003), apresenta a distribuição geográfica de tais sistemas.

TABELA 2.1 - DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS SISTEMAS ALS EM OPERAÇÃO

| Continentes | Total Sistemas | Leica | Optech | TopEye | Proprietário |
|--------------------|----------------|-----------|-----------|----------|--------------|
| África | 3 | - | 2 | 1 | - |
| América [Norte | 46 | 11 | 16 | 2 | 17 |
| | Sul | 4 | - | 3 | - |
| Ásia e Austrália | 12 | 4 | 8 | - | - |
| Europa | 21 | 1 | 13 | 4 | 3 |
| Total Geral | 86 | 16 | 42 | 7 | 21 |

FONTE: FLOOD (2003)

É possível observar, por meio da tabela 2.1, que na América do Sul existem quatro sistemas ALS em operação. Destes, o sistema apontado como proprietário pertence à ALTOA (*Agence Laser de Topographie Aéroporté*), uma empresa de mapeamento sediada em Cayenne, na Guiana Francesa. Os demais sistemas, todos da fabricante canadense Optech Inc., pertencem, respectivamente, às seguintes organizações brasileiras: Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A., com sede em Curitiba-PR; Geoid LTDA, com sede em Belo Horizonte-MG; e, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), também com sede em Curitiba-PR. As duas primeiras são empresas privadas prestadoras de serviços na área de mapeamento enquanto a última é uma organização governamental de pesquisa associada à Universidade Federal do Paraná (UFPR) e à Companhia Paranaense de Energia (COPEL).

3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A LEGISLAÇÃO CARTOGRÁFICA BRASILEIRA EM VIGOR

A legislação cartográfica brasileira é composta de decretos, decretos-lei, portarias, resoluções, normas técnicas, normas de serviço e instruções. Os principais e em vigor, encontram-se relacionados nos quadros a seguir (3.1 a 3.5), por categoria e ordem crescente de data de publicação.

QUADRO 3.1 - DECRETOS E DECRETOS-LEI

| | | |
|-------------------------|------------|--|
| Decreto-Lei Nº 243 | 28/02/1967 | Fixa as Diretrizes e Bases da Cartografia Brasileira |
| Decreto-Lei Nº 1.177 | 21/06/1971 | Dispõe sobre Aerolevantamentos no Território Nacional |
| Decreto Nº 79.099 | 06/01/1977 | Aprova o Regulamento para Salvaguarda de Assuntos Sigilosos |
| Decreto Nº 89.817 | 20/06/1984 | Estabelece as Instruções Reguladoras de Normas Técnicas da Cartografia Nacional |
| Decreto Nº 2.278 | 18/07/1997 | Regulamento das Atividades de Aerolevanteamento - RAA (regulamenta o Decreto-Lei Nº 1.177) |

QUADRO 3.2 - PORTARIAS

| | | |
|----------------------|------------|---|
| Nº 2 FA-10-220 | 12/12/1972 | EMFA - Instruções Reguladoras de Aerolevanteamento (IRA) |
| Nº 6 FA-10-37 | 30/01/1976 | EMFA - Altera dispositivos constantes das Instruções Reguladoras de Aerolevanteamentos |
| Nº 3.783 FA-51 | 25/10/1977 | EMFA - Altera Classificação dos Produtos de Aerolevanteamentos |
| Nº 942 GM3 | 01/09/1978 | Aprova as Instruções Reguladoras de Aerolevanteamentos realizados pela Força Aérea Brasileira |
| Nº 637 SC-6/FA-61 | 05/03/1998 | MD - Aprova as Instruções Reguladoras de Aerolevanteamento (IRA) no Território Nacional |

QUADRO 3.3 - RESOLUÇÕES

| | | |
|----------|------------|---|
| PR Nº 22 | 21/07/1983 | Aprova Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos em Território Brasileiro |
| Nº 23 | 21/02/1989 | Altera o apêndice II da Resolução PR-22/83 Parâmetros de Transformação de Sistemas Geodésicos |
| Nº 5 | 31/03/1993 | Complementa o capítulo II da Resolução PR-22/83 Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS |

QUADRO 3.4 - NORMAS DE SERVIÇO E INSTRUÇÕES TÉCNICAS

| | | |
|------------|------------|--|
| NSDG Nº 29 | 22/09/1988 | Especificações para a Construção e Implantação de Marcos Geodésicos em Território Nacional |
| - | 1994 | Verificação da Realidade Física do SGB |

QUADRO 3.5 - NORMAS TÉCNICAS

| | | |
|--------------------|------------|--|
| NBR 7201 NB 299 | 02/1982 | Contratação de Serviços de Aerofotogrametria |
| NCB CC/G 0001 | 1984 | Especificações Gerais e Padronização para a Elaboração de Normas Cartográficas Brasileiras |
| NBR 13.133 | 30/06/1994 | Execução de Levantamento Topográfico |
| NBR 14.166 | 30/09/1998 | Rede de Referência Cadastral Municipal - Procedimento |

Dentre os conjuntos apresentados acima, têm importância direta para o presente trabalho de pesquisa os decretos-lei, decretos, resoluções e portarias descritas nas subseções a seguir.

3.1 DECRETO-LEI Nº 243/67 - DIRETRIZES E BASES DA CARTOGRAFIA BRASILEIRA

O Decreto-Lei Nº 243, de 28 de Fevereiro de 1967,

tem como finalidade o estabelecimento das diretrizes e bases das atividades cartográficas e correlatas, em termos de eficiência e racionalidade, no âmbito nacional, através da criação de uma estrutura cartográfica em condições de atender aos reclamos do desenvolvimento econômico-social do país e da segurança nacional. (art. 1º).

De acordo com o presente decreto-lei "as atividades cartográficas, em todo o território nacional, são levadas a efeito através de um sistema único", denominado Sistema Cartográfico Nacional (SCN), "constituído pelas entidades nacionais, públicas e privadas, que tenham por atribuição principal executar trabalhos cartográficos ou atividades correlatas" (art. 2º).

Este mesmo decreto-lei institui que "a representação do espaço territorial brasileiro" deve ser feita "por meio de cartas elaboradas seletiva e progressivamente [...] segundo padrões cartográficos terrestre, náutico e aeronáutico", constituindo o

que se denomina "Cartografia Sistemática" (art. 7º).

As cartas elaboradas no Brasil devem seguir, também, as especificações da Carta Internacional do Mundo (CIM) ao milionésimo. Tais especificações, definidas pela primeira vez em 1909 por representantes de diversos países, foram adotadas pela Conferência Técnica das Nações Unidas, em agosto de 1962. A Carta Internacional do Mundo ao milionésimo que cobre o espaço territorial brasileiro é constituída, portanto, por 46 folhas de formato uniforme (quatro graus de latitude por seis graus de longitude), de características topográficas (contempla acidentes naturais e artificiais, planimétricos e altimétricos) e representadas na escala 1:1.000.000.

Partindo das especificações da CIM, o referido decreto-lei determina que a Cartografia Sistemática Terrestre Básica seja configurada por meio de "séries de cartas gerais, contínuas, homogêneas e articuladas, nas escalas-padrão compreendidas entre 1:1.000.000 e 1:25.000" (art. 8º).

Aquele preceitua, ainda, o estabelecimento de um "sistema plano-altimétrico único, de pontos geodésicos de controle materializados no terreno" e, sobre os quais, devem apoiar-se, obrigatoriamente, todos os levantamentos destinados ao desenvolvimento da cartografia sistemática (art. 12).

Assim, todas as cartas elaboradas no território brasileiro e que estejam compreendidas pelas escalas-padrão mencionadas acima, devem obedecer às Normas Técnicas (NT) estabelecidas pelos seguintes órgãos federais competentes: a Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) "no que concerne à rede geodésica fundamental e às séries de cartas gerais nas escalas menores que 1:250.000"; a Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG) "no que concerne às séries de cartas gerais nas escalas iguais a 1:250.000 e maiores"; a Diretoria de

Hidrografia e Navegação (DHN) "no que concerne às cartas náuticas de qualquer escala"; e, o Instituto Cartográfico da Aeronáutica (ICA) "no que concerne às cartas aeronáuticas de qualquer escala". (art. 15 § 1º).

Uma vez que a Cartografia Sistemática Terrestre Básica é configurada por meio de séries de cartas gerais somente até a escala-padrão 1:25.000 (art. 8º), não existem normas técnicas estabelecidas, a nível nacional, para as séries de cartas gerais que compreendem escalas-padrão maiores que 1:25.000 (1:10.000, 1:5.000, 1:2.000 e 1:1.000). Existem, no entanto, algumas normas estabelecidas a nível estadual e municipal, como, por exemplo, o Sistema Cartográfico Municipal de Feira de Santana - SICAFS e o Sistema Cartográfico Metropolitano da Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S.A. - EMPLASA.

3.2 DECRETO-LEI Nº 1.177/71 - AEROLEVANTAMENTOS NO TERRITÓRIO NACIONAL

O Decreto-Lei Nº 1.177, de 21 de Junho de 1971, decreta que "a execução de aerolevanteamento no território nacional é da competência de organizações especializadas do governo federal [...] de governos estaduais e privadas" (art. 1º).

Este decreto-lei define aerolevanteamento como

o conjunto das operações aéreas e/ou espaciais de medição, computação e registro de dados do terreno com o emprego de sensores e/ou equipamentos adequados, bem como a interpretação dos dados levantados ou sua tradução sob qualquer forma. (art. 3º).

Desde sua publicação, o referido decreto-lei tem sido regulamentado por vários outros decretos e portarias. Destes, encontram-se em vigor a Portaria Nº 637-SC-6/FA-61, de 05 de Março de 1998, e o Decreto Nº 2.278, de 18 de Julho de 1997.

Este último estabelece que "o aerolevanteamento constitui-se de uma fase aeroespacial, de captação e registro de dados, e de uma fase decorrente, de interpretação e tradução dos dados registrados" (art. 1º).

A fase aeroespacial é caracterizada por operação técnica de captação de dados da parte terrestre, aérea ou marítima do território nacional, por meio de sensor instalado em plataforma aérea ou espacial, complementada por operação de registro de tais dados, utilizando recursos da própria plataforma captora ou de estação receptora localizada à distância. (art. 2º).

Por sua vez,

a fase decorrente é caracterizada por operações técnicas destinadas a materializar informações extraídas dos dados registrados na fase aeroespacial, sob a forma de mosaico, carta-imagem, ortofoto, carta, e de outras. (art. 3º).

Os produtos obtidos nas fases aeroespacial e decorrente são designados, respectivamente, "original de aerolevanteamento" e "produto decorrente" (art. 4º).

Ainda de acordo com o decreto em vigor, toda entidade nacional executante da fase aeroespacial, deve estar inscrita no Estado-Maior das Forças Armadas (EMFA) (atual Ministério da Defesa) e obter autorização prévia para a execução deste tipo de serviço (art. 6º). Os originais obtidos nesta fase do levantamento devem ser "preservados e mantidos sob controle [...] tendo em vista o desenvolvimento e a defesa nacionais" (art. 5º). Em princípio, "a detentora da posse do original de aerolevanteamento é a entidade inscrita que executa a fase aeroespacial" (art. 13). Esta, também é responsável pela observação "das regras sobre os cuidados com o original de aerolevanteamento e produtos dele decorrentes" (art. 6º), bem como, pela prestação das "informações necessárias à elaboração e atualização de cadastros específicos" (art. 6º), como o Cadastro de Levantamentos Aeroespaciais do Território Nacional (CLATEN).

O Ministério da Defesa (MD), por meio da Portaria Nº 637/98, estabelece que

o original de aerolevanteamento e os produtos dele decorrentes, em princípio, não serão classificados como sigilosos, para que possam, livre e eficientemente, ser utilizados em benefício do desenvolvimento nacional, salvo quando contiverem informações que impliquem comprometimento do interesse ou segurança nacionais. (art. 41).

Neste caso, a identificação e avaliação "das instalações cujo sigilo deva ser preservado" são feitas a critério do próprio MD (art. 13).

Atualmente, encontra-se tramitando no Congresso Nacional o Projeto de Lei Nº 3.587, de 8 de Setembro de 2000, que "estabelece procedimentos e define responsabilidades para a execução do aerolevanteamento e do levantamento espacial, sua fiscalização e controle, no âmbito do território nacional" (art. 1º). Este projeto de lei baseia-se no fato de que o Decreto-Lei Nº 1.177/71 e o Decreto Nº 2.278/97 carecem de "atualização e adequação", principalmente no que diz respeito à separação das competências e atribuições concernentes ao aerolevanteamento e ao levantamento espacial (MUSSEI, 2003).

Tal projeto de lei propõe, entre outros: a adequação do conceito de "aerolevanteamento" (art. 2º); a adequação do conceito de "levantamento espacial" (art. 4º); a conceituação de "original de aerolevanteamento" (art. 6º); a incumbência ao Ministério da Defesa como órgão responsável pela autorização, controle e fiscalização do aerolevanteamento no território nacional (art. 5º); a incumbência à Agência Espacial Brasileira (AEB) como órgão responsável pelo controle e fiscalização do levantamento espacial no território nacional (art. 13); e, a implantação de cadastros específicos para o aerolevanteamento (CATEN) (art. 7º) e para o levantamento espacial (CLETEN) (art. 14).

Com a aprovação do referido projeto de lei, revogam-se, automaticamente, o Decreto-Lei Nº 1.177/71 e o Decreto Nº 2.278/97 anteriormente citados.

3.3 RESOLUÇÃO PR Nº 22/83 - ESPECIFICAÇÕES E NORMAS GERAIS PARA LEVANTAMENTOS GEODÉSICOS

A Resolução PR Nº 22, de 21 de Julho de 1983, na forma de Anexo, define o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) como

o conjunto de pontos geodésicos implantados na porção da superfície terrestre delimitada pelas fronteiras do país, pontos estes que são determinados por procedimentos operacionais e coordenadas calculadas, segundo modelos geodésicos de precisão compatível com as finalidades a que se destinam.

O Anexo de tal resolução estabelece, ainda, que o SGB deve utilizar como "imagem geométrica da Terra" aquela definida pelo Elipsóide de Referência Internacional de 1967, com orientação topocêntrica no Vértice Chuá - Estado de Minas Gerais, referencial planimétrico que integra o *South American Datum* (SAD), de 1969. Por sua vez, o referencial altimétrico deve coincidir "com a superfície equipotencial que contém o nível médio do mar, definido pelas observações maregráficas tomadas na Baía de Imbituba" - Estado de Santa Catarina.

Conforme prevê o Sistema Cartográfico Nacional, a projeção adotada no país, seguindo recomendação da União Geodésica e Geofísica Internacional (UGGI) para os mapeamentos em escalas maiores ou iguais a 1:250.000 (1:100.000, 1:50.000 e 1:25.000 da Cartografia Sistemática), é a Universal Transversa de Mercator (UTM).

É importante ressaltar que a DSG (órgão responsável pelo mapeamento sistemático terrestre básico nas escalas desde 1:250.000 até 1:25.000) passou a adotar tal projeção em 1955. Desde então, os mapeamentos conduzidos no Brasil nas escalas superiores a 1:25.000 (e que carecem de normatização apropriada), também passaram a adotar a referida projeção, embora, nas duas últimas décadas, o emprego de outras projeções tenha se tornado comum para estas escalas, como é o caso da Local Transversa de Mercator (LTM).

Ressalta-se, ainda, que está em estudo a mudança do Referencial Cartográfico Brasileiro, de topocêntrico (sistema empregado atualmente) para geocêntrico, em concordância com o estabelecido na Conferência Internacional para Definição de um Referencial Geocêntrico para a América do Sul, realizada em outubro de 1993, em Assunção, Paraguai, e onde surgiu o projeto SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul). A mudança de referencial, no entanto, não vem constituindo uma tarefa fácil, pois implica que todo o SGB esteja referenciado ao SIRGAS. Entre as atividades desenvolvidas atualmente pelo IBGE, para concretização da referida mudança, estão: a implantação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC); o reajustamento da Rede Planimétrica do SGB; e a determinação dos parâmetros de transformação entre o datum topocêntrico (mencionado acima) e o datum geocêntrico (baseado no sistema de referência IERS/ITRS e nos parâmetros do elipsóide GRS-80).

3.4 DECRETO Nº 89.817/84 - INSTRUÇÕES REGULADORAS DAS NORMAS TÉCNICAS DA CARTOGRAFIA NACIONAL

O Decreto Nº 89.817, de 20 de Junho de 1984, Capítulo I - Disposições Iniciais, Artigo 1º,

estabelece as normas a serem observadas por todas as entidades públicas e privadas produtoras e usuárias de serviços cartográficos, de natureza cartográfica e atividades correlatas, sob a denominação de Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional.

O Artigo 2º, do mesmo Capítulo, declara que

as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional se destinam a estabelecer procedimentos e padrões a serem obedecidos na elaboração e apresentação de normas da Cartografia Nacional, bem como padrões mínimos a serem adotados no desenvolvimento das atividades cartográficas.

Este mesmo decreto (no seu Artigo 5º Inciso I) define "Serviço Cartográfico ou de Natureza Cartográfica" como "toda operação de representação da superfície terrestre ou parte dela, através de imagens, cartas, plantas e outras formas de expressão afins, tais como definidas no art. 6º do DL 243/67 e seus parágrafos" (relativamente a todas as cartas planimétricas e plano-altimétricas de caráter geral, especial ou temático). Define ainda "Atividade Correlata" como "toda ação, operação ou trabalho destinado a apoiar ou implementar um serviço cartográfico ou de natureza cartográfica, tal como mencionada no parágrafo único do art. 2º do DL 243/67" (relativamente ao SCN).

Por sua vez, o Capítulo II - Especificações Gerais, encontra-se dividido em duas seções que contêm, respectivamente, a classificação de uma carta quanto a sua exatidão e as classes de cartas segundo alguns critérios.

A Seção 1 - Classificação de Uma Carta Quanto a Exatidão, Artigo 8º, indica que as cartas devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), de acordo com os seguintes critérios: "90% dos pontos bem definidos de uma carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC planimétrico estabelecido"; e, "90% dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas de nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC altimétrico estabelecido."

Nesta mesma seção e artigo declara-se, ainda, que:

- a) o PEC "é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos" (§1º);
- b) "a probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão", ou seja, "PEC = 1,6449 EP" (§2º);

- c) "o Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico", não deve ultrapassar 60,8% do PEC (§3º);
- d) "as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático" devem ser consideradas equivalentes (§4º).

A Seção 2 - Classes de Cartas, Artigo 9º, indica que as cartas devem ser classificadas, segundo sua exatidão, como Classe A, B ou C, de acordo com os critérios apresentados no quadro 3.6.

QUADRO 3.6 - CLASSIFICAÇÃO DE CARTAS

| | Classe A | Classe B | Classe C |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| PEC Planimétrico | 0,5 mm ⁽¹⁾ | 0,8 mm ⁽¹⁾ | 1,0 mm ⁽¹⁾ |
| Erro-Padrão | 0,3 mm ⁽¹⁾ | 0,5 mm ⁽¹⁾ | 0,6 mm ⁽¹⁾ |
| PEC Altimétrico | 1/2 EV | 3/5 EV | 3/4 EV |
| Erro-Padrão | 1/3 EV | 2/5 EV | 1/2 EV |

FONTE: BRASIL (1984)

NOTA: EV - Eqüidistância Vertical das Curvas de Nível.

(1) Na escala da carta.

"É obrigatória a indicação da Classe, no rodapé da folha, ficando o produtor responsável pela fidelidade da classificação". (art. 10).

É importante ressaltar que o presente decreto foi estabelecido tendo como base o disposto nos artigos 2º, 5º (incisos 4 e 5) e 18 do Decreto-Lei Nº 243/67, tratando, respectivamente, do Sistema Cartográfico Nacional, da Comissão de Cartografia e das Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Terrestre Nacional. Logo, a classificação apresentada anteriormente deve, necessariamente, ser aplicada às séries de cartas gerais que compõem a Cartografia Sistemática Terrestre, ou seja, aquelas compreendidas pelas escalas-padrão desde 1:1.000.000 até 1:25.000 e, cujas Normas Técnicas, já foram estabelecidas pelos órgãos federais competentes (IBGE e DSG).

Conforme o Artigo 7º do atual decreto, "as cartas em escalas superiores a 1:25.000 terão articulação, formato e sistema de projeção reguidos por norma própria", o que sugere, mais uma vez, que o estabelecido pelo referido decreto não compreende tais séries de cartas. Ressalta-se, no entanto, que as entidades privadas geradoras de produtos cartográficos, costumam, justamente pela falta de uma "norma própria", aplicar o estabelecido pelo atual decreto também para as cartas em escalas maiores que 1:25.000.

4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ERROS INERENTES AO PROCESSO DE OBTENÇÃO E AO PROCESSAMENTO DOS DADOS ALS

É sabido que toda medida conduzida pelo homem caracteriza-se pela presença inevitável de erros. Tais erros "decorrem não apenas de falhas humanas", como também "das imperfeições do equipamento" ou sistema utilizado e "da influência das condições ambientais nas quais se processa a mensuração" (GEMAEL, 1994).

Identificar os tipos de erros aos quais uma determinada medida está sujeita é uma tarefa difícil e exige o conhecimento prévio, senão de todas, de grande parte das variáveis envolvidas na medição. Tal conhecimento deve guiar à técnicas e/ou métodos apropriados para a obtenção da referida medida que, necessariamente, permitam eliminar, minimizar e/ou corrigir a maior parte dos erros a ela associados.

Antes de discriminar, portanto, os erros inerentes ao processo de obtenção e ao processamento dos dados ALS, faz-se necessário compreender alguns dos conceitos envolvidos por uma medição ou levantamento e que podem levar à avaliação daquilo que se entende por qualidade cartográfica dos resultados obtidos.

4.1 QUALIDADE CARTOGRÁFICA

O termo "qualidade", utilizado nas mais variadas situações, nem sempre é de definição clara e objetiva, estando geralmente relacionado à excelência de um produto ou serviço e/ou à capacidade deste em satisfazer seus clientes (ISO, 2000). De acordo com normas e padrões internacionais, a descrição da qualidade de dados espaciais ou geográficos compreende diversas componentes (completude, consistência lógica, exatidão posicional, exatidão temporal e exatidão temática), às

quais estão associados diferentes sub-elementos ou aspectos (como, por exemplo, comissão e omissão para completude e, absoluta ou relativa para exatidão posicional) (ISO, 2002). Para BURITY & SILVEIRA (2003), tais componentes e aspectos permitem descrever quanto uma base de dados espaciais satisfaz determinados critérios especificados. Desta forma, produtores de dados espaciais ou geográficos têm condições de melhor atender as necessidades de seus clientes ou usuários, bem como, clientes ou usuários têm condições de especificar melhor o produto que satisfaz suas necessidades. Ainda no que diz respeito aos padrões internacionais, ressalta-se a importância dada ao registro das informações de qualidade, que pode ocorrer em dois níveis: quantitativo (de obediência a critérios estabelecidos durante a especificação do produto) e não quantitativo (avaliação subjetiva) (ISO, 2003).

No caso particular da cartografia brasileira, a excelência de um produto (como, por exemplo, uma carta) está normalmente relacionada à capacidade deste em atender à classificação imposta pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) estabelecido pelo Decreto N.º 89.817/84 em vigor (somente quando se tratar de representações nas escalas 1:1.000.000 a 1:25.000 da Cartografia Sistemática Terrestre). Conforme explicitado no Capítulo 3 do presente trabalho de pesquisa, o referido padrão permite classificar um produto cartográfico com base na determinação de parâmetros quantitativos que expressam apenas a qualidade posicional ou geométrica deste. Assim, com o intuito de melhor compreender os critérios de classificação impostos pelo PEC, fez-se necessário recorrer à análise de dos conceitos apresentados a seguir.

4.1.1. Valor Verdadeiro, Valor Observado, Valor Estimado e Erro

Em cartografia, a toda grandeza física corresponde um valor verdadeiro "que se acha inteiramente livre de erros e enganos" (OLIVEIRA, 1993). Uma vez que uma grandeza só pode ser determinada a partir de um processo de medida (envolvendo métodos, operações e instrumentos), pode-se afirmar, em função da impossibilidade de se conhecer todos os erros inerentes a tal processo, que o valor verdadeiro daquela grandeza jamais será conhecido ou determinado.

Por esta razão, GEMAEL (1994) afirma que "quem dá os primeiros passos na análise de observações começa por fazer uma concessão: abdicar da pretensão de obter o verdadeiro valor de uma grandeza medida".

De acordo com este mesmo autor, até os leigos se convencem de que nenhuma pessoa, a quem possa ser solicitada a medida de uma determinada grandeza, contentar-se-á em realizá-la uma única vez. "A desconfiança no resultado de uma medida isolada, fruto da incerteza na falibilidade humana, leva naturalmente à multiplicação das observações" (GEMAEL, 1994).

Tal multiplicação, no entanto, não exime a medição de conter erros. As observações, mesmo quando "repetidas em condições supostamente idênticas" (GEMAEL, 1994) e "inspirando todas o mesmo grau de confiança" (MENEZES, 1935), são acompanhadas de erros inevitáveis cuja classificação tradicional encontra-se apresentada a seguir.

(1) Erros Grosseiros

Originam-se da distração do observador que realiza a medição (GEMAEL, 1994) e são totalmente repelidos pela ciência (MENEZES, 1935). Tais erros ocorrem até mesmo quando a coleta e o registro dos dados são feitos eletrônica, digital e automaticamente. Sua detecção, muitas vezes,

é difícil, cabendo ao observador cercar-se de precauções que visem evitar a sua ocorrência (GEMAEL, 1994).

(2) Erros Sistemáticos

Normalmente produzidos por causas conhecidas, podem ser evitados por meio de técnicas especiais de medição ou eliminados posteriormente mediante o uso de modelos matemáticos estabelecidos (GEMAEL, 1994). Entre os erros sistemáticos mais comuns estão aqueles produzidos pelas influências das condições ambientais (GEMAEL, 1994) e os introduzidos pelos procedimentos e instrumentos ou sistemas de medição (MAUNE et al., 2001d).

(3) Erros Acidentais ou Aleatórios

Ocorrem "devido às ações simultâneas e independentes de causas diversas e desconhecidas" (MENEZES, 1935). Tais erros dificilmente podem ser corrigidos ou eliminados, devendo constituir a principal preocupação daqueles que realizam medidas de qualquer natureza.

Sabe-se que a presença de erros grosseiros numa medida é inaceitável, logo, autores como GRANT (1997) e VUOLO (2002) afirmam que os mesmos não deveriam ser classificados como erros, mas apenas considerados enganos ou falhas, devendo ser eliminados assim que detectados. GRANT (1997) classifica os erros sistemáticos e aleatórios como "erros experimentais", ou seja, como erros que resultam de um experimento (no caso, o processo de medida). Assim, os erros sistemáticos, que são de causa determinável e possuem, até certo ponto, magnitude e direção definidas, pertenceriam à categoria dos "erros experimentais determinados", enquanto os erros aleatórios, de causa indeterminável, pertenceriam à categoria dos "erros experimentais indeterminados".

MAUNE et al. (2001d), por outro lado, afirma que os erros aleatórios diferenciam-se dos erros sistemáticos porque estes, ao menos em teoria, podem ser previstos. Isto significa que uma vez que ocorrem de forma regular, tais erros podem ser "determinados a priori". Tal afirmação fundamenta o fato de que determinadas técnicas de medição são conduzidas a fim de que parte destes erros sejam evitados ou neutralizados e parte sejam corrigidos ou eliminados posteriormente.

Assim, é prática comum que os erros sistemáticos associados a um conjunto de observações sejam depurados antes que se proceda a análise dos erros aleatórios daquele mesmo conjunto. Tal análise, normalmente conduzida pela Teoria dos Erros ou pelo Ajustamento de Observações, tem como base a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) como meio de estimar, a partir de um conjunto de observações superabundantes, o valor mais provável de uma grandeza, ou seja, aquele que mais se aproxima do seu valor verdadeiro e que, ao mesmo tempo, conduz a resíduos (erros ou desvios) cuja soma dos quadrados é um mínimo.

Como resultado, portanto, do processo de medida de uma grandeza específica (no caso mais simples de medida direta), têm-se um conjunto de valores observados (ou medidos) que, isentos de enganos e corrigidos dos erros sistemáticos, tendem a espalhar-se (de maneira aleatória) ao redor do valor verdadeiro daquela mesma grandeza. Logo, as discrepâncias que se apresentam, entre os valores observados para a referida grandeza e o seu valor verdadeiro, constituem o que se denomina "erro". Porém, na impossibilidade de se conhecer o verdadeiro valor de uma grandeza, o erro passa a ser definido como as diferenças entre os valores observados para aquela grandeza e um valor teórico (ou estimado) atribuído à mesma (MAUNE et al., 2001d).

Assim, para evitar confusão, às diferenças entre valores observados e valor verdadeiro atribui-se o termo "erro verdadeiro" e, às diferenças entre valores observados e valor estimado, o termo "erro aparente" (GEMAEL, 1994). Neste caso, o valor estimado atribuído à grandeza nada mais é do que um valor ideal ao qual as observações devem ser comparadas de forma que o erro resultante seja mínimo.

QUADRO 4.1 - ERROS DE MEDIDA: CARACTERÍSTICAS

| ERROS | GROSSEIROS | SISTEMÁTICOS | ALEATÓRIOS |
|-------------------------|---|--|---|
| Originam-se | Do descuido ou distração do observador | De causas conhecidas Das influências das condições ambientais Dos procedimentos e instrumentos ou sistemas de medição | De causas desconhecidas |
| Para Evitá-los | O observador deve cercar-se de certas precauções As observações devem ser realizadas com o máximo de atenção e cuidado | Deve-se utilizar técnicas especiais de observação Deve-se proceder a calibração cuidadosa dos instrumentos ou sistemas de medição | Não há como |
| Seguem | Nenhuma lei | Leis geométricas | Leis estatísticas comportamentais Leis geométricas podem influenciá-los |
| Para Detectá-los | Erros muito grandes são evidentes Erros pequenos exigem um teste estatístico | Possuem magnitude e direção definidas São cumulativos | Depuram-se os erros sistemáticos Aumenta-se o número de observações |
| Para Corrigi-los | Rejeitam-se as observações Realizam-se novas observações | Aplicam-se modelos matemáticos estabelecidos | Não podem ser corrigidos Podem ser estimados pelo Método dos Mínimos Quadrados |

FONTES: GEMAEL (1994), BUCKNER (1997) e MAUNE et al. (2001d)

O Quadro 4.1 descreve, de forma sucinta, as principais características dos erros de medida anteriormente apresentados. Este foi construído com o intuito de facilitar a análise dos erros inerentes às fases de coleta e processamento dos dados ALS, apresentada na seqüência.

4.1.2. Precisão e Exatidão

Para BUCKNER (1997), toda grandeza medida possui três valores ou números a ela associados: a estimativa do seu tamanho; a estimativa do tamanho da incerteza ou erro com o qual foi obtida; e, o nível de certeza ou confiança com o qual o seu tamanho foi estimado.

A estimativa do tamanho de uma grandeza medida (no caso mais simples da medida direta e aplicando-se o MMQ) é normalmente representada por um número único e contínuo que corresponde à média (aritmética) dos valores observados para aquela grandeza. GEMAEL (1994) e GRANT (1997) concordam que quando o número de observações cresce, a média tende a aproximar-se do verdadeiro valor de uma grandeza a ponto dos erros aleatórios resultantes da medição apresentarem uma semelhança com a Distribuição Normal ou de Gauss. "Bem por isso a curva em 'forma de sino' (curva de Gauss), representativa da função de probabilidade da distribuição normal, é conhecida na teoria dos erros por *curva dos erros*" (GEMAEL, 1994).

Uma vez que a média (\bar{x}) de um conjunto de observações representa o centro da distribuição normal (ou o ponto máximo da curva de Gauss), o grau com que os valores observados tendem a dispersar-se em torno desta média (SPIEGEL, 1993) é denominado desvio padrão (s) (uma das várias medidas de dispersão disponíveis). O desvio padrão constitui, portanto, a estimativa do tamanho do erro com o qual a grandeza foi obtida. Deste modo, pode-se esperar que o verdadeiro valor desta grandeza esteja situado no intervalo $\bar{x} \pm 1s$, $\bar{x} \pm 2s$ ou $\bar{x} \pm 3s$ com probabilidade de 68,27%, 95,45% e 99,73%, respectivamente. Os valores expressos em porcentagem representam, portanto, os níveis de confiança para a avaliação da média das

observações que, conforme citado anteriormente, é considerada a melhor estimativa (ou o valor mais provável) para a grandeza medida (SPIEGEL, 1993).

Ressalta-se que o desvio padrão de uma série de observações, em termos cartográficos, é normalmente denominado Erro Médio Quadrático (neste caso, considerado com o duplo-sinal) (GEMAEL, 1994) ou, simplesmente, Erro Padrão (KAVANAGH & BIRD, 1996; DENT, 1999; SLOCUM, 1999). Tais termos assumem importância fundamental ao servirem como indicadores da qualidade com a qual uma grandeza é obtida ou estimada e, por esta razão, o desvio padrão, assim como outras estimativas (tais como a variância estimada e o traço da matriz variância-covariância), encontram-se freqüentemente associados ao que se denomina "precisão" de uma medição ou levantamento.

A precisão, em termos lexicais, é definida como o "absoluto rigor na determinação de uma medida, peso, valor", sendo indicada como sinônimo de "perfeição, exatidão" e como antônimo de "ambigüidade, erro" (FERREIRA, 1999; HOUAISS & VILLAR, 2002). Em termos cartográficos, no entanto, a precisão é a própria expressão do erro inerente a uma medição e jamais poderia ser empregada como sinônimo de exatidão, embora alguns usuários e, até mesmo profissionais de cartografia, muitas vezes o façam. GEMAEL (1994) alerta para este fato e afirma que, apesar de aparentados, tais termos têm significados bastante distintos.

Assim, enquanto a precisão avalia o "grau de aperfeiçoamento no desempenho de uma operação ou na exposição de um resultado" (OLIVEIRA, 1992), a exatidão avalia o "grau de conformidade" (OLIVEIRA, 1992) daquele resultado com uma norma ou padrão. A precisão relaciona-se, portanto, "à qualidade da execução" (OLIVEIRA, 1992) de uma medição ou levantamento enquanto a exatidão, "à qualidade do resultado" (OLIVEIRA, 1992) dele obtido.

O quadro 4.2, construído a partir de definições e conceitos propostos por diversos autores, apresenta, de forma sucinta, as principais diferenças e semelhanças entre precisão e exatidão.

QUADRO 4.2 - PRECISÃO x EXATIDÃO

| | PRECISÃO | EXATIDÃO |
|---------------------------|---|--|
| Aplica-se | A métodos | A resultados (consistência) |
| | A instrumentos ou sistemas | |
| Avalia a Qualidade | A resultados (exposição, formato ou definição) | Do resultado final |
| | Do método pelo qual as medidas são obtidas | |
| | Do instrumento ou sistema utilizado | |
| | Da operação (instrumento ou sistema) | |
| Determinada | Da execução (método) | Por uma única medida ou Por um conjunto de medidas |
| | Por um conjunto de medidas | |
| Medida | De uniformidade ou repetibilidade | De confiabilidade |
| Grau | De concordância de medidas repetidas | De conformidade com uma norma ou padrão De proximidade a um valor aceito como ideal ou verdadeiro |
| | De perfeição de um método, instrumento ou sistema | |
| Pode ser | De refinamento no desempenho de uma operação | Absoluta ou Relativa Posicional: Horizontal e Vertical |
| | Absoluta ou Relativa Posicional: Horizontal e Vertical | |
| Vincula-se | A erros aleatórios À dispersão das observações | A erros aleatórios e sistemáticos A leis e padrões A procedimentos e resultados de calibração ⁽¹⁾ |

FONTES: OLIVEIRA (1993), GEMAEL (1994), BUCKNER (1997), GRANT (1997), MAUNE et al. (2001d), HARRINGTON (2002) e VUOLO (2002)

(1) Sistemas não calibrados podem ser fontes de erros sistemáticos.

Uma vez que a precisão “liga-se à ‘repetibilidade’ de observações sucessivas, realizadas em condições semelhantes, pelo mesmo observador e sobre a mesma quantidade física” (GEMAEL, 1994), aquela traduz-se numa medida estatística

(desvio padrão) que permite revelar a tendência das referidas observações em agrupar-se em torno de um valor determinado (média aritmética) (MAUNE et al., 2001d). Desta forma, a precisão acaba incorporando a perfeição do instrumento ou sistema de medição utilizado, seus ajustes apropriados (operação) e aplicação competente (método).

No entanto, quando utilizada apenas na avaliação da perfeição de um instrumento ou sistema de medição, a precisão expressa o grau de refinamento com o qual as observações são obtidas (MAUNE et al., 2001d), ou seja, relaciona-se ao menor valor numérico medido ou estimado para aquelas observações. Neste caso, a precisão muitas vezes se confunde com a resolução de tal instrumento ou sistema, significando a "medida da menor diferença (ou variação) possível em valor ou em posição, obtida com um sistema automático" (OLIVEIRA, 1992).

A exatidão, por sua vez, descreve quanto o resultado de uma medição está próximo do seu valor verdadeiro (VUOLO, 2002). Um valor muito exato é, portanto, um valor muito próximo do valor verdadeiro, com erro total (soma dos erros aleatórios e sistemáticos) muito pequeno (VUOLO, 2002).

Embora, na prática, precisão e exatidão possam ser determinadas de forma distinta, pode-se afirmar que para a avaliação da qualidade dos resultados de uma medição ou levantamento, deve-se levar em consideração não só a adequabilidade dos instrumentos, procedimentos e métodos utilizados na obtenção e determinação das medidas e resultados, como também, a relação destas medidas e resultados com um padrão estabelecido. Afinal, medidas e resultados não são mais que percepções quando analisados isoladamente. A comparação com um padrão, por outro lado, aproxima-os de uma verdade, julgando-os aceitáveis ou não.

4.1.3. Exatidão, Acurácia ou Acuracidade?

O uso muitas vezes conflitante de determinados termos, comuns a diversas áreas do conhecimento, agrava-se quando documentos originalmente publicados em outras línguas passam a ter vocábulos e expressões decalcados para o português.

Para HERNANDES (2001), o decalque é um tipo de empréstimo lingüístico no qual é importante conservar o sentido (bem como a ordem dos elementos) de um vocábulo (ou expressão) original, porém, tomando o cuidado de adaptá-lo à forma fônica da língua que o recebe. É, portanto, um fenômeno sociolingüístico que resulta do contato próximo de duas ou mais línguas onde a língua de maior prestígio sempre acaba influenciando as demais (HERNANDES, 2001).

Como exemplos de decalques, freqüentemente utilizados por diversos autores de diversas áreas, são citados os conhecidos “acurácia” e “acuracidade”, originados do vocábulo inglês “*accuracy*”. Destes, o único a ser dicionarizado e reconhecido pelo seu uso foi “acurácia”, palavra encontrada atualmente nos melhores dicionários da língua portuguesa (entre eles: WEISZFLOG, 1998; FERREIRA, 1999; HOUAISS & VILLAR, 2002). A palavra “acuracidade”, por outro lado, é considerada pelos especialistas em lingüística um decalque lexical corrupto do referido vocábulo e não deve, em hipótese alguma, ser empregada, embora ainda possa ser encontrada em diversas publicações.

Uma vez estabelecido o uso da palavra “acurácia”, qual seria, então, a sua relação com os termos precisão e exatidão, tão importantes na avaliação da qualidade dos resultados de todo tipo de medição?

A acurácia, definida por HOUAISS & VILLAR (2002) como “proximidade entre o valor obtido experimentalmente e o valor verdadeiro na medição de uma grandeza

física”, nada mais é do que a própria expressão da exatidão, tal e qual apresentada no quadro 4.2 e definida por VUOLO (2002).

Acurácia e exatidão são, portanto, termos sinônimos e mantêm, com a precisão, o mesmo tipo de relação. Assim, para autores como VUOLO (2002), a precisão é condição necessária, porém não suficiente, para indicar a qualidade final dos resultados de uma medição ou levantamento. Em outras palavras, “a precisão não tem sentido, a menos que a exatidão seja igualmente alcançada” (OLIVEIRA, 1992).

4.1.4. Precisão e Exatidão (Acurácia): Ampliando Conceitos

Ao avaliar a qualidade do resultado de uma medição ou levantamento, dependendo do instrumento e método empregados, do tipo de grandeza medida, bem como, da referência utilizada, os termos precisão e exatidão (acurácia) podem juntar-se a outros vocábulos ou expressões que acabam ampliando seus significados, tornando-os, inclusive, mais específicos.

Ressalta-se, no entanto, que a mesma confusão que se verifica com relação ao emprego dos termos precisão e exatidão, verifica-se com relação aos termos deles derivados, principalmente no que diz respeito àqueles traduzidos para o português a partir do já mencionado vocábulo inglês “*accuracy*”.

Assim, é comum encontrar na bibliografia nacional, referências aos termos “precisão absoluta” e “precisão relativa” quando, muitas vezes, o seu emprego remete, respectivamente, aos termos “acurácia absoluta” (*absolute accuracy*) e “acurácia relativa” (*relative accuracy*), raramente utilizados na língua portuguesa.

Também são raramente encontrados em publicações nacionais os termos “exatidão absoluta” e “exatidão relativa” (SOUZA et al., 2002), embora o termo

exatidão, de acordo com o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO (2000), seja considerado o correspondente mais apropriado (da língua portuguesa) para o termo original “*accuracy*” (da língua inglesa). VUOLO (2002) alerta para a padronização instituída pelo INMETRO e sugere que a palavra “acurácia” seja mantida como uma alternativa.

Desta forma, os termos “exatidão (acurácia) absoluta” e “exatidão (acurácia) relativa” distinguem-se, respectivamente, dos termos “precisão absoluta” e “precisão relativa”, pelas seguintes razões.

- Pela própria definição de exatidão (acurácia) e de precisão, a primeira remetendo à *comparação com valores verdadeiros ou ideais*, ou ainda, à *comparação com uma norma ou padrão* e, a segunda, à *incerteza de uma medição*.
- Pelo emprego da palavra “absoluta” que, associada ao termo exatidão (acurácia), remete à *relação com um datum* e, associada ao termo precisão, remete à *magnitude da incerteza de um resultado*.
- Pelo emprego da palavra “relativa” que, associada ao termo exatidão (acurácia), remete à *relação entre grandezas medidas ou entre resultados obtidos* e, associada ao termo precisão, remete à *incerteza de um resultado nos termos de uma fração ou proporção do seu valor*.

Assim, enquanto a exatidão (absoluta ou relativa) estabelece uma relação entre grandezas ou resultados (distâncias, direções, posições), a precisão (absoluta ou relativa) estabelece uma relação destas grandezas ou resultados com suas incertezas.

Ainda em relação à padronização de termos instituída pelo INMETRO, este segue normas internacionais que vêm sendo adaptadas para o português desde

1995, ano em que foi lançada a primeira versão nacional do Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia.

A versão mais atual deste documento, lançada em 2000, compreende termos como “exatidão de medição” (*accuracy of measurement*) e “exatidão de um instrumento de medição” (*accuracy of a measuring instrument*). Este último refere-se à “aptidão de um instrumento de medição para dar respostas próximas a um valor verdadeiro” (INMETRO, 2000).

Além dos termos mencionados, pode-se encontrar ainda em publicações nacionais e internacionais os relacionados a seguir: “exatidão (acurácia) posicional” e “precisão posicional”, “exatidão (acurácia) horizontal” ou “vertical” e “precisão horizontal” ou “vertical”. Estes são freqüentemente utilizados por fabricantes de instrumentos ou sistemas de medição para especificar a qualidade com a qual uma ou mais grandezas podem ser determinadas.

Assim, com tamanha variedade de vocábulos e expressões, pode-se, ao mesmo tempo, ampliar as opções de uso em publicações, bem como, incorrer no uso inadequado das mesmas. Para que isto não ocorra é preciso, antes de tudo, compreender e apreender o significado de cada um dos termos mencionados. Caso contrário, corre-se o risco de invalidar um documento ou pesquisa e, até mesmo, de proliferar conceitos e interpretações errôneas acerca da verdadeira qualidade com a qual instrumentos e métodos podem ser empregados e resultados podem ser obtidos.

4.2 ERROS INERENTES AO PROCESSO DE OBTENÇÃO DOS DADOS ALS

Como explicitado anteriormente (Capítulo 2), um sistema ALS é composto, basicamente, pelas seguintes unidades: de posicionamento e orientação (GPS/IMU),

de varredura (*laserscanner*) e de controle (registro e armazenamento dos dados). A cada uma destas unidades correspondem erros inerentes ao seu funcionamento individual e também erros introduzidos pelo seu funcionamento conjunto. Portanto, é importante para o presente trabalho de pesquisa que tais erros sejam descritos, bem como, que a influência destes erros sobre a qualidade dos resultados obtidos seja conhecida.

De acordo com HUISING & PEREIRA (1998), 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.

Assim, um estudo sobre os erros inerentes a cada uma das unidades mencionadas, bem como, sobre os erros que afetam o funcionamento conjunto destas unidades, é apresentado a seguir.

4.2.1. Unidade de Posicionamento e Orientação

Como mencionado no Capítulo 2 do presente trabalho de pesquisa, a unidade de posicionamento e orientação de um sistema ALS compreende dois sensores: um receptor GPS e uma IMU. Juntos, GPS e IMU permitem o geo-referenciamento da pegada, sobre a superfície do terreno, de cada pulso laser emitido pelo sistema.

Apesar de integrados, GPS e IMU possuem características funcionais e operacionais distintas e, por conseguinte, erros inerentes que podem ser observados e analisados isoladamente. Assim,

a) Relativamente às observações GPS obtidas a bordo da plataforma, pode-se afirmar que as principais fontes de erro são:

- Número de satélites observados
- Distribuição ou geometria dos satélites observados
- Propagação do sinal GPS na atmosfera
- Multicaminhamento
- Excentricidade da antena do receptor aerotransportado
- Distância entre o receptor aerotransportado e o(s) receptor(es) base

No que diz respeito ao número de satélites observados e à geometria dos satélites (indicada pelo PDOP - *Positional Dilution Of Precision*), LOHMANN & KOCH (1999) afirmam que ambas têm menor importância na composição da precisão das medidas GPS uma vez que o sistema de satélites GPS encontra-se perfeitamente estabelecido. Autores como FLOOD & SATALICH (2001) e MOSTAFA & HUTTON (2001a), por outro lado, evidenciam que apesar de o sistema espacial GPS compreender, atualmente, 29 satélites (Bloco II, IIA e IIR), a geometria dos mesmos ainda é uma fonte importante de erros para os dados GPS. Tanto que GREJNER-BRZEZINSKA (2001) considera a geometria uma fonte amplificadora dos efeitos sistemáticos e aleatórios sobre aqueles dados. Assim, observações realizadas durante os períodos de PDOP altos podem resultar em posicionamentos não acurados e, embora alguns fabricantes de receptores GPS recomendem valores de PDOP inferiores a sete para os posicionamentos cinemáticos, algumas aplicações requerem posicionamentos mais rigorosos e, portanto, devem ser realizados com valores de PDOP bem menores (SATALICH, 2001). É por esta razão que MOSTAFA et al. (2001) recomendam, para os posicionamentos diferenciais

utilizando receptores GPS aerotransportados, valores de PDOP iguais ou inferiores a três.

Quanto ao número de satélites observados, tanto nos posicionamentos estáticos como nos cinemáticos, em teoria, um mínimo de quatro satélites é requerido, porém, sabe-se que satélites adicionais fornecem um maior número de observações e, conseqüentemente, uma solução mais robusta do posicionamento. É por esta razão que SCHERZINGER (2000) considera as observações GPS obtidas com até quatro satélites como “parciais” e, desta forma, insuficientes ao posicionamento realizado com GPS aerotransportado.

No que diz respeito à propagação do sinal GPS na atmosfera, KOCAMAN (2003) afirma ser esta a principal fonte de erros das medidas GPS. Para este mesmo autor, os efeitos causados pela propagação do sinal GPS são imprevisíveis e, por isto, muito difíceis de modelar. Entre os efeitos atmosféricos mais comuns encontram-se os atrasos causados pela ionosfera e pela troposfera. Os atrasos da ionosfera, segundo MOSTAFA & HUTTON (2001b), são muito mais importantes e, por serem efeitos dependentes da frequência do sinal GPS, podem ser minimizados com o uso de receptores GPS de dupla frequência (LEIK, 1995; KAPLAN, 1996; SATALICH 2001). Os erros causados pelos atrasos da troposfera, por sua vez, são independentes da frequência do sinal GPS e resultam, principalmente, de efeitos não modelados do vapor d'água na atmosfera. Por esta razão, observações GPS realizadas com receptores de dupla frequência não são capazes de minimizá-los. Tais erros, no entanto, podem ser modelados a partir do conhecimento de alguns parâmetros meteorológicos, como temperatura, umidade e pressão.

Tão importante quanto compreender os efeitos dos atrasos atmosféricos sobre as observações GPS, é compreender que tais atrasos são sistematicamente

correlacionados à distância que separa o receptor GPS aerotransportado dos receptores GPS localizados sobre as estações base terrestres (SATALICH, 2001). Diversos autores, inclusive fabricantes de sistemas ALS, concordam que a distância entre o receptor aerotransportado e um ou mais receptores base terrestres deve ser inferior a 50 km. No entanto, para autores como CRAMER & HAALA (1999) e BEHAN (2000), somente distâncias inferiores a 30 km são capazes de prover acurácias posicionais da ordem do decímetro, desde que atendidas as condições de uma boa solução das ambigüidades e de uma geometria razoável dos satélites. BURMAN (2000), por outro lado, afirma que alguns resultados têm indicado que linhas base de até 300 km podem ser utilizadas. Tais resultados, no entanto, só podem ser obtidos para trajetórias determinadas após a missão e com a devida modelagem dos atrasos atmosféricos. As afirmações de BURMAN (2000) concordam, portanto, com os resultados obtidos de testes realizados por BRUTON et al. (2001) e que revelaram acurácias posicionais da ordem de 2,5 e 1,2 decímetros para plataformas distantes das estações base entre 160 e 420 km e entre 40 e 90 km, respectivamente. Nestes casos, as estações base terrestres utilizadas (e caracterizadas como permanentes), faziam parte de uma rede de monitoramento contínuo. É importante ressaltar que BRUTON et al. (2001) e MOSTAFA & HUTTON (2001a) aconselham a utilização de bases permanentes quando o estabelecimento de bases dedicadas é dificultado pela localização (remota) e tipo de terreno (difícil acesso), ou, quando a continuidade das observações não pode ser garantida (resultado de efeitos ambientais, problemas com o receptor e/ou com a operação dos mesmos). Segundo estes mesmos autores, o estabelecimento de múltiplas estações base dedicadas, quando possível, assegura que a distância máxima (linha base) entre o receptor remoto e os de

referência esteja entre 10 e 50 km. No caso de linhas base com extensão superior a 100 km, os mesmos autores recomendam utilizar as observações de múltiplas estações base permanentes, a fim de obter resultados mais acurados.

Ainda em relação à extensão máxima das linhas base, MOSTAFA (2002) observa que esta pode ser limitada pela atividade solar diária e sazonal, fator que, sem dúvida, pode alterar as características de propagação do sinal GPS na atmosfera. Variações repentinas da radiação solar podem, por exemplo, alterar a densidade da ionosfera, provocando a degradação do sinal e, até mesmo, a sua interrupção por um certo período de tempo. Para autores como SKONE et al. (2004), as condições solares provêm as maiores fontes de erro no posicionamento GPS, pois, outras fontes como as variações atmosféricas e meteorológicas podem ser mitigadas por meio da correta seleção do tipo de antena, além do uso de modelos troposféricos adequados.

Observações GPS podem, ainda, ser afetadas pelo efeito dos múltiplos caminhos seguidos pelo sinal GPS devido às reflexões que ocorrem durante a sua propagação. Tal efeito, denominado multicaminhamento (BURMAN, 2000; FLOOD & SATALICH, 2001; MOSTAFA & HUTTON, 2001a; WRIGHT & FRENCH, 2001; KOCAMAN, 2003), introduz erros na medida de fase da portadora que dependem da força e do atraso dos sinais refletidos, das características atenuantes da antena GPS utilizada e da sofisticação do receptor utilizado (LEIK, 1995). Para SATALICH (2001), o multicaminhamento afeta, em especial, a componente vertical (relativa ao elipsóide) das observações GPS. De acordo com este mesmo autor, receptores aerotransportados podem experimentar multicaminhamento significativo pelas reflexões da fuselagem da plataforma. Estas tendem a ser mais susceptíveis ao multicaminhamento, principalmente quando os satélites observados estão com baixa

elevação. Num posicionamento estático, tal efeito poderia ser minimizado pela média de observações redundantes, o que não se aplica ao posicionamento cinemático, pois não há redundância das observações. Além do multicaminhamento, a acurácia das observações GPS é também influenciada por outros fatores, como os deslocamentos de ar e as diferenças de pressão (próprios dos sistemas aerotransportados), além da velocidade da plataforma, das interferências atmosféricas e da (já mencionada) radiação solar (FOWLER, 2001).

No que diz respeito à antena do receptor GPS aerotransportado, esta deve estar posicionada, externamente à fuselagem da plataforma, tão próxima quanto possível dos demais sensores a bordo, a fim de que os efeitos de erros adicionais, introduzidos pela sua excentricidade (*offset*), sejam minimizados (CRAMER & HAALA, 1999; BURMAN, 2000). Os valores de *offset* (em relação à IMU e/ou ao dispositivo de varredura laser) são normalmente determinados utilizando-se métodos convencionais de levantamentos terrestres (CRAMER & HAALA, 1999; CRAMER et al., 2000; GREJNER-BRZEZINSKA, 2001). Tais valores são introduzidos como parâmetros de calibração do sistema ALS, durante o processamento pós-missão da trajetória GPS. Ainda em relação à antena do receptor GPS aerotransportado, medidas do centro de fase da antena e sua modelagem (FLOOD & SATALICH, 2001) são requeridas a fim de eliminar tendenciosidades (*biases*) diferenciais da própria antena. Uma vez que modelos diferentes de antenas requerem modelagens diferentes para o centro de fase, erros sistemáticos não detectáveis podem contaminar a componente vertical da solução GPS quando tais modelagens são ignoradas ou mal realizadas (SATALICH, 2001).

Sabe-se que os levantamentos realizados com sistemas ALS empregam, para o geo-referenciamento dos pulsos laser emitidos, o método cinemático diferencial

(DGPS) e utilizam receptores GPS (aerotransportados e base) de dupla frequência. Nestes levantamentos, acurácias da ordem do decímetro podem ser alcançadas desde que as observações estejam baseadas na medida de fase da portadora. A medida de fase da portadora, por sua vez, implica na correta fixação das ambigüidades que, segundo LOHMANN & KOCH (1999), também pode apresentar-se como uma fonte de erros sistemáticos para as observações GPS. Assim como outros efeitos acima descritos, a solução correta das ambigüidades depende do número de satélites observados, da geometria, do multicaminhamento e da propagação do sinal na ionosfera (MOSTAFA 2002). Outros fatores importantes para a fixação das ambigüidades são a extensão da linha base e a continuidade da recepção do sinal GPS. Para linhas base muito extensas (100 e 500 km), a solução GPS assume que os efeitos sistemáticos do multicaminhamento, das órbitas e da atmosfera foram eliminados, o que pode resultar numa solução de trajetória falsa (SATALICH, 2001). A interrupção do sinal GPS, por sua vez, acarreta falhas na fixação das ambigüidades (AL-BAYARI, 2000), diminuindo consideravelmente a acurácia final da solução GPS (LOHMANN & KOCH, 1999).

Ainda em relação aos erros inerentes às observações GPS, é preciso considerar as tendenciosidades (*biases*) dependentes dos satélites (órbita e relógio) e dos receptores (relógio e ruídos), além dos erros residuais produzidos pela modelagem de alguns dos erros mencionados (ionosfera, troposfera, entre outros).

É importante ressaltar ainda que as observações dos receptores base terrestres também estão sujeitas aos efeitos das diversas fontes de erros citadas, porém, em menor grau, uma vez que os mesmos não se encontram em movimento e sua localização pode ser idealmente planejada. Autores como LEIK (1995) e SATALICH (2001) alertam ainda para os possíveis erros grosseiros (enganos) que

podem ocorrer durante o registro das observações aéreas e terrestres, durante as transferências de dados e durante o processamento dos mesmos. Muitas vezes, tais erros podem ser difíceis de identificar e eliminar. Para tanto, LEIK (1995) aconselha que seja efetuada uma análise rigorosa dos resíduos da solução GPS, a fim de garantir que a decisão de aceitar ou rejeitar as observações seja a mais acertada possível.

Na seqüência apresenta-se uma tabela (4.1) relativa ao posicionamento GPS (padrão e diferencial) contendo as principais fontes de erro e suas correspondentes magnitudes típicas.

TABELA 4.1 - FONTES DE ERRO DO POSICIONAMENTO GPS

| FONTES DE ERRO | MAGNITUDE TÍPICA (m) ⁽¹⁾ | |
|---------------------|-------------------------------------|-----------------|
| | GPS Padrão | GPS Diferencial |
| Relógio do Satélite | 1,5 | 0 |
| Órbita | 2,5 | 0 |
| Ionosfera | 5,0 | 0,4 |
| Troposfera | 0,5 | 0,2 |
| Ruído do Receptor | 0,3 | 0,3 |
| Multicaminhamento | 0,6 | 0,6 |

FONTE: TRIMBLE Navigation Limited (2004)

(1) Por satélite.

b) Relativamente aos dados coletados pela IMU a bordo da plataforma, pode-se afirmar que as principais fontes de erro são:

- Tipo da IMU
- Inicialização da IMU
- Alinhamento da IMU em relação a outros sensores
- Campo gravitacional terrestre

Para STOVALL (1997), a navegação inercial constitui um método particular de navegação, consumado pela integração de dois conjuntos de sensores (giroscópios e acelerômetros) utilizados no cômputo da posição, velocidade e atitude de uma plataforma em movimento. Erros podem estar relacionados, portanto, não só ao funcionamento do sistema inercial como um todo, mas também, ao funcionamento particular de cada um dos referidos conjuntos.

Para uma unidade de medida inercial (IMU), tais erros incluem a não-ortogonalidade das tríades de acelerômetros e giroscópios, fator de escala dos giroscópios e acelerômetros, desvios constantes dos giroscópios e acelerômetros, além de outros desvios aleatórios e ruídos (SKALLOUD & SCHWARZ, 1998). O grau de influência destes erros no geo-referenciamento dos pontos coletados por um sistema ALS é, portanto, dependente do tipo de IMU utilizada, bem como, da forma como aqueles mesmos erros são modelados.

Segundo MOSTAFA & HUTTON (2001b), IMUs de alta qualidade utilizam acelerômetros pendulares (*force-rebalance accelerometers*) e giroscópios cuja relação ruído/tamanho é a melhor possível. Dentre os que apresentam o menor ruído em relação ao seu tamanho estão os *Fiber Optic Gyros* (FOG) e os *Dry Tuned Gyros* (DTG). Estas são tecnologias populares e atualmente muito utilizadas em aplicações aerotransportadas graças à sua relação custo/desempenho. Para SKALLOUD (2002), tais tecnologias são vantajosas, pois apresentam baixa sensibilidade a vibrações (FOG), melhor acurácia direcional instantânea (DTG) e menor peso e tamanho. Sem dúvida, peso e tamanho são requisitos básicos fundamentais quando a intenção é formar, com o sensor de mapeamento (câmara e/ou *scanner*) um único corpo rigidamente montado.

Uma vez que o princípio da navegação inercial está baseado na medida das acelerações lineares e das taxas angulares de um corpo (relativamente a um sistema inercial coordenado), informações acerca da posição, velocidade e atitude são obtidas por meio de um processo de integração onde um alinhamento inicial (para o referido corpo) é requerido. Assim, enquanto a primeira integração (das acelerações lineares e taxas angulares) fornece informações de velocidade e atitude, a segunda integração fornece informações de posição. Devido à qualidade dos sensores inerciais utilizados (acelerômetros e giroscópios) a acurácia da IMU é muito alta para períodos curtos de tempo, degradando com o acúmulo dos erros inerentes ao processo de integração. É por esta razão que a acurácia da IMU não é constante, mas, dependente do tempo (CRAMER & HAALA, 1999).

Além dos erros inerentes ao processo de integração, a acurácia da IMU é também influenciada por erros adicionais introduzidos a partir da sua inicialização, ou seja, a partir do seu alinhamento inicial. Em plataformas aerotransportadas, tal alinhamento pode ser executado de duas formas: estática, com a plataforma em terra; ou dinâmica, com a plataforma em movimento (alinhamento normalmente denominado *in-flight* ou *on-the-fly*). Este último é uma importante característica das IMUs modernas e compreende três estágios: nivelamento do curso (atribui valores iniciais para *pitch* e *roll*); alinhamento do curso (em relação ao vetor da gravidade, ou seja, atribui valores iniciais para *heading*); e orientação do curso (em relação ao norte verdadeiro, ou seja, atribui valores iniciais para o azimute). Para SKALLOUD (2002), uma parte significativa dos erros residuais de orientação pode ser determinada pela qualidade do alinhamento *in-flight*. Parte destes erros pode ainda ser causada pelo não alinhamento entre a IMU e o *laserscanner* e, neste caso, as rotações entre a unidade de medida inercial e o varredor laser, além dos desvios

(*offset*) entre a cabeça do laser e o centro da IMU, devem ser determinados (BURMAN, 2000). De acordo com CRAMER et al. (2000), tais ângulos e desvios não são diretamente observáveis (por técnicas convencionais de levantamento), mas podem ser determinados indiretamente por meio de procedimentos apropriados de calibração.

Como explicitado anteriormente, durante o vôo a acurácia das atitudes decresce devido aos desvios nos giroscópios e acelerômetros. As acelerações medidas incluem não só o movimento da plataforma como também a força gravitacional e forças criadas pela rotação da Terra. Assim, a fim de determinar o movimento correto da plataforma, tais medidas devem ser fatoradas (decompostas em fatores). Isto significa que anomalias gravitacionais podem constituir uma fonte importante de erros. Um erro, portanto, na direção do vetor da gravidade causa erros de aceleração em relação aos três eixos do sistema de coordenadas terrestres, limitando a acurácia do geo-referenciamento. De acordo com SKALLOUD (1999b), a acurácia da atitude pode ser melhorada se o alinhamento dinâmico da IMU for repetido regularmente durante o vôo (principalmente se a velocidade e a direção deste forem constantes para um longo período de tempo).

Outras limitações incluem: a precisão com que as acelerações, as taxas angulares e os intervalos de tempo são medidos (FOWLER, 2000); a altura de vôo (FOWLER, 2001); as vibrações da plataforma (SCHWARZ, 1995); as variações *in-flight* dos elementos de calibração (KOCAMAN, 2003); e a rigidez do sensor de mapeamento em relação à IMU (GREJNER-BRZEZINSKA & TOTH, 2000).

Para FLOOD & SATALICH (2001), apesar da variedade de IMUs comercialmente disponível atualmente, especificações típicas (apontadas em relação ao custo/desempenho, para as unidades comercializadas pela APPLANIX)

sugerem erros de orientação da ordem de $0,005^\circ$ para *pitch* e *roll* e de $0,008^\circ$ para *heading*.

c) Relativamente ao funcionamento integrado GPS/IMU, as principais fontes de erro são:

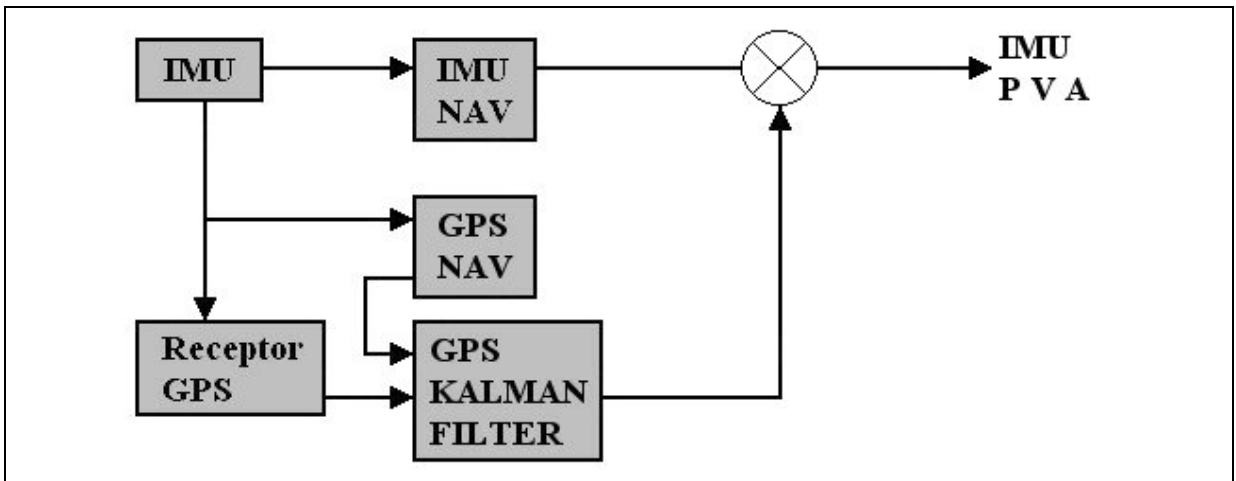
- Sincronização das medidas
- Excentricidade da antena GPS em relação à IMU
- Integração dos dados brutos GPS e IMU

De acordo com GREJNER-BRZEZINSKA (2001), a integração GPS/IMU pode se dar de três maneiras: com os sensores desacoplados (*uncoupled mode*); com os sensores fracamente acoplados (*loosely coupled mode*); e com os sensores fortemente acoplados (*tightly coupled mode*). Nos dois primeiros modos, GPS e IMU fornecem soluções independentes para o posicionamento e a atitude, que são posteriormente combinadas numa solução única. O terceiro modo é mais avançado e sofisticado. Nele, ambos os sistemas provêm dados brutos (medidas de código e de fase da portadora; acelerações e taxas angulares) que são combinados em uma solução única para o posicionamento da plataforma. Ainda segundo a mesma autora, a técnica mais apropriada para combinar as medidas inerciais com as observações GPS é por meio de uma filtragem Kalman.

A filtragem Kalman, segundo COLOMINA et al. (2002), é uma técnica muito utilizada para a determinação, em tempo real ou pós-missão, da solução da trajetória de um sistema. Para KOCAMAN (2003), esta constitui um procedimento efetivo e versátil para a combinação de dados de sensores ruidosos (GPS e IMU) e para a estimação do estado de um sistema com dinâmicas incertas (plataforma). A filtragem Kalman fornece, portanto, uma estimativa ótima para o posicionamento e atitude de

um determinado sistema (BURMAN, 2000), podendo ser aplicada de duas formas distintas: descentralizada e centralizada. Na forma descentralizada (aplicada a sensores desacoplados e fracamente acoplados), filtros independentes são utilizados para o GPS e para a IMU, sendo, os resultados da filtragem GPS utilizados para atualizar a IMU. Na forma centralizada (aplicada a sensores fortemente acoplados), um filtro comum é utilizado para o GPS e para a IMU, possibilitando uma retro-alimentação das estimativas dos erros do sistema para a correção das medidas. As figuras 4.1, 4.2 e 4.3 ilustram, de forma esquemática, as duas formas de aplicação da filtragem Kalman mencionadas acima, para o posicionamento em tempo real.

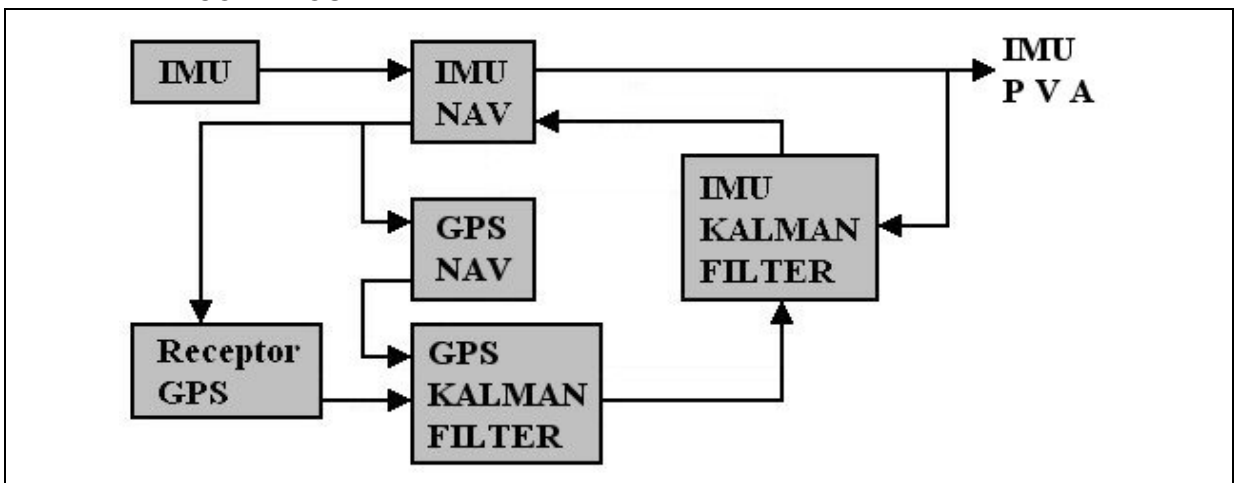
FIGURA 4.1 – FILTRAGEM KALMAN DESCENTRALIZADA: SENSORES DESACOPLADOS



FONTE: Adaptada de BURMAN (2000)

NOTA: P = Posição, V = Velocidade e A = Atitude.

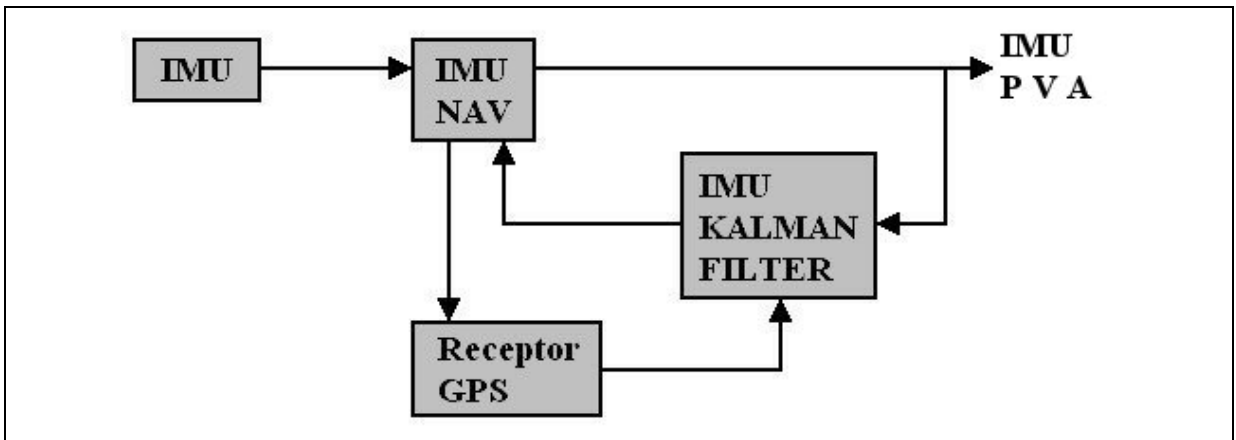
FIGURA 4.2 - FILTRAGEM KALMAN DESCENTRALIZADA: SENSORES FRACAMENTE ACOPLADOS



FONTE: Adaptada de BURMAN (2000)

NOTA: P = Posição, V = Velocidade e A = Atitude.

FIGURA 4.3 - FILTRAGEM KALMAN CENTRALIZADA: SENSORES FORTEMENTE ACOPLADOS



FONTE: Adaptada de BURMAN (2000)

NOTA: P = Posição, V = Velocidade e A = Atitude.

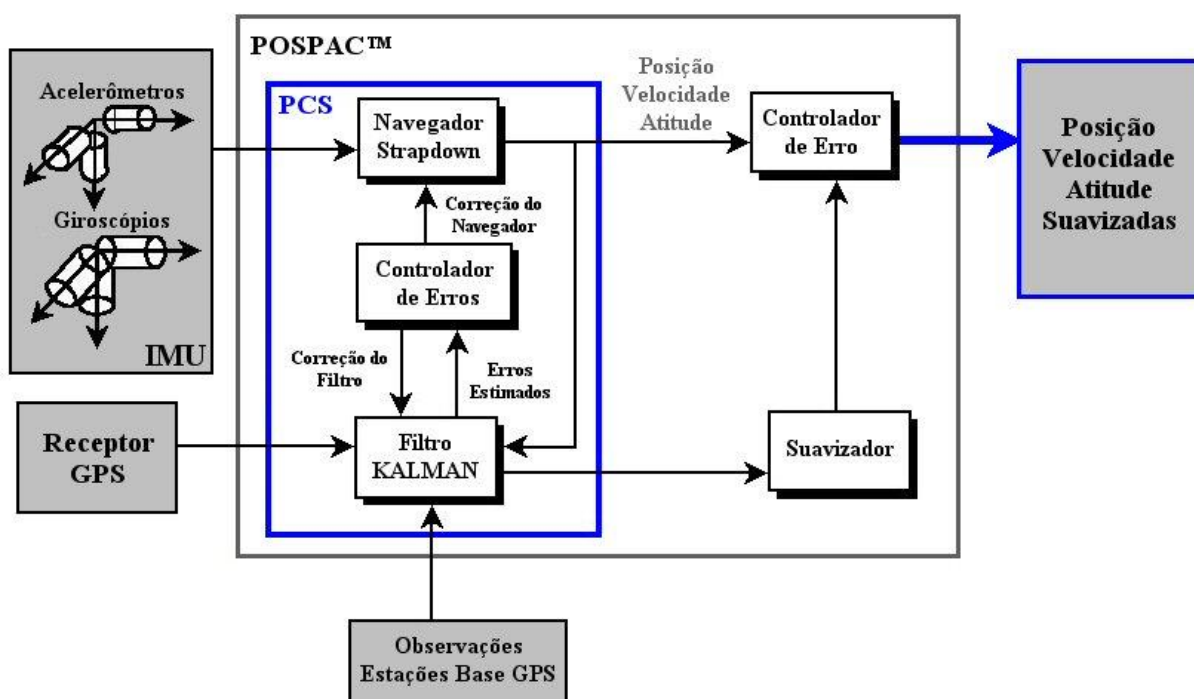
De acordo com STOVALL (1997), quando utilizada na integração GPS/IMU, a filtragem Kalman elimina ruídos inerentes ao alinhamento da unidade de medida inercial, aumentando assim, a acurácia deste.

Existe, de acordo com BALTSAVIAS (1999c), uma tendência mundial em utilizar, para a solução da trajetória dos sistemas ALS comercialmente disponíveis, os sistemas integrados desenvolvidos pela Applanix e conhecidos como POSTM/AV. Estes integram as tecnologias GPS e inercial em um sistema único de posicionamento e orientação que é preciso e robusto e que conserva as vantagens de ambos os sensores envolvidos enquanto minimiza suas limitações. O coração destes sistemas é, na verdade, o *software* de navegação inercial (*Integrated Inertial Navigation* - IIN) que pode ser implementado tanto em tempo-real como pós-missão, por meio de outro *software* denominado POSPacTM. Este último é utilizado para computar uma solução ótima para a navegação inercial que resulta da integração do processamento dos dados brutos GPS e IMU coletados durante o voo e das observações GPS registradas nas estações base. Tal integração conserva a acurácia dinâmica da navegação inercial e também a acurácia absoluta do GPS (MOSTAFA & HUTTON, 2001b). Neste caso, a filtragem Kalman implementa um conjunto de equações diferenciais lineares e discretas que modelam os erros do navegador inercial e da IMU que o comanda. Diferenças entre as posições do navegador inercial e do GPS são processadas pelo filtro Kalman para estimar o erro de posição (dependente do tempo) do navegador inercial. Uma vez que este erro é função dos erros de orientação dos sensores inerciais, observar os erros de posição do navegador inercial significa estimar, implicitamente, os erros de orientação da IMU (MOSTAFA & HUTTON, 2001b). Para o cômputo das estimativas ótimas dos erros do navegador inercial e da IMU, utiliza-se um suavizador (somente para

posicionamentos determinados após a missão) que combina os dados de tempo passado às estimativas de tempo futuro (do próprio filtro). Assim, é possível obter estimativas de erro mais acuradas e aplicá-las à solução integrada da navegação inercial gerando o que se denomina SBET (*Smoothed Best Estimate Trajectory*).

A figura 4.4 ilustra como é feita a integração dos dados brutos GPS/IMU para a solução ótima da trajetória do POSTM/AV, utilizando o software POSPacTM.

FIGURA 4.4 - INTEGRAÇÃO GPS/IMU (POSPACTM)



FONTE: Adaptada de MOSTAFA et al. (2001)

Nota: PCS = POS Computer System.

MOSTAFA & HUTTON (2001b) apresentam, ainda, as acurácias (absolutas e relativas) pós-processadas para cada modelo POSTM/AV atualmente disponível no mercado. Estas foram determinadas com base em manobras (para atualização do alinhamento *in-flight* do sistema) realizadas a cada dez minutos de vôo. As tabelas 4.2 e 4.3 apresentam os valores de acurácia referidos acima.

TABELA 4.2 - ACURÁCIA ABSOLUTA DOS PARÂMETROS DE NAVEGAÇÃO

| PARÂMETROS DE ACURÁCIA (RMS) | POS/AV 210 | POS/AV 310 | POS/AV 410 | POS/AV 510 |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Posição (m) | 0,05 - 0,30 | 0,05 - 0,30 | 0,05 - 0,30 | 0,05 - 0,30 |
| Velocidade (m/s) | 0,010 | 0,010 | 0,005 | 0,005 |
| Roll e Pitch (°) | 0,040 | 0,013 | 0,008 | 0,005 |
| Heading Verdadeiro (°) | 0,080 | 0,035 | 0,015 | 0,008 |

FONTE: Adaptada de MOSTAFA & HUTTON (2001b)

TABELA 4.3 - ACURÁCIA RELATIVA DA ORIENTAÇÃO

| PARÂMETROS DE ACURÁCIA (RMS) | POS/AV 210 | POS/AV 310 | POS/AV 410 | POS/AV 510 |
|-------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Ruído Aleatório (°/h) | 0,20 | 0,15 | 0,07 | < 0,01 |
| Tendenciosidade Residual (°/h a 1s) | 0,75 | 0,5 | 0,5 | 0,1 |

FONTE: Adaptada de MOSTAFA & HUTTON (2001b)

NOTA: h = hora.

Para MOSTAFA (2002), é preciso monitorar cada etapa do processo de aquisição dos dados ALS, bem como do processamento pós-missão, a fim de que a avaliação da qualidade com a qual o geo-referenciamento dos pontos laser é obtido seja confiável e consistente. Assim, as fontes de erro devem ser monitoradas apropriadamente, a fim de garantir que a acurácia da solução não esteja degradada. Para tanto, o *software* POSPac™ fornece alguns indicadores de qualidade, como os resíduos GPS/IMU, que representam estatísticas das diferenças corrigidas entre a solução GPS e a solução inercial, para cada época GPS. Quando a integração é realizada com sucesso, tais resíduos indicam que todas as fontes de erros tendenciosos dos dados foram removidas (MOSTAFA et al., 2001).

É importante ressaltar que a solução integrada da trajetória de um sistema aerotransportado só é possível se houver uma sincronização precisa do tempo entre os sensores envolvidos. Tal sincronização é realizada pela troca de sinais entre os sensores e pelo registro destes sinais em relação a um sistema de tempo comum

(normalmente provido pelo GPS). De acordo com GREJNER-BRZEZINSKA (2001), a sincronização do tempo deve ter uma precisão mínima de 0,1 ms se a intenção for evitar erros ao nível do centímetro (ou até maiores) no posicionamento. Para melhor compreender quais são os erros que afetam a sincronização do tempo entre GPS e IMU, apresenta-se o quadro 4.3.

QUADRO 4.3 - FONTES DE ERRO RELATIVAS À SINCRONIZAÇÃO GPS/IMU

| FONTES DE ERRO | | MITIGAÇÃO POSSÍVEL |
|-----------------------------------|--|---|
| Gerais | Específicas | |
| Atraso interno do <i>hardware</i> | Conversão A/D Processamento DSP interno Transmissão às portas de comunicação | Especificadas pelo fabricante Calibração de um atraso constante |
| Atraso na transmissão dos dados | Comunicação <i>board/protocol</i> | Calibração de um atraso constante |
| Atraso no registro | Leitura do relógio do computador Prioridades IRQ do computador | Código de baixo nível e relógio de tempo real Temporizador multi I/O |

FONTE: Adaptado de SKALLOUD (1999b)

NOTAS: A/D = Analógico/Digital, DSP = Processamento do Sinal Digital, IRQ = Requerimento de Interrupção e I/O = Entrada/Saída

Para SKALLOUD (1999b), a integração GPS/IMU também é afetada pela disposição dos sensores a bordo da plataforma. Uma montagem ineficiente altera a performance de todo o sistema, sendo os erros derivados muito difíceis de modelar. Por outro lado, quando a disposição é planejada com cuidado, minimiza-se o efeito dos erros de calibração inerentes à determinação dos *offsets* (IMU em relação à antena GPS) e evita-se a ocorrência de movimentos diferenciais entre os sensores.

Ainda segundo SKALLOUD (1999a), a avaliação da performance de um sistema integrado GPS/IMU é um processo complexo e depende de uma variedade de parâmetros. A integração, apesar de não eliminar completamente todos os erros inerentes aos sensores (SKALLOUD, 2002), é capaz de determinar posições,

velocidades e atitudes com maior grau de acurácia do que os sensores isoladamente (BURMAN, 2000; CRAMER et al., 2000). A integração, portanto, é o único meio de prover um conjunto completo de parâmetros navegacionais (posição e atitude) a altas taxas de amostragem, de reduzir os erros aleatórios da solução GPS e de manter esta solução, mesmo sob interferências e dinâmicas severas (GREJNER-BRZEZINSKA, 2001).

Para melhor compreender os efeitos da integração GPS/IMU, apresenta-se a seguir um quadro (4.4) resumo das vantagens e desvantagens associadas ao funcionamento isolado e conjunto dos referidos sensores.

QUADRO 4.4 - INTEGRAÇÃO GPS/IMU: VANTAGENS E DESVANTAGENS

| | VANTAGENS | DESVANTAGENS |
|----------------|--|--|
| GPS | <p>Alta acurácia absoluta para posição e velocidade</p> <p>Acurácia uniforme ao longo do tempo</p> <p>Apropriado para levantamentos de longa duração</p> | <p>Sistema não-autônomo</p> <p>Baixa taxa de amostragem dos dados (1 a 10 Hz)</p> <p>Afetado pelas condições atmosféricas</p> <p>Moderada acurácia absoluta para atitude (Múltiplas Antenas)</p> <p>Lapsos de ciclo e perda dos satélites</p> |
| IMU | <p>Alta acurácia relativa para posição, velocidade e atitude</p> <p>Alta taxa de amostragem dos dados (até 256 Hz)</p> <p>Sistema autônomo</p> | <p>Acurácia decresce com o tempo</p> <p>Apropriada para levantamentos de curta duração</p> <p>Afetada pelo campo gravitacional terrestre</p> |
| GPS/IMU | <p>Alta acurácia para posição e velocidade</p> <p>Atitude determinada com precisão</p> <p>Observações redundantes e complementares</p> <p>Navegação contínua mesmo com a perda do sinal GPS</p> <p>Lapsos de ciclo detectados e corrigidos</p> <p>Determinação do vetor da gravidade</p> | <p>Complexidade e estabilidade da calibração do sistema</p> <p>Definição de um sistema de tempo comum (sincronização precisa)</p> |

FONTES: SKALLOUD (1999a), BURMAN (2000), GREJNER-BRZEZINSKA (2001), HONKAVAARA et al. (2002), KOCAMAN (2003)

4.2.2. Unidade Laser de Medida e Varredura

A unidade laser de medida e varredura, como explicitado no Capítulo 2 do presente trabalho de pesquisa, é responsável pela emissão do feixe laser (na forma pulsada) e sua conseqüente detecção após interação (do mesmo) com a superfície do terreno. Para tanto, a referida unidade é composta de um dispositivo laser (*laser rangefinder* - LRF) utilizado na medida das distâncias (entre a plataforma e a superfície do terreno) e um conjunto de espelhos giratórios (*scanner*) utilizado para desviar o feixe emitido em direções pré-estabelecidas. Assim, relativamente ao *laserscanner*, diversos autores apontam como principais fontes de erro a medida das referidas distâncias, bem como, a medida dos ângulos de varredura instantâneos (deflexões dos espelhos).

A medida das distâncias está associada ao alcance máximo do dispositivo laser. Para BALTSAVIAS (1999b), embora o alcance máximo dependa da taxa de repetição do laser (PRF) e da resolução com que os intervalos de tempo (entre a emissão e recepção do pulso) são medidos, aquele é fortemente afetado, entre outros, pela potência e divergência do feixe, pelas condições atmosféricas, pela interação com a superfície do terreno (reflexibilidade do alvo), pela sensibilidade do detector e pela altura de vôo.

De acordo com FLOOD & SATALICH (2001), sob condições normais de operação e para sistemas apropriadamente calibrados, o erro de alcance esperado para um sistema ALS aerotransportado está entre duas e três polegadas (aproximadamente cinco e oito centímetros). Sabe-se, no entanto, que a atmosfera distorce o caminho do feixe laser enquanto este trafega até o alvo e retorna, introduzindo, assim, um erro de direção que precisa ser corrigido. Os efeitos atmosféricos, sob o feixe laser, podem ser minimizados (mas não eliminados) por

meio de um modelo atmosférico apropriado introduzido na fase de processamento dos dados ALS.

Ao contrário de BALTSAVIAS (1999b), WEHR E LOHR (1999) afirmam que o alcance máximo de um dispositivo laser é limitado pelo intervalo máximo de tempo que o contador de tempo (relógio) utilizado é capaz de medir e também pela perda de energia do sinal laser durante a sua trajetória. Estes mesmos autores afirmam ainda que, além do alcance máximo, parâmetros como a resolução e acurácia do alcance são decisivos na avaliação da qualidade dos dados ALS obtidos. A resolução do alcance é função da resolução com que os intervalos de tempo (entre a emissão e detecção do sinal) são medidos e, portanto, dependentes da qualidade do relógio utilizado. A acurácia do alcance, por sua vez, é inversamente proporcional à raiz quadrada da razão sinal-ruído (S/N - *signal to noise ratio*) do detector e depende, basicamente, da força do sinal (potência emitida e recebida), da sensibilidade do detector, da divergência do feixe e da duração do pulso. Assim, para uma dada energia, quanto menor a duração do pulso, mais alta a sua potência e menor o erro relativo à sua detecção (BALTSAVIAS, 1999b).

No que diz respeito à medida dos ângulos de varredura instantâneos, em função da localização dos espelhos giratórios (geralmente na cabeça do sensor ALS e próximos ao transmissor do dispositivo laser), estes não se movem a uma taxa constante, afetando, assim, a acurácia posicional do sistema. Esta técnica de varredura, no entanto, ainda é considerada pelos fabricantes de sistemas ALS como a que oferece os melhores resultados (BURTCH, 2002). Assim, a correção do movimento inconstante dos espelhos (principalmente nas extremidades das faixas varridas) é realizada durante a fase de processamento, sendo os pontos coletados próximos às bordas, normalmente eliminados.

4.2.3. Integração das Diversas Unidades

Uma vez relacionados e analisados os erros inerentes aos conjuntos de dados obtidos por cada uma das unidades que compõem um sistema de varredura laser aerotransportado, resta analisar quais fontes de erro têm maior influência sobre o conjunto de dados obtido do funcionamento integrado destas mesmas unidades.

Assim, como principais fontes de erro dos dados brutos ALS, pode-se relacionar:

- Erros inerentes a cada unidade de medida (GPS, IMU, *laserscanner*)
- Sincronização das medidas obtidas por cada unidade
- Calibração do sistema integrado
- Tipo de relevo e cobertura

No que diz respeito aos erros inerentes a cada unidade de medida compreendida por um sistema ALS e, ao funcionamento conjunto destas unidades, o quadro 4.5 apresenta as fontes de erro GPS/IMU/*laserscanner* consideradas significativas à composição dos erros que afetam o conjunto de dados brutos ALS.

QUADRO 4.5 - PRINCIPAIS FONTES DE ERRO DOS DADOS BRUTOS ALS

| GPS | IMU | LASERSCANNER | INTEGRAÇÃO |
|----------------------------------|--|--|--|
| Atraso da Ionosfera e Troposfera | Desvios dos Giroscópios | Tamanho da Pegada | Sincronização |
| Resolução das Ambigüidades | Alinhamento para com o Campo de Gravidade da Terra | Tipo do Terreno (cobertura e inclinação) | Transformações entre os Sensores |
| Interpolação | | Calibração | Transformação dos Sistemas de Coordenadas |

Fonte: Adaptado de BEHAN et al. (2000)

Assim, estudos realizados por KRABIL et al. (1995), LEMMENS (1997) e HUISING & PEREIRA (1998) revelaram que os dados ALS contêm erros e estes são normalmente resultantes dos erros de posicionamento e orientação (GPS/IMU) e/ou da sua integração com o *laserscanner*.

Para BEHAN et al. (2000), alguns destes erros podem ser evitados por meio de uma calibração cuidadosa do sistema (relativamente às distâncias e ângulos de varredura, bem como, à montagem do *laserscanner* em relação à IMU) enquanto outros erros podem ser eliminados ou reduzidos por meio de um planejamento e operação da missão, também cuidadosos. Porém, mesmo com uma calibração e operação cuidadosa do sistema, os dados ALS podem ainda apresentar erros. Uma das maneiras de eliminar estes erros remanescentes é justamente empregar um método que utilize dados redundantes e informações externas combinadas a um modelo matemático de erros que permita a correção de tais dados (BEHAN et al., 2000). Ressalta-se, no entanto, que dados redundantes são obtidos apenas quando há sobreposição das varreduras (várias faixas ou blocos para uma mesma área).

É por esta razão que CROMBAGHS et al. (2000), ao estudar os erros inerentes aos dados ALS, agrupou-os em função da forma pela qual aqueles erros afetavam estes mesmos dados. Assim, para o referido autor, os erros podem ser categorizados em: por ponto, por observação GPS, por faixa ou por bloco. Isto denota a importância que as observações GPS têm sobre os dados ALS, bem como, a importância do ajuste (em faixas ou blocos) quando existe sobreposição destes dados.

Assim como FRASER et al. (1999), CROMBAGHS et al. (2000) e MOSTAFA & HUTTON (2001a) concordam que os dados ALS são dominados pelos erros do GPS, autores como BURMAN (2002) concordam que os erros de orientação da IMU são os que mais contribuem para o estoque de erros daqueles mesmos dados. Apesar das divergências entre estes autores, a maioria dos autores pesquisados, no entanto, é categórica ao afirmar que os três sensores envolvidos contribuem (positiva ou negativamente) para a acurácia dos dados ALS coletados.

MAAS (2003) enfatiza que além das fontes de erro associadas a cada sensor (*laserscanner*, GPS e IMU), a acurácia dos dados ALS é também afetada pelo alinhamento entre eles (antena GPS em relação à IMU, *laserscanner* em relação à IMU e antena GPS em relação ao *laserscanner*). FILIN (2003) vai mais além e afirma que as fontes de erro que afetam os dados ALS são bastante variadas e resultantes não só dos sensores envolvidos, de forma independente, como também da sua integração, que deve levar em consideração o alinhamento e localização do sistema, bem como a sincronização dos respectivos conjuntos de dados individuais. De acordo com este mesmo autor, a geo-localização de um ponto coletado por um sistema ALS, em relação ao sistema de referência local (plataforma), pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + R_{IMU} \cdot \left(\begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix} + R_m \cdot R_s \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} \bar{e}_x \\ \bar{e}_y \\ \bar{e}_z \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Onde:

| | |
|---|--|
| $\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \end{bmatrix}^T$ | Geo-localização do ponto ALS (pegada sobre o terreno) |
| $\begin{bmatrix} X_0 & Y_0 & Z_0 \end{bmatrix}^T$ | Localização do centro de fase da antena GPS em relação ao sistema local da plataforma (vetor) |
| R_{IMU} | Rotação do sistema de referência da IMU em relação ao sistema de referência definido pela vertical local |
| $\begin{bmatrix} \delta_x & \delta_y & \delta_z \end{bmatrix}^T$ | Offset do centro de fase da antena GPS em relação ao centro do <i>laserscanner</i> (vetor) |
| R_m | Tendenciosidades de montagem (modelam o não alinhamento entre o <i>laserscanner</i> e a IMU) |
| R_s | Rotação do <i>laserscanner</i> |
| ρ | Distância medida pelo LRF (vetor) |
| $\begin{bmatrix} \bar{e}_x & \bar{e}_y & \bar{e}_z \end{bmatrix}^T$ | Componentes do erro aleatório (vetor) |

Ainda de acordo com FILIN (2003), levando-se em consideração os efeitos das principais fontes de erro sobre um ponto ALS coletado, sua geo-localização pode ser expressa pela equação a seguir.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta X_0 \\ \delta Y_0 \\ \delta Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \overset{\circ}{X}_0 \\ \delta \overset{\circ}{Y}_0 \\ \delta \overset{\circ}{Z}_0 \end{bmatrix} \cdot t + (\Delta R_{IMU} + \Delta \overset{\circ}{R}_{IMU} t) \cdot R_{IMU} \cdot \begin{bmatrix} \bar{e}_x \\ \bar{e}_y \\ \bar{e}_z \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\cdot \left(\begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix} + R_m \cdot R_{s_{f(\lambda\omega_s)}} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -(\rho + \delta\rho) \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} \bar{e}_x \\ \bar{e}_y \\ \bar{e}_z \end{bmatrix}$$

Onde:

$[\delta X_0 \ \delta Y_0 \ \delta Z_0]^T$ Offset do sistema GPS

$[\delta \overset{\circ}{X}_0 \ \delta \overset{\circ}{Y}_0 \ \delta \overset{\circ}{Z}_0]^T$ Desvio do sistema GPS

ΔR_{IMU} Offset da IMU

$\Delta \overset{\circ}{R}_{IMU}$ Desvio da IMU

$\lambda\omega_s$ Erro do ângulo de varredura (mede a falta de acurácia com que o ângulo de varredura é determinado) (varia linearmente)

$\delta\rho$ Tendenciosidade do alcance (modela o *offset* constante na determinação da distância)

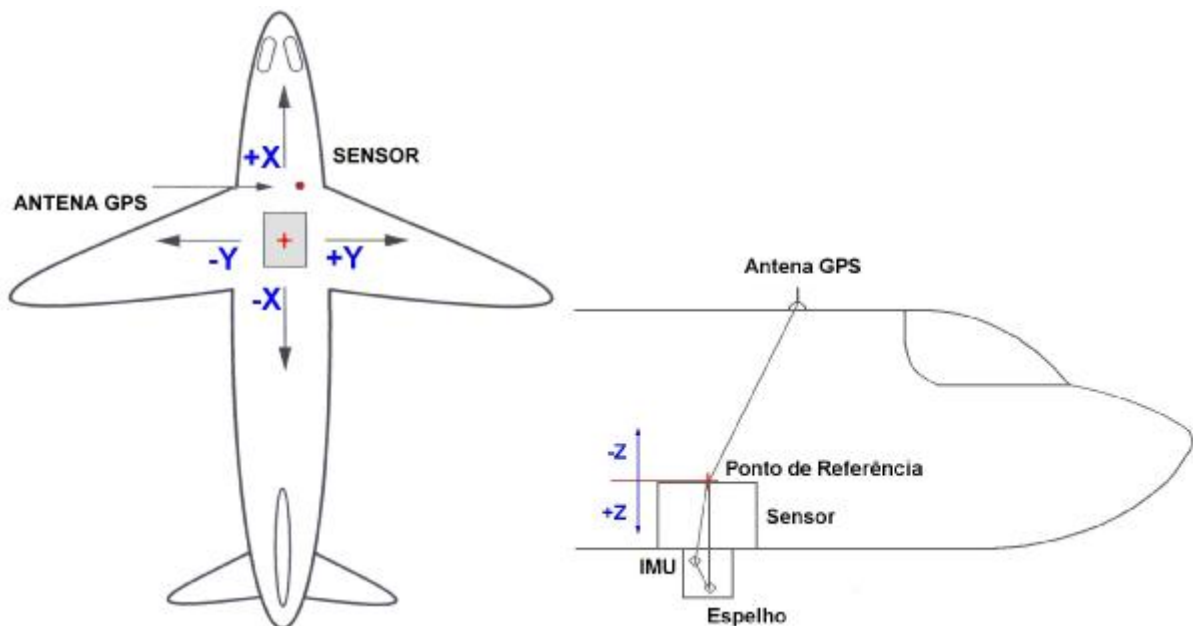
t Tempo

Pela equação acima é possível verificar que as fontes de erro contabilizaram apenas os erros de calibração (LRF, scanner e as tendenciosidades de montagem) e os erros do GPS e da IMU. Outras fontes de erro, como as tendenciosidades na sincronização do tempo para o GPS e para a IMU, foram consideradas de efeito similar ou negligenciável no cômputo do erro total (FILIN, 2003).

KATZENBEISSER (2003), no entanto, afirma que um resultado final preciso requer a combinação das várias medidas individuais (posição, atitude, distância e deflexão do feixe laser) e, conseqüentemente, o conhecimento preciso do tempo (ou

da diferença de tempo) no qual cada medida foi obtida. Para SKALLOUD (1999b), a calibração dos sensores (individualmente) e entre os sensores (integralmente) permite determinar o *offset* constante da sincronização do tempo devido à transmissão dos dados e aos atrasos internos do *hardware*. Pela calibração do sistema como um todo é possível, ainda, determinar os *offsets* e os *desvios* relativos ao sistema de referência local da plataforma. Assim, a figura 4.5 ilustra, para uma determinada plataforma, a origem do sistema de referência local e os *offsets* dos sensores em relação a esta origem.

FIGURA 4.5 - SISTEMA DE REFERÊNCIA LOCAL DA PLATAFORMA



FONTE: Adaptada de OPTECH (2002b)

Pela figura 4.5 é possível verificar que devem ser tomados, em relação à origem do sistema de referência local, os *offsets* da antena GPS, da IMU e do espelho do *laserscanner*. Como mencionado anteriormente neste capítulo, durante a calibração do sistema, alguns dos parâmetros são determinados por métodos tradicionais de levantamento de campo, enquanto outros só são conseguidos por meio de técnicas rigorosas conduzidas em laboratório.

De acordo com ROTTENSTEINER et al. (2002), os dados ALS são também afetados por erros sistemáticos causados por deficiências na calibração do sistema. Erros na determinação dos parâmetros de montagem normalmente permanecem e, segundo os mesmos autores, são da ordem de $0,01^\circ$. Para HUISING & PEREIRA (1998), uma calibração conduzida de forma inapropriada, bem como, o manuseio inapropriado do sistema GPS/IMU (no que diz respeito à sua inicialização), podem ser as causas principais de problemas encontrados posteriormente, quando do processamento dos dados ALS coletados. É por esta razão que MOSTAFA et al. (2001), SKALLOUD (2002) e KOCAMAN (2003) afirmam ser a qualidade da calibração, um fator limitante da performance de todo o sistema.

Outra fonte de erro dos dados brutos ALS que não pode deixar de ser mencionada é a superfície do terreno (relativamente ao relevo e à cobertura). Segundo MAAS (2003), esta influencia a medida das distâncias (ou alcances) e, uma vez que a maioria dos sistemas opera sob ângulos de varredura bastante estreitos, os efeitos sobre as distâncias acabam se propagando principalmente para as altitudes dos pontos coletados. Para HUISING & PEREIRA (1998), enquanto a inclinação do alvo (definida pela declividade do terreno) e a presença de vegetação constituem fontes de erros sistemáticos para os dados brutos ALS, a aspereza do terreno e a reflexibilidade do alvo constituem fontes de erros aleatórios. LEMMENS & FORTUIN (1997), baseados em considerações teóricas, quantificaram os erros provenientes de cada uma destas fontes e chegaram à ordem de valores apresentados no quadro 4.6.

QUADRO 4.6 - FONTES DE ERRO RELATIVAS À SUPERFÍCIE DO TERRENO

| FONTES DE ERRO | SUPERFÍCIE DO TERRENO | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Plana ⁽¹⁾ | Plana ⁽²⁾ | Plana ⁽³⁾ | Acidentada ⁽¹⁾ | Acidentada ⁽²⁾ | Acidentada ⁽³⁾ |
| Ordem dos Erros Sistemáticos | | | | | | |
| Declividade do Terreno | 0 | 0 | 0 | cm | cm | cm |
| Presença de Vegetação ⁽⁴⁾ | 0 | 0 | dm – m | 0 | 0 | dm – m |
| Ordem dos Erros Aleatórios | | | | | | |
| Aspereza ⁽⁵⁾ do Terreno | 0 | cm | cm - dm | 0 | cm | cm – dm |
| Reflexibilidade do Alvo | cm - dm | cm - dm | cm - dm | cm - dm | cm - dm | cm – dm |

FONTE: Adaptado de LEMMENS & FORTUIN (1997)

NOTA: 0 indica que o efeito é negligenciável.

- (1) Relativa às superfícies predominantemente pavimentadas.
- (2) Relativa às superfícies áridas ou estéreis.
- (3) Relativa às superfícies cobertas por grama ou capoeira (arbustos).
- (4) Relativa à vegetação de grande porte, como árvores isoladas, matas e florestas.
- (5) Relativa à rugosidade da superfície.

Assim, no que diz respeito a acurácia absoluta final dos dados ALS, FRASER et al. (1999) afirmam que esta depende de fatores que em muito ultrapassam a resolução e a acurácia das unidades de medida envolvidas. Tais fatores incluem, por exemplo, incertezas relacionadas ao fato de que o ponto coletado por um sistema ALS pode não corresponder, exatamente, à superfície de interesse, ou seja, à superfície do terreno. É por esta razão que TURTON & JONAS (1999) afirmam que a acurácia absoluta final dos dados ALS depende mais do tipo de terreno e da sua cobertura do que da mecânica do sistema.

4.3 ERROS INERENTES AO PROCESSAMENTO DOS DADOS ALS

Após a coleta dos dados brutos ALS (que compreende as medidas GPS/IMU e *laserscanner*, além das observações GPS realizadas nas estações base terrestres), executa-se a etapa seguinte ao levantamento e que consiste no processamento destes mesmos dados. Tal processamento é executado de forma a solucionar a trajetória seguida pela plataforma (dados DGPS/IMU) e, conseqüentemente, de forma a determinar o geo-referenciamento 3D dos pontos coletados sobre o terreno (dados *laserscanner*, parâmetros de calibração e parâmetros geodésicos e cartográficos: elipsóide, datum e projeção). Assim, é durante a etapa de processamento dos dados brutos ALS que os erros sistemáticos são eliminados e que os pontos definidores da superfície do terreno (DSM, DEM ou DTM) são determinados. Tal procedimento, no entanto, não constitui tarefa fácil, estando a acurácia dos resultados obtidos, diretamente relacionada às estratégias adotadas para a classificação, filtragem e modelagem dos pontos processados (PEREIRA & WICHERSON, 1999).

Primeiramente, no que diz respeito à solução da trajetória da plataforma, sabe-se que os dados IMU e DGPS são processados separadamente e que sua integração se dá por meio da utilização de um filtro Kalman descentralizado (CRAMER, 1997; COLOMINA et al., 2002). De acordo com LITHOPOULOS (1999), este filtro deve ser capaz de estimar os erros de posição, velocidade e atitude da solução inercial, as tendenciosidades residuais da IMU e erros associados ao fator de escala e à falta de alinhamento do referido sensor. Os resultados do processamento DGPS constituem, portanto, informações de entrada para o filtro Kalman, que deve desempenhar uma integração ótima destes com os dados brutos inerciais (CRAMER et al., 2000). Para GREJNER-BRZEZINSKA (2001), a filtragem

Kalman é sem dúvida a técnica mais apropriada para combinar as medidas inerciais e os resultados DGPS, porém, esta requer a utilização de modelos de medida da covariância adequados para ambos os sensores. A covariância, neste caso, exprime a correlação, ou seja, o grau de dependência (GEMAEL, 1994) entre os dados obtidos pelos referidos sensores e, para sistemas de alta qualidade, tais modelos devem poder configurar um mínimo de 15 variáveis de estado (relativamente aos desvios, erros e tendenciosidades da integração GPS/IMU) (CRAMER & HAALA, 1999; LITHOPOULOS, 1999; BURMAN, 2000; KOCAMAN, 2003; WANG et al., 2003). Assim, a análise do desempenho de um sistema de posicionamento e orientação constitui um processo complexo que depende não só da qualidade e tipo do sensor inercial e receptor GPS utilizados, e de aspectos operacionais, como também da eficácia dos modelos de erro e dos algoritmos de estimação empregados no processamento das medidas por ele coletadas (SKALLOUD, 1999a).

Uma vez computada a melhor estimativa suavizada para a trajetória (SBET) da plataforma, tal estimativa (posição e orientação) é interpolada para as medidas *laserscanner*, ou seja, para o intervalo de tempo de cada ponto coletado sobre o terreno. Estes resultados, combinados às medidas de distância e aos ângulos de varredura instantâneos, fornecem as coordenadas terrestres 3D para cada pegada do *laserscanner*. De acordo com MOSTAFA et al. (2001), as coordenadas tipicamente computadas são as relativas ao sistema de referência cartesiano do GPS (*Earth-Centered, Earth-Fixed* - ECEF) que, posteriormente, são convertidas para o sistema de projeção desejado. Para GREJNER-BRZEZINSKA (2001) e MAAS (2003), as transformações entre os diferentes sistemas de coordenadas (ECEF, para geográficas, para planas) podem constituir uma fonte importante de erros, principalmente, se houverem erros nos pontos terrestres utilizados como

referência, ou, se os dados forem manuseados de forma inadequada (erros humanos). AXELSSON & WILLÉN (1997) consideram as transformações entre *datums* um assunto delicado, justamente porque envolve diferentes elipsóides de referência e diferentes modelos geoidais. Os modelos geoidais, por sua vez, constituem uma preocupação constante para FRASER & JONAS (1999) e FLOOD & SATALICH (2001), pois, incertezas relacionadas à separação geóide/elipsóide afetam a acurácia absoluta final dos resultados obtidos com qualquer sistema ALS.

Realizadas as transformações, obtém-se como resultado final do processamento uma nuvem de pontos 3D geo-referenciados que corresponde a todos os pontos coletados pelo sistema, independentemente de sua correspondência (ou não) com a superfície do terreno propriamente dita. Como o objetivo da varredura é obter um modelo da superfície varrida, seja este representativo da superfície nua do terreno ou da superfície definida pelos elementos (ou feições) naturais e artificiais nele contidos, existe a necessidade de definir, a partir dos pontos processados, o tipo de modelo requerido (DSM, DEM, DTM ou outro). Para tanto, estratégias de classificação, filtragem e modelagem devem ser empregadas.

Para PFEIFER et al. (1999), existem duas formas de avaliar os pontos ALS processados. A primeira é por meio de algoritmos que desempenham somente a classificação dos dados, baseando a derivação do modelo de superfície nesta classificação; e, num processo inverso, por meio de algoritmos que derivam diretamente o modelo de superfície, baseando a classificação dos pontos nesta superfície. De acordo com os mesmos autores, alguns métodos possuem uma abordagem hierárquica para a interpolação da superfície ou classificação dos pontos, sendo que, a maioria das abordagens opera iterativamente, tanto para a

interpolação como para a classificação. Todos os métodos, no entanto, consideram os pontos de menor altitude (mais baixos) como sendo os pontos relativos à superfície nua do terreno (correspondentes ao último retorno de cada pulso) e os pontos de maior altitude (mais altos) como sendo os pontos que se encontram acima daquela mesma superfície (correspondentes ao primeiro retorno de cada pulso). Estes mesmos autores ressaltam ainda que tais métodos nem sempre realizam a filtragem dos erros de medida e que, freqüentemente, as medidas são reduzidas e apresentadas sob a forma de uma grade regular gerada somente sobre a área de interesse e tendo a altitude de seus pontos interpolada com base em um determinado método.

De acordo com HYYPPÄ et al. (2000), são muitos os algoritmos para a geração de modelos de superfície, embora, para MAUNE et al. (2001), nenhum deles atenda ou possa ser aplicado a todas as situações. Assim, de maneira geral, a geração de um modelo de superfície inclui as seguintes etapas (HYYPPÄ et al., 2000): o cálculo de uma superfície de referência original (geralmente pelo método da altitude mínima); a classificação dos elementos remanescentes (tipicamente vegetação e edificações) e sua remoção da superfície de referência (por meio de filtros); a classificação da nuvem original de pontos (utilizada para verificação, em relação à superfície de referência calculada, dos pontos classificados como terreno e/ou não-terreno); o cálculo do modelo de superfície final (baseado nos pontos classificados como terreno); e, finalmente, a interpolação dos pontos removidos.

Para VOSSELMAN (2000), um dos maiores problemas verificados, relativamente aos modelos de superfície gerados, deve-se à classificação dos pontos que definem (ou não) a superfície nua do terreno. De acordo com este autor, a interpolação dos pontos coletados em uma grade regular causa uma perda

significativa de informação se realizada antes da classificação, pois, quando altitudes são interpoladas, diminuem-se as diferenças entre os pontos (devido à sua homogeneização) e, conseqüentemente, torna-se mais difícil realizar uma classificação correta destes pontos. BEHAN (2000), no entanto, afirma que os efeitos da interpolação podem ser minimizados, se o tamanho escolhido para a grade for equivalente à densidade de pontos amostrados.

Relativamente à densidade de pontos amostrados, enquanto alguns autores (HUISING & PEREIRA, 1998; VOSSSELMAN, 2000; MAUNE et al., 2001) consideram a baixa densidade um problema a mais para a classificação e filtragem dos pontos processados, outros autores (VEGT & HOFFMANN, 2001) questionam as altas densidades (por exemplo, ao nível de 100 kHz) justamente porque o conjunto de pontos amostrados costuma ser drasticamente reduzido antes de ser utilizado. Ainda em relação a esta questão, MOLANDER (2001) alerta para o fato de que altas densidades acabam excedendo, muitas vezes, a capacidade de processamento de alguns *softwares* comerciais e, por esta razão, esforços têm sido concentrados no desenvolvimento de novos programas capazes de recuperar, processar e armazenar grandes volumes de dados, em períodos de tempo mais curtos.

Divergências existem, portanto, não só em relação às melhores estratégias a serem adotadas para o processamento dos pontos ALS amostrados, como também, em relação aos melhores métodos de classificação, filtragem e modelagem dos pontos ALS processados. Constata-se, no entanto, que as estratégias de processamento e os métodos de classificação, filtragem e modelagem atualmente empregados estão ainda muito longe de alcançar um desenvolvimento pleno e maduro e, até o presente momento, apenas pacotes de programas fornecidos com os sistemas ALS ou mesmo *softwares* experimentais, encontram-se disponíveis.

Empresas tradicionais de desenvolvimento de *software* para as áreas de fotogrametria e sensoriamento remoto têm tentado adaptar seus pacotes de programas para o tratamento dos conjuntos de pontos ALS processados, porém, não se tem notícia de um estudo sobre a eficácia destas adaptações.

5 DESCRIÇÃO DOS DADOS ALS E NÃO-ALS UTILIZADOS NA PESQUISA

Como explicitado no primeiro capítulo deste trabalho de pesquisa, a avaliação da qualidade cartográfica dos resultados do *laserscanner* aerotransportado foi realizada tendo como base dados ALS obtidos pelo sistema ALTM 2025, de propriedade de uma das empresas de aerolevantamentos e cartografia do Brasil e pioneira no emprego da técnica ALS em território nacional.

O segundo capítulo do presente trabalho, por sua vez, descreve a maioria dos parâmetros envolvidos na obtenção de dados ALS, permitindo uma noção geral e ampla do emprego da técnica ALS, porém, sem levar em consideração as especificidades de cada sistema. Por esta razão e a fim de melhor caracterizar os dados ALS testados, apresenta-se a seguir a descrição das principais características do sistema ALS utilizado na obtenção destes mesmos dados.

5.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ALS EMPREGADO

O sistema ALTM (*Airborne Laser Terrain Mapper*) modelo 2025 foi lançado no mercado mundial pela Optech Inc. no final do ano 2000, sucedendo o modelo 1225 lançado no ano anterior. A diferença básica entre estes modelos está na altura de vôo máxima (distância vertical entre o avião e a superfície média do terreno). Enquanto o modelo 1225 pode ser utilizado em varreduras com altura de vôo de até 1.200 m, o modelo 2025 pode ser utilizado em varreduras com altura de vôo de até 2.000 m. Ambos, no entanto, trabalham com uma taxa de repetição do pulso laser de 25 kHz, ou seja, os dois sistemas são capazes de amostrar, sobre o terreno, 25.000 pontos por segundo.

O quadro 5.1 apresenta a evolução do sistema ALTM, relativamente à altura de vôo operacional e à taxa de repetição do laser, desde o lançamento do seu protótipo, em 1993.

QUADRO 5.1 - EVOLUÇÃO DO SISTEMA ALTM

| Modelo | Medidas por Segundo | Altura Máxima (m) | Ano de Lançamento | Sistemas Fabricados |
|------------------|---------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| ALSS | 2.000 | 1.000 | 1993 | Protótipo |
| ALTM 1020 | 5.000 | 1.000 | 1995 | 9 |
| ALTM 1025 | 25.000 | 700 | 1999 | 2 |
| ALTM 1210 | 10.000 | 1.200 | 1998 | 8 |
| ALTM 1225 | 25.000 | 1.200 | 1999 | 6 |
| ALTM 2025 | 25.000 | 2.000 | 2000 | 1 |
| ALTM 2033 | 33.000 | 2.000 | 2000 | 3 |
| ALTM 3025 | 25.000 | 3.000 | 2001 | 2 |
| ALTM 3033 | 33.000 | 3.000 | 2001 | 4 |
| ALTM 2050 | 50.000 | 2.000 | 2002 | 7 |
| ALTM 3070 | 70.000 | 3.000 | 2003 | - |
| ALTM 3100 | 100.000 | 3.500 | 2004 | - |

FONTE: OPTECH (2004)

É possível verificar, pelo quadro acima, que os sistemas ALTM com taxa de repetição de 25 kHz representam cerca de 26% dos sistemas comercializados pela Optech Inc. (informações obtidas em junho/04). Os demais modelos apresentados (5, 10, 33 e 50 kHz) correspondem, respectivamente, a 21, 19, 17 e 17% dos sistemas comercializados pelo referido fabricante (até aquela mesma data). Dos modelos mais recentes (70 e 100 kHz) não foram disponibilizadas informações acerca da quantidade comercializada.

Conforme descrito anteriormente, o ALTM 2025 é um sistema de varredura laser aerotransportado com taxa de repetição do pulso laser de 25 kHz e altura de vôo operacional variando entre 150 m (mínima) e 2.000 m (máxima). Estas, no entanto, não são as únicas especificações que devem ser levadas em consideração quando se pretende avaliar os dados coletados por um determinado sistema, os resultados obtidos do processamento destes dados e, suas possíveis aplicações.

Assim, o quadro 5.2, criado com base em informações fornecidas pelo próprio fabricante do sistema ALTM 2025, apresenta as especificações consideradas relevantes para o presente trabalho de pesquisa.

QUADRO 5.2 - ESPECIFICAÇÕES DO SISTEMA ALTM 2025

| | PARÂMETRO | VALOR |
|----------|--|---|
| SCANNER | Ângulo de Varredura (FOV) | Variável: de 0° (perfilamento) a ± 20° (máximo) |
| | Resolução do Ângulo de Varredura | 0,01° |
| | Acurácia do Ângulo de Varredura | 0,01° |
| | Frequência de Varredura | Variável: depende do FOV (máxima 99 Hz) |
| | Padrão de Varredura | Dente de Serra |
| LASER | Tipo | Q-Switched, Diode-Pumped, Vanadate Laser com $\lambda = 1064$ nm |
| | Classificação | Classe IV (conforme padrão FDA CDRH 21 CFR - EUA) |
| | Divergência do Feixe | Dual: 0,2 mrad ou 1,0 mrad |
| | Distância Segura para os Olhos | 160 m @ 1,0 mrad e 550 m @ 0,3 mrad (para FOV máximo) |
| | Alcance Máximo | 2.000 m (nominal) |
| | Resolução do Alcance | 1 cm |
| | Acurácia do Alcance | 2 a 3 cm (para um único pulso) |
| POS | Receptor GPS | Novatel Millennium DL (antena montada separada) |
| | Frequência do Receptor GPS | 1 Hz |
| | IMU | Applanix Customizada: POS/AV 410 |
| | Frequência da IMU | Variável: de 10 a 100 Hz |
| CONTROLE | Receptor GPS da Aeronave | Navtrack (utilizado somente para navegação) |
| | Armazenamento dos Dados | Fita Digital 8mm (dados <i>laserscanner</i> e IMU) Cartão PCMCIA (dados GPS) Fita VHS Compact (dados de imagem) |
| | Requisitos de Potência | 28VDC, 24 A (média), 35 A (pico) |
| | Temperatura Operacional | 10 a 35 °C |
| | Umidade | 0 a 95% (não condensada) |
| OUTROS | Largura da Faixa Varrida | Variável: de 0 (perfilamento) a (0,68 x altura) |
| | Acurácia de <i>Roll</i> e <i>Pitch</i> | 0,008° Pós-processado |
| | Acurácia de <i>Heading</i> | 0,015° Pós-processado |
| | Acurácia Vertical (Elevação) | 15 cm a 1.200 m, 25 cm a 2.000 m (1 σ) (em condições ideais) |
| | Acurácia Horizontal (Posição 2D) | Melhor que 1/2.000 x altura (1 σ) (em condições ideais) |

FONTE: OPTECH (2000b)

Além das especificações contidas no quadro 5.2, o sistema ALTM 2025 é capaz de registrar o primeiro e o último retorno de cada pulso laser emitido, além de medir e registrar suas respectivas intensidades (força do sinal), características raramente presentes nos modelos anteriores.

Quanto à plataforma empregada nas varreduras, atualmente, o sistema ALTM 2025 pode ser assentado à estrutura de uma aeronave modelo Seneca III, ou, à estrutura de uma aeronave modelo Navajo (ambas de propriedade da empresa que opera o sistema). Estas aeronaves voam a uma velocidade média de cruzeiro de 145 e 165 nós (268,5 e 305,6 km/h), respectivamente. Ambas operam em altitudes de vôo de até 21.000 pés (6.400 m). Tanto o Seneca III como o Navajo tiveram suas estruturas modificadas para poder assentar, além do sistema de varredura, as câmaras fotogramétricas operadas pela empresa em serviços de aerofotogrametria.

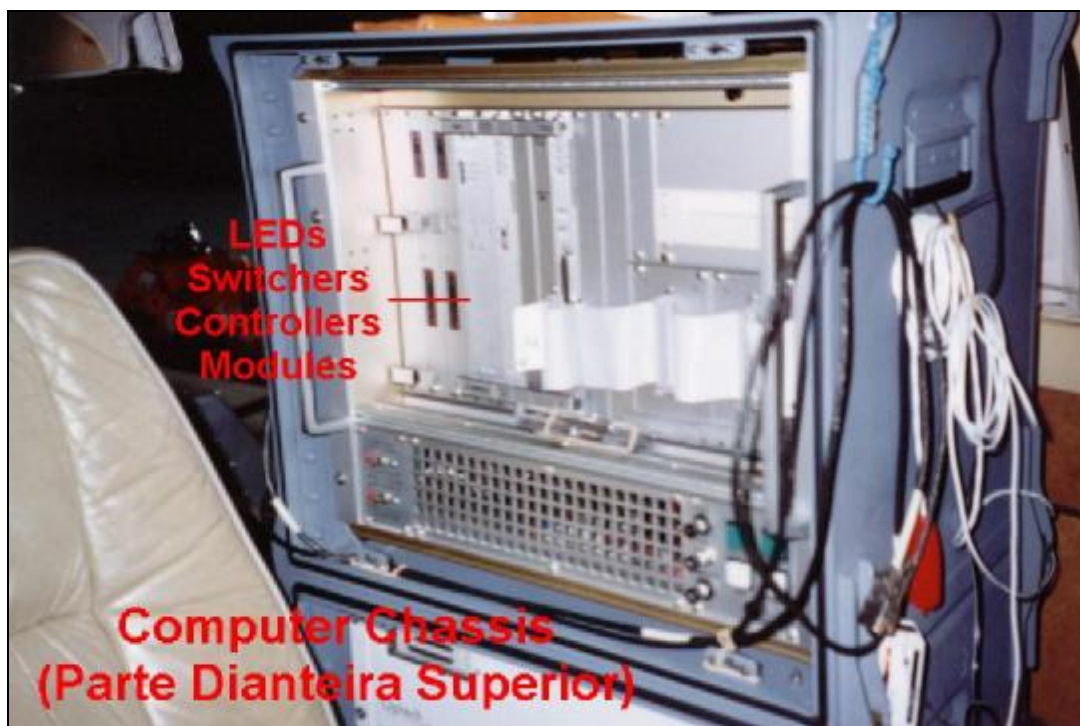
Assim, as figuras 5.1 e 5.2 apresentam o controle principal (*Main Control Rack* ou *Computer Chassis*) do sistema ALTM 2025, instalado na aeronave modelo Seneca III. A figura 5.1 permite visualizar a parte dianteira inferior do referido controle, que compreende o módulo do diodo laser e a unidade de fita, enquanto a figura 5.2 permite visualizar a sua parte dianteira superior, que compreende alguns LEDs, chaveamentos, micro-controles (*scanner*), módulos (intensidade) e conexões.

FIGURA 5.1 - ALTM 2025 - PARTE DIANTEIRA INFERIOR DO CONTROLE PRINCIPAL



FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2001)

FIGURA 5.2 - ALTM 2025 - PARTE DIANTEIRA SUPERIOR DO CONTROLE PRINCIPAL



FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2001)

Ainda em relação às especificidades do sistema ALTM 2025, o mesmo integra uma câmara de vídeo que tem por finalidade registrar a superfície do terreno varrida pelo laser, auxiliando na detecção de falhas no voo e na avaliação de possíveis erros de processamento dos dados coletados. A figura 5.3 exibe, portanto, o receptor GPS e a câmara de vídeo (somente o gravador, pois a lente está localizada na cabeça do sensor), ambos conectados ao controle principal do sistema. Nesta mesma figura é possível visualizar, ainda, o telescópio de navegação.

FIGURA 5.3 - ALTM 2025 - RECEPTOR GPS E CÂMARA DE VÍDEO



FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2001)

Por fim, a figura 5.4 apresenta como se encontram dispostos o controle principal (*Main Control Rack*) e a cabeça do sensor (*Sensor Head*), no interior da referida aeronave (Senneca III).

FIGURA 5.4 - ALTM 2025 - DISPOSIÇÃO NO INTERIOR DA AERONAVE



FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2001)

O GPS utilizado em terra para suporte à solução da posição do sistema pelo método cinemático diferencial é um Leica SR530 de dupla frequência, 24 canais (12 por portadora) e período de 1 s. Este dispositivo também utiliza um cartão PCMCIA para o armazenamento dos dados coletados.

5.2 CARACTERÍSTICAS DOS DADOS UTILIZADOS NA PESQUISA

No primeiro capítulo deste trabalho de pesquisa foram enumeradas as características da superfície do terreno (relativamente às limitações impostas à pesquisa) que deveriam ser levadas em consideração quando da análise dos dados ALS obtidos pelo sistema ALTM 2025.

Em decorrência disso, realizou-se, junto à empresa que opera o referido sistema, um levantamento de todos os projetos (ou serviços de mapeamento), por ela executados, que envolveram a obtenção de dados ALS.

Realizado o levantamento, solicitou-se, a cada um dos responsáveis pela contratação de tais serviços de mapeamento, autorização para o uso, na presente pesquisa, dos dados ALS até então coletados e processados.

Desta forma, as áreas varridas pelo sistema ALTM 2025, cujos dados foram autorizados para uso por seus contratantes, passaram a ser a base para um outro levantamento realizado, junto àquela mesma empresa, relativamente aos dados existentes e obtidos por outras técnicas (topográfica, geodésica, aerofotogramétrica).

Na seqüência, portanto, encontram-se descritos os dados ALS e não-ALS levantados e considerados pertinentes à pesquisa que aqui se apresenta.

5.2.1. Dados Obtidos com o ALTM 2025

Do primeiro levantamento realizado junto à Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A., empresa que opera o sistema ALTM 2025, foram obtidas as seguintes informações concernentes aos projetos de mapeamento que empregaram (parcial ou totalmente) a técnica ALS na geração dos respectivos produtos contratados.

- 1) Entre janeiro e dezembro de 2002, encontravam-se em execução, na referida empresa, os projetos descritos no quadro 5.3, a seguir. Este foi, inicialmente, o período de coleta de dados ALS proposto para análise por esta pesquisa (Capítulo 1). O referido quadro apresenta o título ou nome de cada projeto, sua localização geográfica, seu contratante, sua extensão (comprimento, área e/ou perímetro) e produtos cartográficos gerados.

QUADRO 5.3 - PROJETOS DE MAPEAMENTO EXECUTADOS EM 2002 E QUE EMPREGARAM A TÉCNICA ALS

continua

| PROJETO | LOCALIZAÇÃO | CONTRATANTE | EXTENSÃO | PRODUTOS (1) |
|---|--|---------------|---|---|
| Área de Calibração | Curitiba - Bairro Parolin/Prado Velho Supermercado Carrefour | ESTEIO S.A. | 0,6 km (Perímetro) 0,02 km ² (Área) | Levantamento GPS Levantamento Topográfico |
| Área Teste | Curitiba Bairro Água Verde Trecho: Av. República Argentina | ESTEIO S.A. | 4,1 km (Perímetro) 1,05 km ² (Área) | Imagens de Intensidade Modelos Digitais de Elevação e de Terreno e Curvas de Nível |
| Implantação e Pavimentação de Rodovia (Anteprojeto) | Rodovia SC-414 Trecho: Luís Alves - Belchior | DEINFRA/SC | 21,8 km | Vão Fotogramétrico 1:25.000 Restituição Estereofotogramétrica P 1:5.000 Levantamento Topográfico PA Levantamento Cadastral |
| Implantação e Pavimentação de Rodovia (Anteprojeto) | Rodovia SC-471 Trecho: Romelândia - Anchieta | DEINFRA/SC | 20,4 km | Vão Fotogramétrico 1:25.000 Restituição Estereofotogramétrica P 1:5.000 Levantamento Topográfico PA Levantamento Cadastral |
| Padronização e Gerenciamento da Malha de Dutos | Trecho: Vários | PETROBRAS | 2.404,0 km | Vão Fotogramétrico 1:30.000 e 1:8.000 Mosaico Digital 1:30.000 e 1:8.000 Ortofotocarta 1:2.000 Levantamento Cadastral Levantamento PCM ou GPR |
| Programa de Transporte Urbano de Curitiba Eixo Metropolitano de Transporte | BR-116 - Setor Norte Trecho: Salgado Filho - Trevo do Atuba | URBS/IPPUC/PM | 10,0 km | Ortofotocarta 1:2.000 Levantamento Topográfico PA Levantamento Cadastral |

QUADRO 5.3 - PROJETOS DE MAPEAMENTO EXECUTADOS EM 2002 E QUE EMPREGARAM A TÉCNICA ALS

| PROJETO | LOCALIZAÇÃO | CONTRATANTE | EXTENSÃO | PRODUTOS (1) |
|-------------------------------------|--|-------------|----------|--|
| Restauração e Duplicação de Rodovia | Rodovia SP-270 - Raposo Tavares Trecho: Assis - Presidente Prudente | DER/SP | 20,0 km | Ortofotocarta 1:5.000 (2) Restituição Estereofotogramétrica A 1:1.000 Levantamento Topográfico PA |

Conclusão

FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2003)

NOTA: PA - Plano-Altimétrico.

(1) Foram considerados apenas os produtos cartográficos.

(2) Geradas apenas para controle interno.

2) Relativamente às varreduras executadas, para cada um dos projetos citados (no quadro 5.3) foi realizado um "Planejamento de Vôo Laser" cujos principais parâmetros apresenta-se no quadro 5.4.

QUADRO 5.4 - PARÂMETROS DO PLANEJAMENTO DE VÔO LASER

| PROJETO | PLATAFORMA | v (nós) | H' (m) | γ (mrad) | θ | f _{sc} (Hz) | LF (m) | D _{LONG} (m) | D _{TRANS} (m) | D (p/m ²) | D _P (m) |
|--------------------------------|------------|------------|-----------|--------------------|----------|-------------------------|-----------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Água Verde | Sêneca III | 145 | 1.000 | 1,0 | ±9° | 38 | 317 | 0,975 | 0,963 | 1,064 | 1,000 |
| BR-116 | Sêneca III | 155 | 1.100 | 0,2 | ±9° | 38 | 348 | 1,042 | 1,058 | 0,907 | 0,220 |
| Carrefour⁽¹⁾ | Sêneca III | 145 | 1.200 | 0,2 | variável | variável | variável | variável | variável | variável | variável |
| PETROBRAS⁽²⁾ | Sêneca III | 155 | 1.100 | 0,2 | ±20° | 28 | 801 | 1,414 | 1,794 | 0,394 | 0,220 |
| SC-414 | Sêneca III | 145 | 1.000 | 0,2 | ±9° | 38 | 317 | 0,975 | 0,963 | 1,064 | 0,200 |
| SC-471 | Sêneca III | 145 | 1.000 | 0,2 | ±9° | 38 | 317 | 0,975 | 0,963 | 1,064 | 0,200 |
| SP-270 | Sêneca III | 145 | 1.200 | 0,2 | ±12° | 30 | 510 | 1,235 | 1,224 | 0,661 | 0,240 |

FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2003)

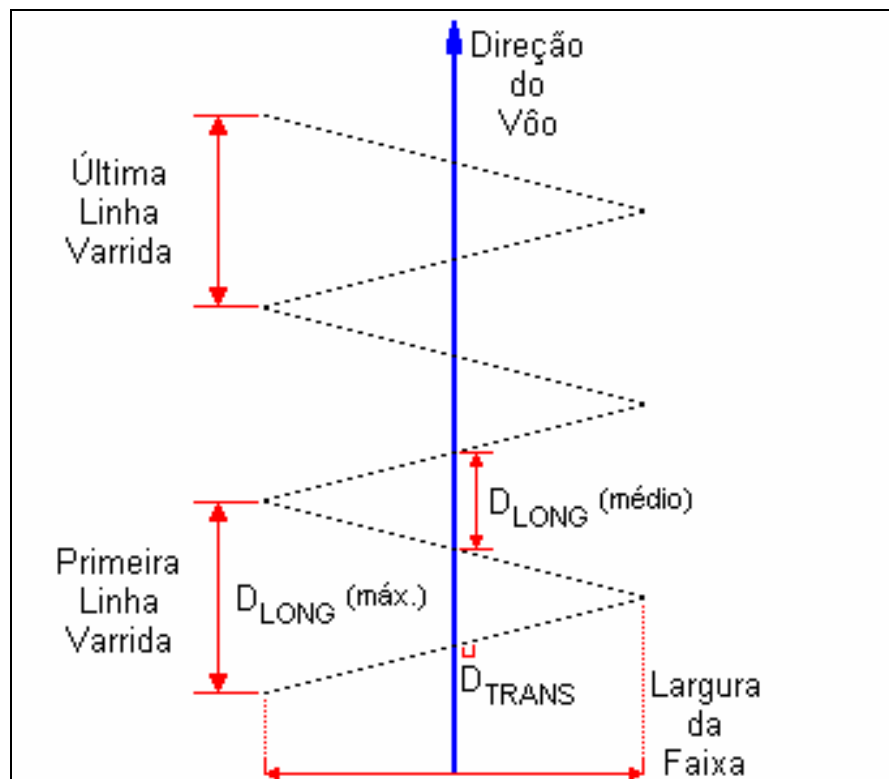
NOTA: Todos os parâmetros apresentados foram definidos no Capítulo 2.

(1) Parâmetros variáveis em função das exigências do método de calibração utilizado.

(2) Parâmetros relativos somente ao trecho Replan-Brasília (Folhas 19 e 20/OSBRA) tomado para este estudo.

É importante ressaltar que no Capítulo 2 do presente trabalho de pesquisa foram definidas as fórmulas normalmente utilizadas no cálculo de parâmetros como os apresentados no quadro 5.4. Tais fórmulas, no entanto, foram estabelecidas de forma genérica e, por isso, requerem um certo cuidado quando aplicadas a determinados sistemas ALS. No caso do ALTM (todos os modelos), cujo padrão de varredura é o "dente de serra", aplicam-se as condições apresentadas na figura 5.5.

FIGURA 5.5 - ALTM 2025 - CONDIÇÕES DE VARREDURA



FONTES: Criada com base em BALTSAVIAS (1999b) e OPTTECH (2000a)

A figura 5.5 evidencia, portanto, que para cada linha varrida pelo *scanner*, o espaçamento longitudinal dos pontos laser coletados é tomado sobre a linha central da faixa de voo, o que corresponde ao afastamento médio entre estes pontos (e não ao máximo, como definido pela relação 2.6, pg. 36). Por sua vez, o espaçamento transversal dos pontos laser coletados é tomado levando-se em consideração a distribuição destes pontos sobre os

dois segmentos (ida e volta) que compõem a linha varrida (e não sobre apenas um deles, como definido pela relação 2.3, pg. 35). Desta forma, para os sistemas ALTM em geral, definem-se os espaçamentos longitudinal e transversal como:

$$D_{\text{LONG}} = \frac{v}{f_{\text{SC}}} \cdot \frac{1}{2} \quad (5.1)$$

e

$$D_{\text{TRANS}} = \frac{L}{N_p} \cdot 2 \quad (5.2)$$

Ressalta-se ainda que os parâmetros determinados durante o planejamento de um vôo laser (utilizando *laserscanner*), diferem, em muitos aspectos, daqueles determinados durante o planejamento de um vôo fotogramétrico (utilizando câmara). No Anexo A encontra-se, portanto, um quadro que apresenta e compara os parâmetros correspondentes a cada um dos vôos mencionados (*Laserscanner* x Câmara).

- 3) No que diz respeito à calibração do sistema ALS utilizado, esta foi realizada, pela primeira vez, logo após a chegada e a instalação do sistema na plataforma a ele destinada (dezembro/2001). Durante a execução dos referidos projetos, sempre que o equipamento foi removido da plataforma, seja para instalação de câmara fotogramétrica ou para transferência do referido sistema para outra aeronave (Senneca III para Navajo e vice-versa), novas calibrações foram realizadas. Em 2002 (período de janeiro a dezembro), a empresa efetuou cinco vôos de calibração.
- 4) Relativamente às limitações impostas à análise dos dados ALS coletados

(Capítulo 1), as áreas varridas pelo sistema ALTM 2025, em cada projeto, apresentaram as características indicadas no quadro 5.5.

QUADRO 5.5 - CARACTERÍSTICAS DAS ÁREAS VARRIDAS

| PROJETO | ÁREA ⁽¹⁾ | | RELEVO ⁽²⁾ | | | | | | DENSIDADE DA COBERTURA VEGETAL ⁽³⁾ | | | | TIPO DE COBERTURA VEGETAL ⁽⁴⁾ | | | | | | DENSIDADE DAS EDIFICAÇÕES ⁽⁵⁾ | | |
|------------|---------------------|---|-----------------------|----|----|----|----|---|---|---|----|----|--|----|----|----|----|---|--|---|---|
| | R | U | PL | OS | ON | OF | MN | B | M | A | AI | BO | CL | CM | MA | MR | RF | B | M | A | |
| Água Verde | - | X | X | X | X | - | - | X | - | - | X | X | - | - | - | - | - | - | - | - | X |
| BR-116 | - | X | X | X | X | X | - | X | - | - | X | X | - | - | - | - | - | X | - | - | - |
| Carrefour | - | X | X | X | X | - | - | X | - | - | X | X | - | - | - | - | - | X | - | - | - |
| PETROBRAS | X | - | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | - | X | - | - | - |
| SC-414 | X | - | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | - | - | - |
| SC-471 | X | - | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | - | - | - |
| SP-270 | X | - | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | - | - | - |

FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2003)

NOTAS: Sinais convencionais utilizados: X Sim; - Não.

(1) Área predominantemente rural (R) ou urbana (U).

(2) Relevo plano (PL), suave ondulado (OS), ondulado (ON), forte ondulado (OF) ou montanhoso (MN).

(3) Densidade da cobertura vegetal baixa (B), média (M) ou alta (A).

(4) Cobertura vegetal: árvore isolada (AI), bosque plantado (BO), cultura (CL), campo (CM), mata (MA), mata regenerada (MR) e reflorestamento (RF).

(5) Densidade das edificações baixa (B), média (M) ou alta (A).

Para o quadro 5.5, ressalta-se que:

- As classes de relevo utilizadas são as recomendadas pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS) e pelo Centro Nacional de Pesquisa de Solos (CNPq) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Tais classes encontram-se especificadas na tabela 5.1.

TABELA 5.1 - CLASSES DE RELEVO

| RELEVO | DECLIVIDADE % |
|----------------|--------------------------|
| Plano | < 3 |
| Suave Ondulado | 3 a 8 |
| Ondulado | 8 a 20 |
| Forte Ondulado | 20 a 45 |
| Montanhoso | 45 a 75 |
| Escarpado | > 75 |

FONTE: LEMOS & SANTOS (1996)

- Para a caracterização da densidade da cobertura vegetal optou-se pela classificação proposta por SHRESTHA & ZINCH (2001), que define cada classe em função da porcentagem de área (do terreno) coberta por árvores, de acordo com a tabela 5.2.

TABELA 5.2 - CLASSES DE DENSIDADE DA COBERTURA VEGETAL

| DENSIDADE | ÁREA COBERTA POR ÁRVORES % |
|------------------|---|
| Baixa | < 40 |
| Média | 40 a 70 |
| Alta | > 70 |

FONTE: SHRESTHA & ZINCH (2001)

É importante observar que outros autores, como LEMESHEWSKY (2000) e CARNEIRO & VALERIANO (2003), utilizam as classes apresentadas acima para caracterizar a densidade da vegetação sem,

no entanto, definir ou especificar quantidades para as mesmas, tornando o processo de classificação mais subjetivo.

Observa-se ainda que a referida classificação foi utilizada para caracterizar tanto as áreas selecionadas rurais como urbanas. Sabe-se, no entanto, que autores como ESPÍRITO SANTO & AUGUSTO (2001) propõem classificações diferenciadas para a densidade da vegetação em áreas urbanas (por exemplo, em função do número de árvores por hectare).

A figura 5.6 exemplifica, para a área selecionada da SP-270, as classes de vegetação definidas acima.

FIGURA 5.6 - SP-270: CLASSES DE DENSIDADE DA COBERTURA VEGETAL



FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2001)

- A densidade urbana é uma relação que indica a intensidade do uso e ocupação do solo urbano, sendo normalmente medida em função do número de habitantes fixos por hectare (densidade habitacional), ou, em função do número total de habitantes (residentes ou não) por hectare (densidade populacional).

Para VARGAS (2003), no entanto, mais preciso que trabalhar com densidades baseadas em habitantes por hectare é trabalhar com economias por hectare, pressupondo que a cada economia corresponde um determinado número de pessoas (residentes, trabalhadores e

usuários) que consomem, de forma eqüitativa, a infra-estrutura urbana e os serviços públicos disponíveis.

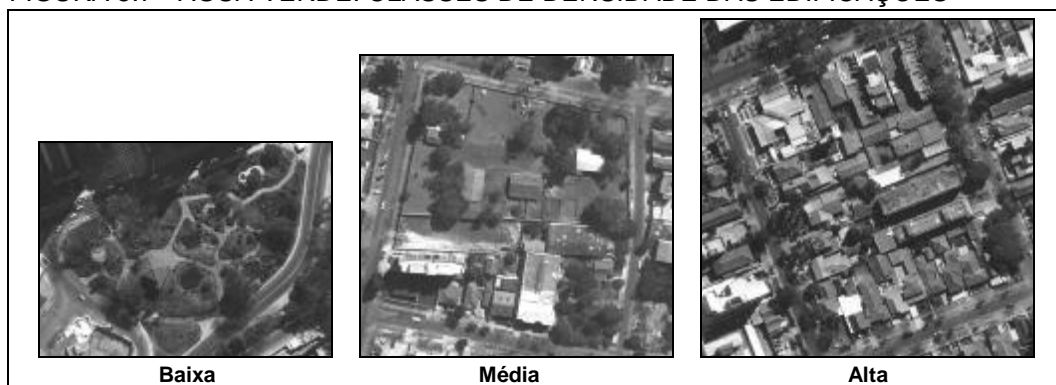
Por outro lado, como o objetivo desta pesquisa não é planejar nem monitorar a densidade das áreas urbanas selecionadas, mas, simplesmente utilizar este parâmetro como um meio de estimar e validar o uso de sistemas de varredura laser aerotransportados sobre áreas urbanas, optou-se por uma classificação mais simples e geral, derivada da anteriormente utilizada para a cobertura vegetal. Tal classificação encontra-se apresentada na tabela 5.3 e exemplificada na figura 5.7.

TABELA 5.3 - CLASSES DE DENSIDADE DAS EDIFICAÇÕES

| DENSIDADE | ÁREA EDIFICADA % |
|-----------|------------------|
| Baixa | < 40 |
| Média | 40 a 70 |
| Alta | > 70 |

FONTE: Adaptada de SHRESTHA & ZINCH (2001)

FIGURA 5.7 - ÁGUA VERDE: CLASSES DE DENSIDADE DAS EDIFICAÇÕES



FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2001)

- A classificação utilizada para definir os tipos de cobertura vegetal existentes em cada uma das áreas selecionadas teve como base as convenções cartográficas propostas pela DSG em seu Manual Técnico do Exército T34-700 (1998). Assim, os tipos de cobertura vegetal foram

definidos de forma que pudessem atender às características das áreas selecionadas como um todo.

Observa-se, portanto, que das classes apresentadas no quadro 5.5, os tipos floresta e bosque natural estão compreendidos pela classe Mata (MA) enquanto os tipos capoeira, capoeirinha e capoeirão estão compreendidos pela classe Mata Regenerada (MR). Por sua vez, a classe relativa a Cultura (CL) compreende as temporárias e permanentes, a classe Campo (CM) compreende toda vegetação rasteira natural (com ou sem a presença de elementos arbóreos ou arbustivos) enquanto a classe Reflorestamento (RF) compreende a plantação contínua de espécies arbóreas como eucalipto e pinheiro. As classes Árvore Isolada (AI) e Bosque Plantado (BO) foram criadas para atender exclusivamente as áreas urbanas.

- 5) Ainda com relação aos dados ALS selecionados, os Anexos B a H apresentam os mapas de localização de cada uma das áreas analisadas.

5.2.2. Dados Obtidos por Outras Técnicas

Como explicitado anteriormente, as áreas selecionadas varridas pelo ALTM 2025 serviram de base para a realização de um segundo levantamento que teve por objetivo caracterizar outros tipos de dados que não os provenientes do emprego da técnica ALS e que também estivessem disponíveis para análise.

Assim, foram considerados dados não-ALS todos aqueles provenientes do emprego de outras técnicas, como a aerofotogramétrica, a topográfica e a geodésica, incluindo os resultados de levantamentos que utilizaram GPS e de digitalizações e/ou vetorizações de produtos analógicos.

Desta forma, para cada um dos projetos anteriormente apresentados, foram levantados os dados não-ALS (somente aqueles que se encontravam disponíveis na empresa que realizou as referidas varreduras) relacionados a seguir.

1) Água Verde

Desta área foram levantados os vãos fotogramétricos, as restituições estereofotogramétricas e as ortofotocartas existentes. Assim, da região de interesse, foram disponibilizados os seguintes produtos: a) ortofotografia digital na escala 1:2.000 gerada em junho de 2003 a partir de fotografias aéreas pancromáticas 1:8.000 obtidas em 1999/2000; b) restituição estereofotogramétrica plano-altimétrica 1:2.000 gerada em novembro de 2003 (apresentando quadras e curvas de nível eqüidistantes de um metro); c) digitalização (por *scanner*) da altimetria restituída entre 1972 e 1999, na escala 1:2.000 (produto analógico) e com eqüidistância vertical de um metro.

2) BR-116

Do trecho em questão também foram levantados os vãos fotogramétricos, as restituições estereofotogramétricas e as ortofotocartas existentes. Da mesma forma, os produtos disponibilizados para análise foram: ortofotografias digitais na escala 1:2.000 geradas a partir de fotografias aéreas pancromáticas 1:8.000 obtidas em 1999/2000; levantamento topográfico plano-altimétrico realizado em 2002; digitalização (por *scanner*) da altimetria restituída entre 1972 e 1999, na escala 1:2.000 (produto analógico) e com eqüidistância vertical de um metro.

3) Carrefour

Por ser uma área destinada à determinação e verificação de alguns parâmetros de calibração do sistema ALTM 2025, esta foi previamente levantada com GPS (para implantação de alguns pontos de controle) e posteriormente densificada com estação total. Assim, foram disponibilizados para esta pesquisa cerca de 2100 pontos com coordenadas UTM e altitude ortométrica (obtida por nivelamento trigonométrico) conhecidas.

Além destes pontos, foi gerada, a partir da cobertura fotogramétrica do município de Curitiba realizada entre 1999 e 2000 (escala 1:8.000), uma ortofotografia digital da área na escala 1:2.000.

4) PETROBRAS

Este foi um projeto desenvolvido ao longo de dutos implantados em todo o território brasileiro e que atingem uma extensão de cerca de 5.000 km. Destes, foram varridos com o sistema ALTM 2025, cerca de 2.400 km. No entanto, de todas as faixas varridas e ortofotocartas geradas, apenas a área compreendida pelas Folhas 19 e 20 (OSBRA) possuem dados obtidos por outras técnicas que não a ALS. Assim, da área em questão foram disponibilizados os seguintes produtos: restituição estereofotogramétrica da altimetria na escala 1:2.000, com curvas de nível equidistantes de um metro; ortofotografia digital na escala 1:2.000, gerada a partir de fotografias aéreas coloridas na escala 1:8.000 e obtidas no período 2000/2002; e levantamento da posição do duto realizado por meio da técnica *Pipeline Current Mapper* (PCM).

5) SC-414, SC-471 e SP-270

No que diz respeito às áreas varridas para estes projetos, nenhum material adicional foi encontrado, a não ser aqueles já especificados no quadro 5.3, na coluna referente a Produtos.

Desta forma, os dados não-ALS utilizados como referência na avaliação dos dados ALS coletados e processados para os trechos em questão, foram os resultantes dos levantamentos topográficos (SC-414, SC-471 e SP-270) e cadastrais (SC-414 e SC-471), além dos resultantes das restituições estereofotogramétricas 1:5.000 (SC-414 e SC-471) e de ortofotografias 1:5.000 (SP-270), constantes do referido quadro.

A pesquisa foi, portanto, conduzida tendo como base os dados apresentados acima. O quadro 5.6 resume as informações descritas a respeito do conjunto de dados não-ALS obtido para cada um dos projetos mencionados.

A proposição do método (para a avaliação dos dados ALS selecionados em relação aos dados não-ALS disponibilizados), bem como, sua aplicação e discussão dos resultados encontrados, encontram-se descritos nos capítulos que se seguem.

QUADRO 5.6 - DADOS NÃO-ALS DISPONIBILIZADOS PARA AS ÁREAS VARRIDAS

| PROJETO | TÉCNICA | | | | | | | | | |
|------------|----------------------|------------------------|---------------|----------|------------------|-------------|-----|-----------|--|--|
| | AEROFOTOGRAMÉTRICA | | | | | TOPOGRÁFICA | | GEODÉSICA | | |
| | Restituição Numérica | Ortofotografia Digital | Digitalização | Cadastro | Pontos Nivelados | GPS | GPR | PCM | | |
| Água Verde | 1:2.000 (PA) | 1:2.000 | 1:2.000 (A) | - | - | - | - | - | | |
| BR-116 | - | 1:2.000 | 1:2.000 (A) | X | X | - | - | - | | |
| Carrefour | - | 1:2.000 | 1:2.000 (A) | - | X | X | - | - | | |
| PETROBRAS | 1:2.000 (A) | 1:2.000 | - | - | - | - | - | X | | |
| SC-414 | 1:5.000 (PA) | - | - | X | X | - | - | - | | |
| SC-471 | 1:5.000 (PA) | - | - | X | X | - | - | - | | |
| SP-270 | 1:1.000 (A) | 1:5.000 | - | - | X | - | - | - | | |

FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2003)

NOTAS: Sinais convencionais utilizados: X Sim;

- Não;

A Altimétrica;

P Planimétrica;

PA Plano-Altimétrica.

6 PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO PARA A COMPARAÇÃO DE DADOS ALS E NÃO-ALS

No primeiro e quinto capítulos do presente trabalho de pesquisa, ficou estabelecido que este tem por objetivo principal a proposição de um método que permita a análise da qualidade de resultados ALS, relativamente a resultados não-ALS pré-existentes. Como explicitado naqueles mesmos capítulos, dados ALS são todos aqueles provenientes do emprego da técnica de varredura laser aerotransportada enquanto dados não-ALS são aqueles provenientes do emprego de outras técnicas, como a topográfica, a geodésica e a fotogramétrica.

A presente pesquisa não pretende, contudo, questionar a qualidade com a qual os dados não-ALS foram obtidos e/ou produzidos e, levará em conta, somente a classificação que lhes foi imputada a fim de atender o que determina as normas e/ou a legislação em vigor.

Assim, apresenta-se, na seqüência, um método para a avaliação de resultados ALS (provenientes do emprego de qualquer um dos sistemas disponíveis no mercado nacional), bem como, os resultados encontrados após sua aplicação aos dados ALS e não-ALS selecionados (Capítulo 5).

5.3 APRESENTAÇÃO DO MÉTODO PARA A COMPARAÇÃO DE DADOS: ALS x NÃO-ALS

O método em proposição para a avaliação dos resultados obtidos com o emprego de sistemas de varredura laser aerotransportados compreende as seguintes etapas:

6.1.1 Seleção de Áreas Levantadas Utilizando a Técnica ALS.

A seleção de áreas levantadas utilizando a técnica ALS deve restringir-se aos limites estabelecidos para os projetos.

É comum, principalmente em levantamentos aerofotogramétricos, que a área fotografada seja superior à estabelecida para um determinado projeto. Isto se dá em função das imposições do emprego da técnica aerofotogramétrica que estabelece uma determinada quantidade de fotografias de segurança para cada faixa, bem como, uma determinada quantidade de faixas de segurança para que a cobertura fotográfica de toda a área seja garantida.

Da mesma forma, nos levantamentos que empregam a técnica ALS, a área varrida é superior à estabelecida, pois, também neste caso, áreas de escape, de segurança e destinadas à inicialização do sistema, devem ser planejadas. Uma vez que a varredura se dá ao longo de uma faixa do terreno, cuja largura é determinada pelo FOV e pela altura da aeronave, o início e o final de cada faixa, bem como a superposição entre faixas, devem ser planejados de forma a assegurar a varredura de toda a área abrangida por um determinado projeto.

No que diz respeito à inicialização do sistema, normalmente são necessários entre 5 a 10 minutos (OTF) para a determinação da posição, velocidade e atitude iniciais do POSTM/AV (integração GPS/IMU). Ressalta-se que durante a inicialização, fabricantes de sistemas ALS aconselham manter o *laserscanner* desligado, porém, o mesmo deve ser acionado e ter sua funcionalidade verificada antes do início planejado para cada faixa. As áreas de escape, por sua vez, são destinadas às manobras da plataforma (voltas e retornos). Durante as manobras, o *laserscanner* é desligado e, somente o POSTM/AV continua acionado, de forma que o alinhamento da IMU e o posicionamento GPS são mantidos, garantindo, assim, a continuidade

das observações para aquela missão.

Uma vez selecionadas as áreas varridas a serem avaliadas, é importante observar alguns dos parâmetros estabelecidos para os levantamentos (segmento aéreo e terrestre) que lhes deram origem. Os parâmetros considerados relevantes encontram-se mencionados no quadro 6.1.

QUADRO 6.1 - PARÂMETROS RELEVANTES AOS LEVANTAMENTOS ALS

| | | |
|-------------------------------|---------------------|--|
| SEGMENTO AÉREO | LASERSCANNER | Ângulo de Varredura Frequência de Varredura Divergência do Feixe Taxa de Repetição do Laser |
| | POS™/AV | Receptor GPS Frequência do Receptor GPS IMU Frequência da IMU |
| | PLATAFORMA | Tipo Velocidade Média de Cruzeiro |
| | MISSÃO | Altura de Vôo Número de Faixas Largura das Faixas Extensão das Faixas Recobrimento entre Faixas |
| | | |
| SEGMENTO TERRESTRE | TERRENO | Altitude Média Densidade da Cobertura Vegetal Densidade de Edificações Relevo |
| | ESTAÇÕES GPS | Número de Estações Receptores GPS Frequência dos Receptores GPS Extensão das Linhas Base |

Além destes, deve-se considerar, em relação aos projetos executados, a área abrangida por cada um deles, sua localização, produtos gerados e período (mês e ano) de execução.

6.1.2 Verificação da Existência de Outros Tipos de Dados para as Áreas Seleccionadas

A verificação da existência de dados provenientes do emprego de outras técnicas deve ser realizada simultaneamente à seleção das áreas varridas, pois, desta forma, diminui-se o risco de seleccionar áreas às quais não é possível associar qualquer outro tipo de levantamento (topográfico, geodésico ou fotogramétrico).

É importante não só ter conhecimento dos diferentes levantamentos e produtos existentes para as áreas seleccionadas, como também, se tais levantamentos e produtos encontram-se, de alguma forma, disponíveis.

O quadro 6.2 aponta quais parâmetros devem ser considerados ao abordar as diferentes técnicas de levantamento existentes para as áreas seleccionadas.

QUADRO 6.2 - PARÂMETROS RELEVANTES AOS LEVANTAMENTOS NÃO-ALS

| | | |
|----------------------------|--|---|
| TOPOGRÁFICO | CADASTRO | Feições/Elementos Cadastrados Método Utilizado Precisão do Levantamento Classificação do Levantamento |
| GEODÉSICO | GPS | Número de Pontos Método Utilizado Precisão do Levantamento Classificação do Levantamento |
| AERO FOTOGRAMÉTRICO | RESTITUIÇÃO | Método Utilizado Feições Restituídas Escala Classificação Final do Produto |
| | ORTOFOTOCARTA | Método Utilizado Feições Complementares Escala Classificação Final do Produto |
| OUTROS | DIGITALIZAÇÃO VETORIZAÇÃO | Escala do Produto Original Classificação do Produto Original Método Utilizado Feições Digitalizadas/Vetorizadas Classificação Final do Produto |

É importante, ao associar as áreas selecionadas aos diversos tipos de levantamentos existentes, saber quais os critérios adotados em relação aos pontos e/ou feições levantadas e aos métodos empregados, a área abrangida por cada levantamento e sua respectiva localização, os produtos gerados e suas respectivas classificações, além do período (mês e ano) no qual cada um destes levantamentos foi executado.

6.1.3 Análise das Características da Superfície do Terreno para as Áreas Selecionadas

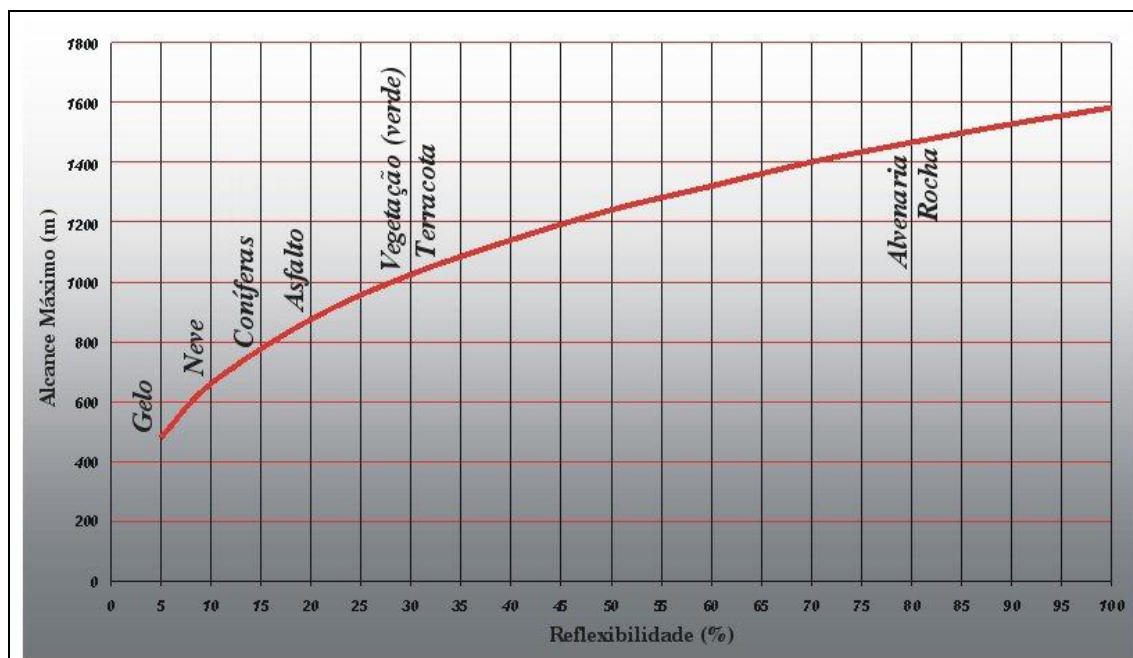
Durante o processo de seleção das áreas varridas é importante observar as características do relevo, da cobertura vegetal e das áreas edificadas, pois estes constituem fatores que podem influenciar a modelagem da superfície do terreno e, conseqüentemente, os resultados obtidos dos levantamentos ALS. 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, diversos autores afirmam ser a capacidade de interação dos elementos que compõem a superfície do terreno com o comprimento de onda do sinal laser que os atinge, 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.

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. Fabricantes de sistemas ALS, no entanto, não costumam especificar para quais tipos de alvo (difuso ou especular) ou para quais coeficientes de reflexão (dependentes da composição de cada alvo), suas especificações de alcance máximo são válidas.

Geralmente, o alcance operacional de um sensor laser é especificado tendo como base a sua interação com alvos difusos que apresentam uma certa reflexibilidade (ex.: 80%) (BROOKER, 2003), sendo tipicamente proporcional à raiz quadrada desta reflexibilidade, bem como, à raiz quadrada da potência com que o feixe laser é emitido (BALTSAVIAS, 1999b). Como exemplo, único encontrado na bibliografia pesquisada, apresenta-se a seguir uma figura (6.1) que relaciona o alcance máximo de um sistema de varredura laser aerotransportado com a reflexibilidade de alguns tipos de alvo. O sistema analisado é o LMS-Q280i da RIEGL, que opera com comprimento de onda, não confirmado pelo fabricante, de 905nm.

FIGURA 6.1 - ALCANCE MÁXIMO x REFLEXIBILIDADE DO ALVO



FONTE: Adaptada de RIEGL Laser Measurement Systems (2004)

NOTA: no gráfico original, GELO e ASFALTO estavam associados a “seco” enquanto NEVE estava associado a “úmido”.

Da mesma forma que para a figura 6.1, o quadro 6.3 identifica alguns tipos de alvo (difusos e especulares) e sua reflexibilidade em relação ao comprimento de onda de 900 nm. Uma vez que o coeficiente de reflexão (r) de um alvo é função do comprimento de onda (λ) do sinal que sobre ele incide, o referido quadro é válido somente para o comprimento de onda especificado.

QUADRO 6.3 - REFLEXIBILIDADE DE ALGUNS TIPOS DE ALVO

| ALVO DIFUSO | REFLEXIBILIDADE (%) | ALVO ESPECULAR | REFLEXIBILIDADE (%) |
|------------------------------|---------------------|--------------------------------------|---------------------|
| Neve | 80 – 90 | Plástico Branco Opaco ⁽⁴⁾ | 110 |
| Madeira ⁽¹⁾ | 94 | Plástico Negro Opaco ⁽⁴⁾ | 17 |
| Alvenaria Branca | 85 | Plástico Transparente ⁽⁴⁾ | 50 |
| Calcário e Argila | Até 75 | | |
| Árvores Decíduas | 60 (Típica) | | |
| Árvores Coníferas | 30 (Típica) | | |
| Areia ⁽²⁾ (seca) | 57 | | |
| Areia ⁽²⁾ (úmida) | 41 | | |
| Praias e Desertos | 50 | | |
| Concreto | 24 | | |
| Asfalto ⁽³⁾ | 17 | | |
| Neoprene Negro | 5 | | |
| Cobertura de Borracha Negra | 2 | | |

FONTE: Adaptado de BROOKER (2003)

(1) Cortada, limpa e seca.

(2) Aplica-se às areias carbonato (*carbonate sand*).

(3) Aplica-se ao asfalto com seixos, ou seja, de superfície rugosa e seca.

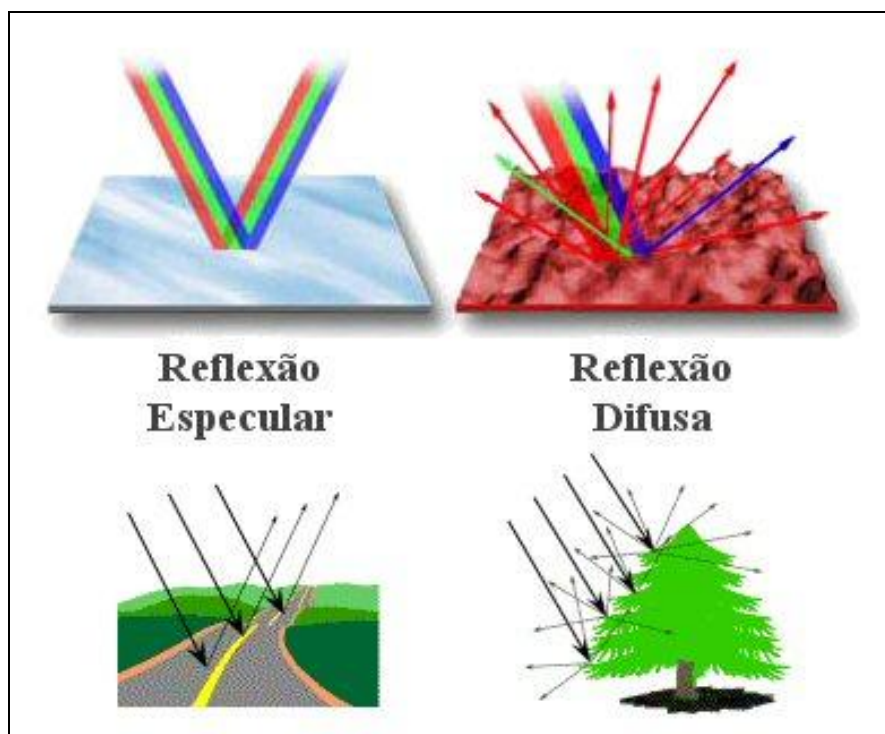
(4) Medido com o feixe perpendicular ao alvo a fim de alcançar reflexão máxima.

Ao comparar a figura (6.1) e o quadro (6.3) apresentados anteriormente, verifica-se que para alguns tipos de alvo (em especial, a neve) as porcentagens de reflexibilidade reportadas são muito diferentes, embora o comprimento de onda do sinal incidente seja praticamente o mesmo. Tamanha diferença pode ser explicada tendo como base o fato de que a reflexibilidade 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 (BALTSAVIAS, 1999b); elevação, densidade e orientação do alvo em relação ao sensor (CUDDY, 1999). Para FLOOD & SATALICH (2001), 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 (figura 6.2) espalha a energia incidente em todas as direções e retorna apenas uma pequena parte desta energia ao emissor. Por sua vez, um alvo especular (figura 6.2) reflete a energia incidente em uma única direção bem definida, que geralmente não é a mesma da energia incidente.

FIGURA 6.2 - ALVO ESPECULAR E ALVO DIFUSO



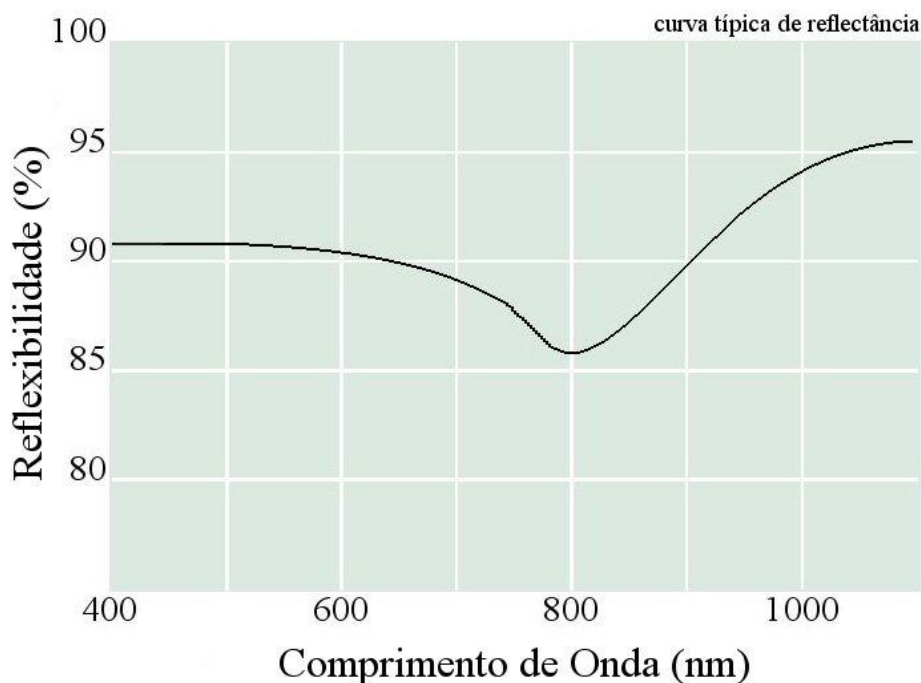
NOTAS: Exemplos de reflexão especular: espelho e superfície asfaltada (lisa).
Exemplos de reflexão difusa: superfície rugosa e árvores.

Um mesmo alvo pode, portanto, comportar-se de diferentes maneiras (em termos de sua reflexibilidade) 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).

Para HUISING & PEREIRA (1998), 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 (BEHAN, 2000).

As figuras apresentadas na seqüência ilustram, respectivamente, o comportamento do alumínio (figura 6.3), bem como, o comportamento da água, da vegetação e do solo (figura 6.4), ambos em relação aos diferentes comprimentos de onda incidentes.

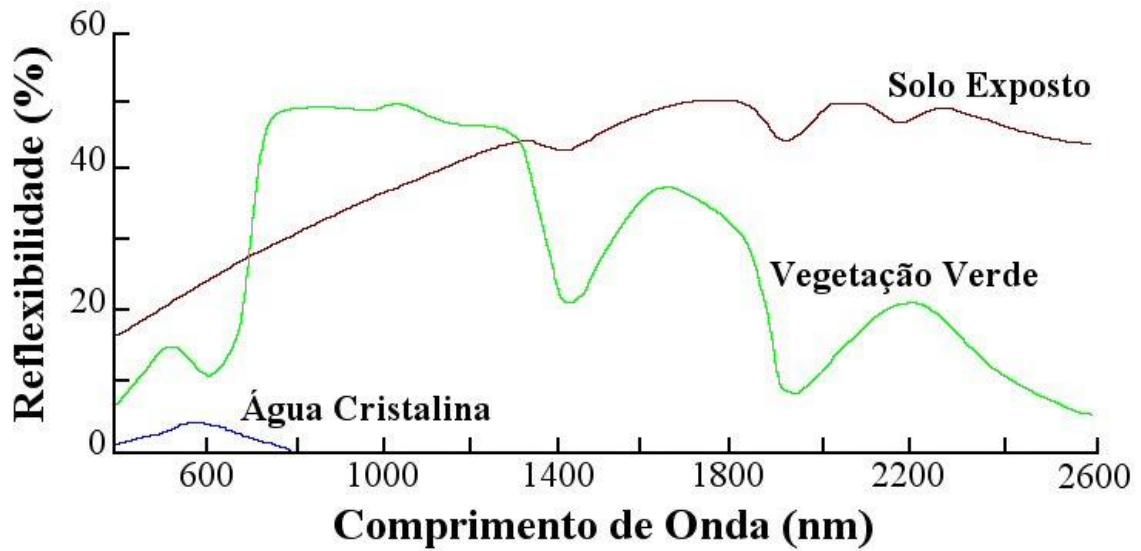
FIGURA 6.3 - ALVO ESPECULAR: REFLEXIBILIDADE x COMPRIMENTO DE ONDA



FONTE: Adaptada de <http://www.photonics.com/directory/> - Acesso em 04/2004

Pode-se observar, para o tipo de alvo especular apresentado acima (superfície de alumínio, sob ângulo normal de incidência), que a reflexibilidade do mesmo é influenciada (como mencionado anteriormente) pelo comprimento de onda do sinal que sobre ele incide.

FIGURA 6.4 - REFLEXIBILIDADE: ÁGUA x VEGETAÇÃO x SOLO



FONTE: Adaptada de <http://www.ggr.ulaval.ca/> - Acesso em 04/2004

O gráfico da figura 6.4, por sua vez, revela que a vegetação verde apresenta uma reflexibilidade constante entre os comprimentos de onda de 700 e 1300nm, enquanto a água cristalina apresenta baixa reflexibilidade para todos os comprimentos de onda considerados (inferior a 10% para comprimentos de onda próximos a 600nm, chegando a 0% para comprimentos de onda iguais ou superiores a 800nm). Para WEVER & LINDENBERGER (1999), no entanto, é possível conseguir uma boa reflexibilidade do feixe laser, sobre as superfícies com água, se o FOV não ultrapassar $\pm 10^\circ$.

Assim, a fim de facilitar a análise dos resultados obtidos de levantamentos realizados utilizando a técnica ALS, propõe-se uma análise prévia da superfície do terreno varrida, bem como, uma atenção especial para as áreas potencialmente problemáticas (aquelas que apresentam alvos de baixa ou nenhuma reflexão) e que podem contribuir para que os resultados da varredura não sejam os esperados. Desta forma, torna-se possível prever falhas na varredura, bem como, detectar erros no processamento (filtragem e interpolação) dos pontos laser coletados.

O quadro 6.4 apresenta algumas das características da superfície do terreno que devem ser levadas em consideração, quando da realização da referida análise.

QUADRO 6.4 - SUPERFÍCIE DO TERRENO: CARACTERÍSTICAS

| SUPERFÍCIE DO TERRENO | | CARACTERÍSTICAS | |
|-----------------------|-------------|-----------------|------|
| | | Densidade | Tipo |
| Alvos Potenciais | Vegetação | X | X |
| | Edificações | X | X |
| | Outros | - | X |
| Relevo | | - | X |

NOTA: Sinais convencionais utilizados: X Sim; - Não.

Ainda em relação à varredura, uma melhor definição da superfície do terreno pode ser conseguida (após o processamento dos dados coletados), se as características acima mencionadas forem levadas em consideração, também durante a fase de planejamento do levantamento (vôo laser).

6.1.4 Análise das Características Técnicas dos Levantamentos Executados

O conjunto das características técnicas de um levantamento ALS compreende, no mínimo, os seguintes elementos: tipo de plataforma utilizada, velocidade, altura de vôo, divergência do feixe laser, ângulo e frequência de varredura, taxa de repetição do laser, largura da faixa varrida, espaçamento (x e y) entre os pontos no terreno e densidade de pontos.

Tais elementos podem ser obtidos diretamente do plano de vôo e/ou diretamente do relatório de vôo (ambos documentados via planilha específica da empresa que executa o levantamento). Do relatório de vôo é possível obter ainda informações relevantes sobre o GPS, tais como, valores de PDOP, número de satélites e porcentagens de *dropouts* (perdas do sinal GPS).

Os referidos elementos, em conjunto com os resultados da análise prévia das características da superfície varrida (relativamente à vegetação, edificações e relevo), constituem informações relevantes acerca do levantamento executado e auxiliam a compreensão dos resultados obtidos após o processamento dos dados coletados.

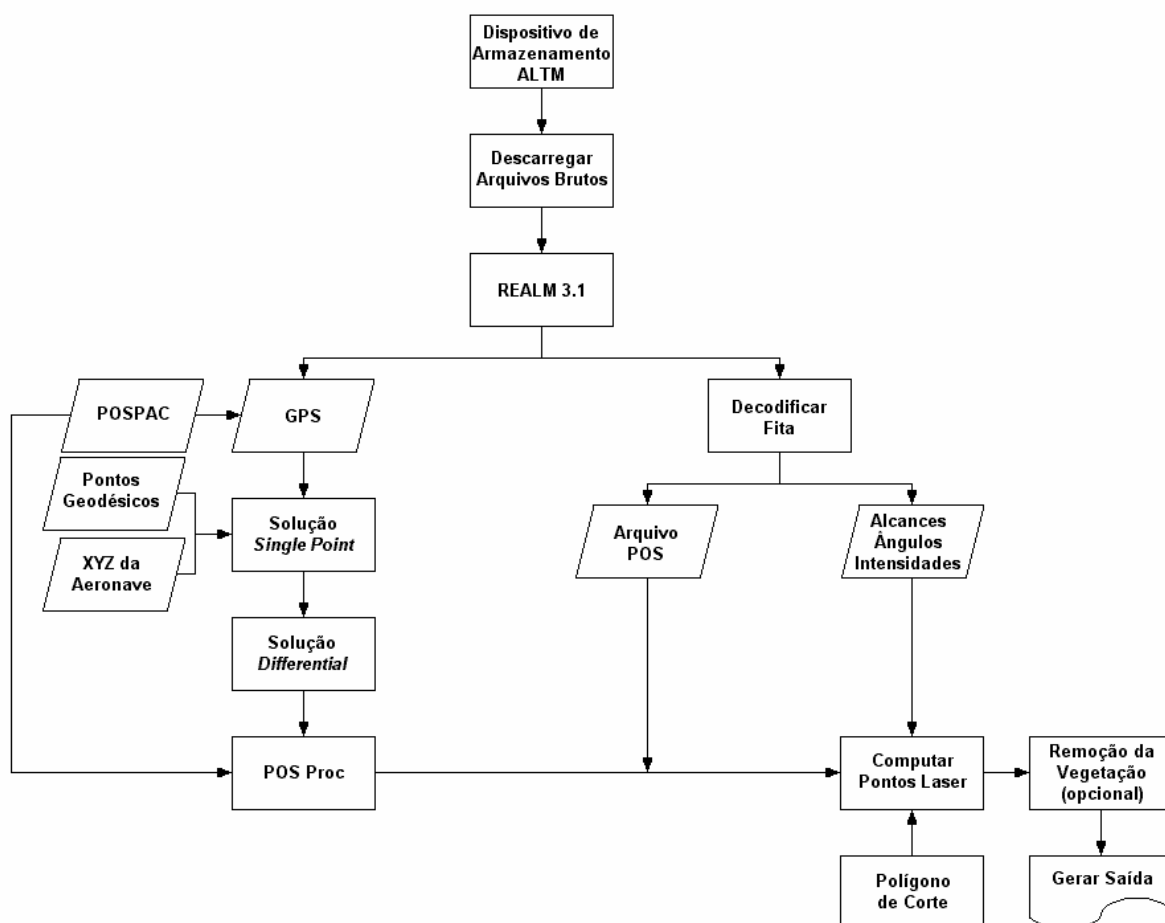
6.1.5 Análise das Características Técnicas dos Processamentos Realizados

Uma vez executado o levantamento, passa-se à fase seguinte e que diz respeito ao processamento do conjunto de dados coletado. Tal conjunto compreende, basicamente, os dados obtidos pelo *laserscanner* (alcances, ângulos de varredura, intensidades e tempo), os obtidos pelo GPS aerotransportado (distâncias e tempo), os obtidos pela IMU (acelerações, taxas angulares e tempo), os obtidos pelo GPS terrestre (distâncias e tempo) e os obtidos da calibração do sistema (laboratório e campo: parâmetros de montagem, correções e fator de escala).

Como explicitado no Capítulo 2, o processamento dos dados ALS envolve as seguintes etapas: solução da trajetória da plataforma (POSTM/AV, GPS terrestre e parâmetros de calibração); processamento dos pontos laser para obtenção das coordenadas 3D e para o seu geo-referenciamento (dados brutos, parâmetros de calibração, sistema geodésico e projeção cartográfica); classificação, filtragem e interpolação para geração de uma grade regular de pontos. Dependendo do sistema utilizado, as etapas envolvidas pelo processamento podem ou não se dar na ordem descrita acima e, até mesmo, o produto gerado pode ou não constituir uma grade regular de pontos 3D geo-referenciados.

No caso da fabricante Optech Inc. (cujos sistemas comercializados no Brasil correspondem, até a presente data, a 100% do mercado nacional) o processamento dos dados brutos ALS se dá por meio do *software* REALM Survey Suite (fornecido com os referidos sistemas e, atualmente, na versão 3.1), cujas funções básicas encontram-se apresentadas na figura 6.5.

FIGURA 6.5 - FUNÇÕES BÁSICAS DO REALM SURVEY SUITE



FONTE: OPTTECH (2002b)

É importante ressaltar que o processamento dos dados brutos ALS requer uma configuração de *hardware* capaz de assegurar a manipulação adequada do volume de dados coletado. Assim, computadores com processadores potentes, com alta capacidade de memória RAM e de disco, além de *drives* e *slots* para descarregar os dados coletados pelo sistema, constituem requisitos mínimos para o processamento.

Ainda no que diz respeito ao *software* empregado no processamento dos dados brutos ALS, é usual que o fabricante, ao fornecer o sistema, também forneça o treinamento das pessoas futuramente envolvidas com tal processamento. A duração do treinamento depende da complexidade do *software* utilizado. Observa-se, no entanto, que o referido treinamento não compreende os *softwares* empregados posteriormente ao processamento da nuvem de pontos ALS e normalmente necessários à geração e edição de modelos digitais 3D (DEMs, DTMs e DSMs).

Ressalta-se que é preciso organizar os dados (coletados e processados) em arquivos e pastas específicos de forma a facilitar a identificação dos conjuntos de dados pertinentes a cada projeto de varredura. Em função da quantidade de arquivos criados durante o levantamento (*laserscanner*, GPS/IMU, GPS terrestre, calibração) e também da quantidade de arquivos criados durante o processamento (temporários, intermediários, de configurações e de saída), o risco de confundir arquivos não organizados previamente é alto. Na melhor das hipóteses, a falta de organização pode provocar um tempo de processamento (e re-processamento) dos dados maior que o esperado. Uma vez que o tempo de processamento geralmente é três vezes o tempo de coleta (WEHR & LOHR, 1999), o custo de um projeto tende a aumentar se os dados ALS forem manipulados e processados por pessoas inexperientes e desconhecedoras do seu processo de obtenção e armazenamento.

Ainda em relação ao tempo de processamento, este também é função do algoritmo empregado na classificação e filtragem dos dados. Algoritmos mais elaborados e que requerem a definição de uma maior quantidade de parâmetros necessitam um maior tempo de processamento, embora também conduzam a resultados mais confiáveis (PFEIFER et al., 1999; SCHIEWE, 2000).

Assim, os parâmetros normalmente requeridos durante o processamento dos dados brutos ALS (no REALM *Survey Suite*) estão relacionados ao (à):

- Projeto: nome, ano, cliente e operador.
- Base de Dados: especificação dos arquivos e/ou pastas pertinentes ao projeto (nome, número ou código).
- GPS: parâmetros do aerolevanteamento (informações do *offset* da antena); parâmetros da sessão GPS levantada (dados brutos observados: aéreos e terrestres; sistema de tempo; parâmetros do processamento absoluto; parâmetros do processamento diferencial: ionosfera, dupla frequência, geometria, etc.); e parâmetros de saída (gráficos, relatórios e arquivos).
- IMU: especificação dos arquivos contendo os dados brutos IMU, dos arquivos contendo a solução da trajetória GPS e dos arquivos provenientes do processamento com o POSPac™; parâmetros de identificação da IMU (tipo e frequência); e parâmetros de saída (gráficos, relatórios e arquivos).
- Pontos Laser: parâmetros do sistema empregado (tipo de sistema, tipo de IMU, frequência da IMU, valores de calibração, valores limites de intensidade, etc.); especificação dos arquivos contendo os dados brutos *laserscanner*; parâmetros meteorológicos (temperatura e pressão); parâmetros de alcance (mínimo e máximo); especificação do polígono de processamento (para o processamento de uma área específica); parâmetros geodésicos e cartográficos (elipsóide, datum, sistema de projeção e sistema de coordenadas); parâmetros do projeto; especificação dos arquivos contendo a solução GPS e os resultados do processamento da IMU; parâmetros de classificação (tipo de terreno, tipo de cobertura, tamanho da grade a ser gerada, número máximo de iterações, altitude

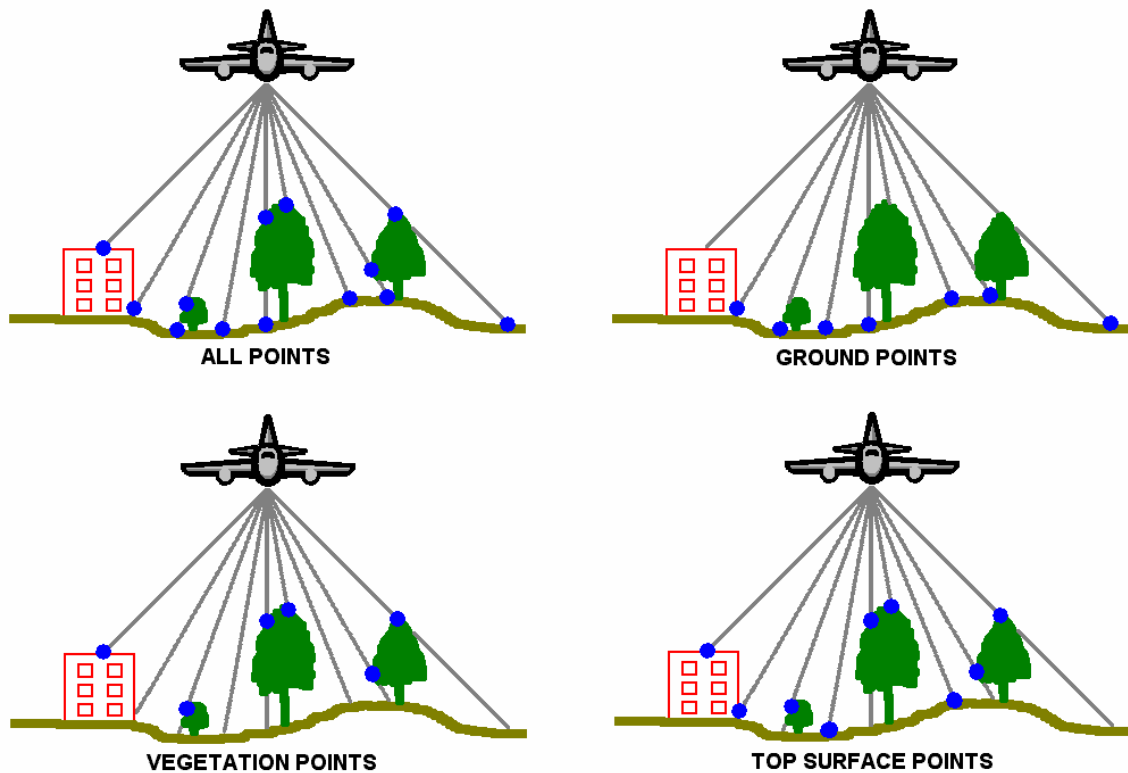
mínima e máxima do terreno, janela de remoção, limites de classificação, entre outros); e parâmetros de saída (gráficos, relatórios e arquivos).

No que diz respeito à saída dos pontos laser processados, ressalta-se que o REALM *Survey Suite* permite gerar os seguintes tipos de arquivo:

- Todos os Pontos (*All Points*): compreende todos os pontos coletados e processados correspondentes aos modos primeiro e último retorno.
- Pontos do Terreno (*Ground Points*): compreende todos os pontos classificados como terrestres e geralmente derivados do modo último retorno.
- Pontos de Vegetação (*Vegetation Points*): compreende todos os pontos classificados como vegetação (correspondentes ao topo de árvores, plantas, arbustos, edificações) e geralmente derivados do modo primeiro retorno.
- Pontos do Topo da Superfície (*Top Surface*): compreende somente os pontos derivados do modo primeiro retorno.

A figura 6.6 identifica, portanto, quais pontos coletados da superfície do terreno estão contidos em cada um dos tipos de arquivo acima descritos.

FIGURA 6.6 - TIPOS DE ARQUIVO DE PONTOS ALS



O referido *software* também permite especificar o formato dos arquivos a serem gerados, que podem ser do tipo: ASCII (texto), ATR (específico do MicroStation), BTR (versão binária do ATR), WINPUT (específico do *software* SCOP), binário (8 bits) e DXF (padrão AutoCAD). Além do conteúdo do arquivo e do seu formato é possível especificar ainda se os arquivos devem incluir os resíduos computados para cada ponto e/ou a intensidade (primeiro e/ou último retorno) de cada ponto coletado e processado. A figura 6.7 apresenta parte do conteúdo de um arquivo do tipo “*all points*”, no formato ASCII (em forma de texto).

FIGURA 6.7 - CONTEÚDO DE UM ARQUIVO DE PONTOS ALS NO FORMATO ASCII

| Último Retorno | | | | Primeiro Retorno | | | |
|----------------|------------|--------|------|------------------|------------|--------|------|
| E | N | H | Int. | E | N | H | Int. |
| 21540965.30 | 8531905.89 | 300.59 | 2 | 21540967.44 | 8531907.46 | 310.34 | 10 |
| 21540965.46 | 8531906.23 | 300.65 | 2 | 21540967.55 | 8531907.75 | 310.09 | 10 |
| 21540966.01 | 8531906.33 | 300.57 | 3 | 21540968.05 | 8531907.83 | 309.78 | 10 |
| 21540966.07 | 8531906.66 | 299.15 | 4 | 21540968.21 | 8531908.22 | 308.84 | 7 |
| 21540966.30 | 8531906.82 | 299.09 | 5 | 21540968.44 | 8531908.38 | 308.84 | 7 |
| 21540966.57 | 8531907.00 | 310.84 | 12 | 21540966.57 | 8531907.00 | 310.90 | 12 |
| 21540966.76 | 8531907.22 | 300.26 | 1 | 21540968.64 | 8531908.58 | 308.76 | 5 |
| 21540967.26 | 8531907.33 | 310.57 | 10 | 21540967.25 | 8531907.32 | 310.47 | 10 |
| 21540967.01 | 8531907.47 | 310.95 | 11 | 21540966.98 | 8531907.46 | 310.84 | 11 |
| 21540967.39 | 8531907.64 | 310.47 | 10 | 21540967.39 | 8531907.64 | 310.47 | 10 |
| 21540967.67 | 8531907.50 | 303.84 | 2 | 21540968.71 | 8531908.25 | 308.53 | 1 |
| 21540968.21 | 8531907.91 | 309.51 | 9 | 21540968.21 | 8531907.96 | 309.53 | 9 |
| 21540967.98 | 8531908.14 | 310.02 | 11 | 21540967.96 | 8531908.13 | 309.95 | 11 |
| 21540968.39 | 8531907.99 | 301.72 | 3 | 21540968.37 | 8531907.98 | 301.65 | 3 |
| 21540968.48 | 8531908.48 | 309.13 | 7 | 21540968.48 | 8531908.48 | 309.15 | 7 |
| 21540968.89 | 8531908.66 | 301.32 | 10 | 21540968.87 | 8531908.66 | 301.27 | 10 |
| 21540969.21 | 8531908.50 | 301.14 | 10 | 21540971.55 | 8531910.24 | 311.84 | 3 |
| 21540965.00 | 8531909.90 | 309.71 | 11 | 21540964.98 | 8531909.90 | 309.69 | 11 |
| 21540965.42 | 8531910.22 | 309.53 | 11 | 21540965.41 | 8531910.22 | 309.53 | 11 |

FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2003)

O *software REALM Survey Suite* compreende ainda um módulo onde são definidos os parâmetros dos elipsóides e das projeções cartográficas adotados. Assim, de uma lista é possível selecionar, editar, deletar e adicionar tanto elipsóides (cujos valores de semi-eixo maior, semi-eixo menor e excentricidade podem ser alterados) como projeções cartográficas (cujos valores de fator de escala, origem, zona, meridiano central, fuso, entre outros, também podem ser alterados). Este mesmo módulo permite ainda a definição e/ou a importação de pontos geodésicos utilizados como referência nos levantamentos, bem como, as transformações de datum (de um sistema de coordenadas geodésicas para outro) e as transformações de coordenadas (de um sistema de coordenadas específico para outro). Enquanto nas transformações de datum são requeridos três parâmetros de translação, três de rotação e o fator de escala, nas transformações de coordenadas são requeridos parâmetros específicos dos elipsóides e das projeções, além do tipo de coordenada de entrada e de saída.

6.1.6 Comparação dos Dados ALS Processados com os Dados Não-ALS Disponibilizados

A comparação entre os dados ALS processados e os dados não-ALS obtidos de outros tipos de levantamento deve, primeiramente, levar em consideração a forma como os pontos encontram-se distribuídos (nuvem, grade regular ou feição) em cada conjunto considerado. Uma vez definida a distribuição de cada conjunto de pontos, efetua-se a comparação de acordo com esta distribuição. Assim, conjuntos de pontos ALS que se encontram distribuídos irregularmente (nuvem) não devem ser comparados a conjuntos de pontos não-ALS que se encontram distribuídos segundo uma grade regular ou segundo algum tipo de feição (curvas de nível, por exemplo). Este, de uma maneira geral, é o procedimento adotado por diversos pesquisadores estrangeiros (ACKERMANN, 1999; FILIN & CSATHO, 1999; WEVER & LINDENBERGER, 1999; PETZOLD & AXELSSON, 2000) para a avaliação de dados ALS. O método proposto exige, portanto, que haja uma compatibilização entre os diferentes tipos de distribuição (relativamente aos dados pertencentes a uma mesma área) antes que a comparação seja efetuada. Assim, levando-se em consideração os resultados obtidos do emprego das diferentes técnicas anteriormente abordadas e, conseqüentemente, da própria técnica ALS, pode-se afirmar que as comparações podem ser realizadas nos seguintes níveis de distribuição: grades regularmente espaçadas, feições comuns e nuvens de pontos.

No que diz respeito à comparação entre grades regularmente espaçadas, o mercado disponibiliza atualmente *softwares* que permitem comparar grades de pontos 3D (superfícies ou modelos) provenientes de diferentes fontes ou levantamentos. Deve-se tomar o cuidado, no entanto, de utilizar o mesmo algoritmo (ou método de interpolação) para a geração de ambas as grades envolvidas na

comparação, pois diferentes algoritmos conduzem a diferentes resultados (SMITH, 2003). Deve-se atentar ainda para o fato de que as grades devem ter o mesmo espaçamento e que este deve ser compatível com as especificações de precisão dos levantamentos em questão. No caso de levantamentos realizados com diferentes especificações de precisão, tais especificações devem ser reduzidas de forma a atender, simultaneamente, os levantamentos considerados.

Ainda em relação à comparação entre grades, autores como VOSSELMAN (2000) afirmam que a interpolação dos pontos ALS processados, em uma grade regular, normalmente acarreta perda de informação. BEHAN (2000), por outro lado, afirma que os efeitos do método de interpolação utilizado podem ser minimizados se o espaçamento especificado para a grade for equivalente à densidade original dos pontos coletados. Ressalta-se, no entanto, que a densidade original também é afetada pelo processamento dos pontos, uma vez que estes passam por uma classificação prévia que geralmente resulta na eliminação daqueles pontos que não pertencem ao conjunto final pretendido (DEM ou DSM). Ressalta-se ainda que o objetivo, no caso específico da comparação entre grades regulares, é verificar apenas a qualidade vertical dos resultados obtidos com o emprego da técnica ALS.

No que diz respeito à comparação entre feições, normalmente esta é realizada com base em curvas de nível, edificações e vias (arruamentos ou estradas), o que permite verificar tanto a qualidade vertical como horizontal dos resultados obtidos com o emprego da técnica ALS. Curvas de nível geradas por processos estereofotogramétricos ou de levantamentos de campo podem, portanto, ser comparadas às curvas de nível geradas de levantamentos ALS. Ressalta-se, no entanto, que a comparação entre curvas de nível geradas automaticamente (a partir de levantamentos ALS e de campo) é menos problemática, pois o mesmo algoritmo

ou método pode (e deve) ser empregado para gerar tais curvas, minimizando, desta forma, os efeitos que as diferenças entre os processos de obtenção das curvas possivelmente teriam sobre os resultados da comparação.

A comparação entre nuvens de pontos (caracterizadas por serem distribuições aleatórias), por sua vez, deve ser feita com base em pontos comuns diretamente obtidos do processamento dos dados ALS coletados e de levantamentos de campo. Caso não existam levantamentos de campo ou o número de pontos de campo seja insuficiente, pode-se realizar a comparação com base em pontos obtidos por fotogrametria. A forma de conduzir a avaliação, em ambos os casos, dependerá do tipo de ponto levantado em campo (nivelamento, cadastro), do tipo de ponto determinado fotogrametricamente (ponto cotado, ortofotografia digital) e do tipo de ponto ALS disponibilizado (ponto XYZ, imagem de intensidade).

Como resultado, a comparação entre os conjuntos de pontos ALS e não-ALS deve fornecer as diferenças entre coordenadas horizontais e verticais relativas a pontos comuns de ambos os conjuntos testados a fim de que a qualidade posicional dos pontos obtidos pela técnica ALS possa ser determinada. Para MAUNE et al. (2001d), os conjuntos de pontos não-ALS devem, sempre que possível, refletir uma fonte independente de maior acurácia que a fonte ALS.

6.1.7 Análise dos Resultados da Comparação

Uma vez efetuada a comparação entre os dados ALS e não-ALS, procede-se a análise dos resultados obtidos desta comparação. Tais resultados são, no entanto, função do tipo de comparação realizada (entre grades regulares, feições comuns ou nuvens de pontos). Assim, a fim de adotar um padrão de análise para o método em

proposição, independentemente do tipo de comparação empregado, os resultados devem ser analisados com base nos seguintes critérios:

- 1º. Apresentando as diferenças de coordenadas (XYZ) encontradas por meio de tabelas e/ou gráficos
- 2º. Utilizando indicadores de qualidade para a avaliação da acurácia final dos pontos ALS processados

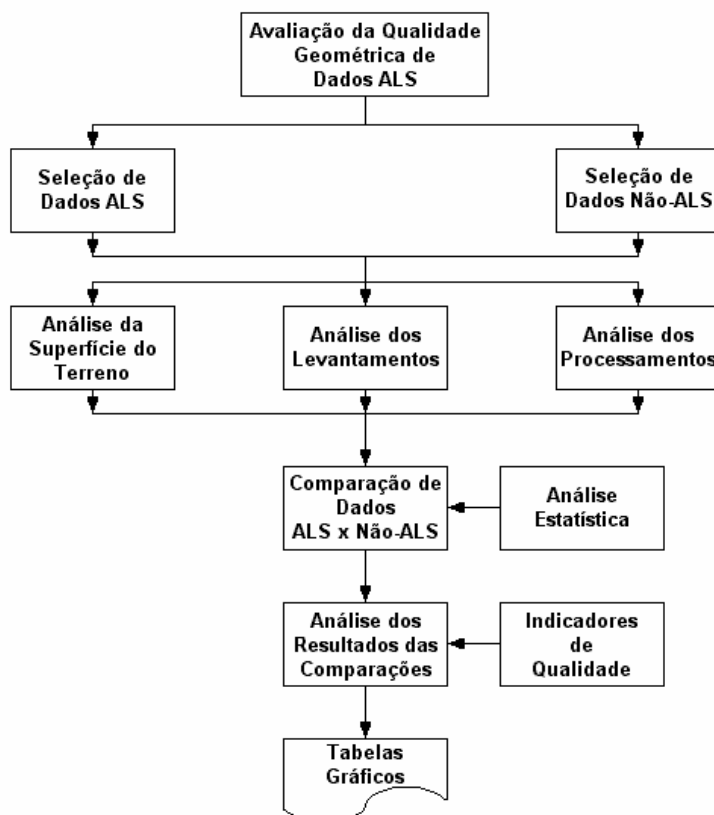
A apresentação das diferenças encontradas durante a etapa de comparação dos conjuntos de pontos ALS e não-ALS por meio de tabelas e/ou gráficos é uma prática comum entre os pesquisadores e permite acesso e visualização dos resultados de forma rápida e eficiente. Autores como MERCER (2001), MAAS (2002), ZHANG (2002), ANDERSEN et al. (2003a) e RIAÑO et al. (2003), além de relatórios produzidos por algumas instituições americanas (como o “*LIDAR Accuracy Assessment Report*” do *North Carolina Geodetic Survey* - NCGS e como o “*LIDAR Accuracy: an Airborne 1 perspective*” da *AIRBORNE 1 Corporation*), sugerem a utilização de tabelas onde devem estar expostas as seguintes estatísticas: valores mínimos, valores máximos, médias e desvios-padrão, relativamente às diferenças XYZ encontradas. Os gráficos empregados por diversos pesquisadores, por outro lado, dependem do tipo de ferramenta utilizada para a análise. Autores como MAAS (2002), ANDERSEN et al. (2003b), OLLIER et al. (2003) e WEBSTER et al. (2004) sugerem o uso de gráficos produzidos por técnicas de análise multivariada (*scatterplotters, scalograms, etc.*) enquanto autores como KARTSOUNIS & HEYNS (2002) e MORIN & EL-SHEIMY (2002), além do relatório da *AIRBORNE 1* citado, recomendam a utilização de histogramas de erros (*error histogram*).

A utilização de indicadores de qualidade, como o Erro Médio Quadrático (EMQ), o Erro Padrão (EP) e/ou o Erro Provável, permite confrontar os resultados

encontrados com o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) constante do Decreto No 89.817/84 e empregado na avaliação da qualidade de produtos cartográficos gerados no (e para o) território brasileiro. Embora o PEC limite-se a avaliar apenas a qualidade geométrica de documentos cartográficos, de acordo com AFONSO et al. (2002) o processo estabelecido pelo referido decreto é idêntico ao adotado pela NATO *Standardization Agreement* (STANAG), relativamente à avaliação de mapas terrestres, cartas aeronáuticas e a dados topográficos digitais. Ambos os documentos estabelecem que um erro circular corresponde à exatidão (acurácia) posicional no plano horizontal enquanto um erro linear corresponde à exatidão (acurácia) posicional no plano vertical.

A figura 6.8 apresenta um fluxograma das etapas requeridas para a avaliação dos resultados obtidos de varreduras laser aerotransportadas, segundo o método proposto acima.

FIGURA 6.8 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS PARA AVALIAÇÃO DE RESULTADOS ALS



6.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO AOS DADOS ALS E NÃO-ALS SELECIONADOS

Uma vez definidas as etapas para aplicação do método que pretende avaliar a qualidade cartográfica de vários conjuntos de dados obtidos do emprego da técnica ALS, procede-se a sua execução.

Para facilitar o entendimento e evitar repetições, optou-se por apresentar as referidas etapas em dois grupos distintos, ou seja, um voltado à definição dos principais parâmetros compreendidos pelos dados ALS e não-ALS selecionados e/ou disponibilizados e, outro voltado somente à comparação destes dados e à análise dos resultados obtidos.

6.2.1 Definição dos Parâmetros Compreendidos pelos Dados Selecionados

A definição dos parâmetros compreendidos pelos dados ALS e não-ALS selecionados e/ou disponibilizados para esta pesquisa envolvem as cinco primeiras etapas descritas no item 6.1. São elas:

I. Seleção das áreas levantadas utilizando a técnica ALS

O Capítulo 5 do presente trabalho de pesquisa descreve, de forma detalhada, alguns dos projetos que utilizaram a técnica ALS para a geração de produtos cartográficos. Assim, o quadro 5.3 (pg. 116 e 117) do referido capítulo apresenta uma lista das áreas varridas pelo *laserscanner* aerotransportado disponibilizadas para esta pesquisa, com indicação dos projetos aos quais pertencem, contratantes, localização, extensão e principais produtos gerados.

II. Verificação da existência de outros tipos de dados para as áreas selecionadas

Da mesma forma, os dados não-ALS levantados e disponibilizados para esta pesquisa encontram-se descritos no Capítulo 5 do presente trabalho. Assim, o quadro 5.6 (pg. 128) deste mesmo capítulo apresenta um resumo dos produtos obtidos por outras técnicas (aerofotogrametria, topografia e/ou geodésia) e disponíveis para os projetos de varredura laser mencionados.

III. Análise das características da superfície do terreno para as áreas selecionadas

A análise das características da superfície do terreno, para cada área selecionada, também foi previamente apresentada no Capítulo 5 e resumida no quadro 5.5 (pg. 121), onde se encontram descritos os critérios de caracterização utilizados, como tipo de relevo, densidade da cobertura vegetal, tipo de cobertura vegetal e densidade das edificações.

IV. Análise das características técnicas dos levantamentos executados

Mais uma vez, as características técnicas dos levantamentos executados que empregaram a técnica ALS foram apresentadas no Capítulo 5 do presente trabalho de pesquisa e encontram-se resumidas no quadro 5.4 (pg. 118).

V. Análise das características técnicas dos processamentos realizados

A análise das características técnicas dos processamentos realizados envolve, como explicitado anteriormente, principalmente, a definição dos tipos de arquivos de pontos que resultaram dos processamentos executados (relativamente aos dados ALS envolvidos nesta pesquisa) e seu formato, bem como, os tipos de arquivos utilizados para armazenamento dos dados não-ALS provenientes de outros levantamentos.

No que diz respeito ao processamento dos dados ALS selecionados, o *software* utilizado foi o *REALM Survey Suite*, fornecido com os sistemas de varredura aerotransportados (ALTM) fabricados e comercializados pela Optech Inc. Assim, relativamente aos arquivos resultantes dos processamentos realizados com o referido *software*, o quadro 6.5 identifica, para cada área de dados selecionada, os tipos de arquivos disponibilizados e seus respectivos formatos.

QUADRO 6.5 - ARQUIVOS DOS DADOS ALS: CARACTERÍSTICAS

| PROJETO | TIPO DE ARQUIVO | | | | FORMATO | | | | |
|------------|-----------------|---|---|---|---------|-----|-----|-----|-----|
| | A | G | T | V | ASC | DWG | TFW | TIF | XLS |
| Água Verde | X | X | - | - | X | X | X | X | X |
| BR-116 | X | X | - | - | X | X | X | X | X |
| Carrefour | X | X | - | - | X | X | X | X | X |
| PETROBRAS | - | X | - | - | X | X | - | - | X |
| SC-414 | - | X | - | - | X | X | - | - | X |
| SC-471 | - | X | - | - | X | X | - | - | X |
| SP-270 | - | X | - | - | X | X | X | X | X |

NOTAS: Sinais convencionais utilizados: (X) Sim e (-) Não.

A All;

G Ground;

T Top;

V Vegetation.

XLS e DWG: arquivos de dados do planejamento de voo.

TIF e TFW: arquivos de imagens de intensidade.

Da mesma forma, o quadro 6.6 identifica, para cada área de projeto anteriormente apresentada, os tipos de arquivo e seus respectivos formatos, relativamente aos dados não-ALS disponibilizados para comparação.

QUADRO 6.6 - ARQUIVOS DOS DADOS NÃO-ALS: CARACTERÍSTICAS

| PROJETO | TIPO DE ARQUIVO | | | | | FORMATO | | | |
|------------|-----------------|----|---|---|---|---------|-----|-----|-----|
| | C | CN | L | O | R | ASC | DWG | TIF | TFW |
| Água Verde | - | X | - | X | X | - | X | X | X |
| BR-116 | X | X | X | X | - | X | X | X | X |
| Carrefour | - | X | X | X | - | - | X | X | X |
| PETROBRAS | - | X | X | X | X | - | X | X | X |
| SC-414 | X | X | X | - | X | X | X | - | - |
| SC-471 | X | X | X | - | X | X | X | - | - |
| SP-270 | - | X | X | X | - | - | X | X | X |

NOTAS: Sinais convencionais utilizados: (X) Sim e (-) Não.

C Cadastro;

CN Curvas de Nível Automáticas ou Digitalizadas;

L Levantamento de Campo;

O Ortofotografia Geo-referenciada;

R Restituição Estereofotogramétrica.

ASC: arquivos resultantes dos levantamentos de campo.

TIF e TFW: arquivos das ortofotografias digitais.

DWG: arquivos da restituição, da geração automática ou digitalização de curvas de nível e do cadastro.

6.2.2 Comparação dos Dados Seleccionados e Análise dos Resultados

Uma vez caracterizados os dados (ALS e não-ALS) envolvidos na pesquisa, procede-se a comparação entre os conjuntos de dados seleccionados. Tal comparação, no entanto, em função da natureza de cada projeto de mapeamento, compreende etapas específicas que são função dos conjuntos de dados não-ALS disponibilizados. Assim, na seqüência encontram-se descritas as etapas seguidas na comparação de cada conjunto específico de dados (ALS e não-ALS), em função das características dos projetos de mapeamento que lhes deram origem, bem como, os resultados encontrados.

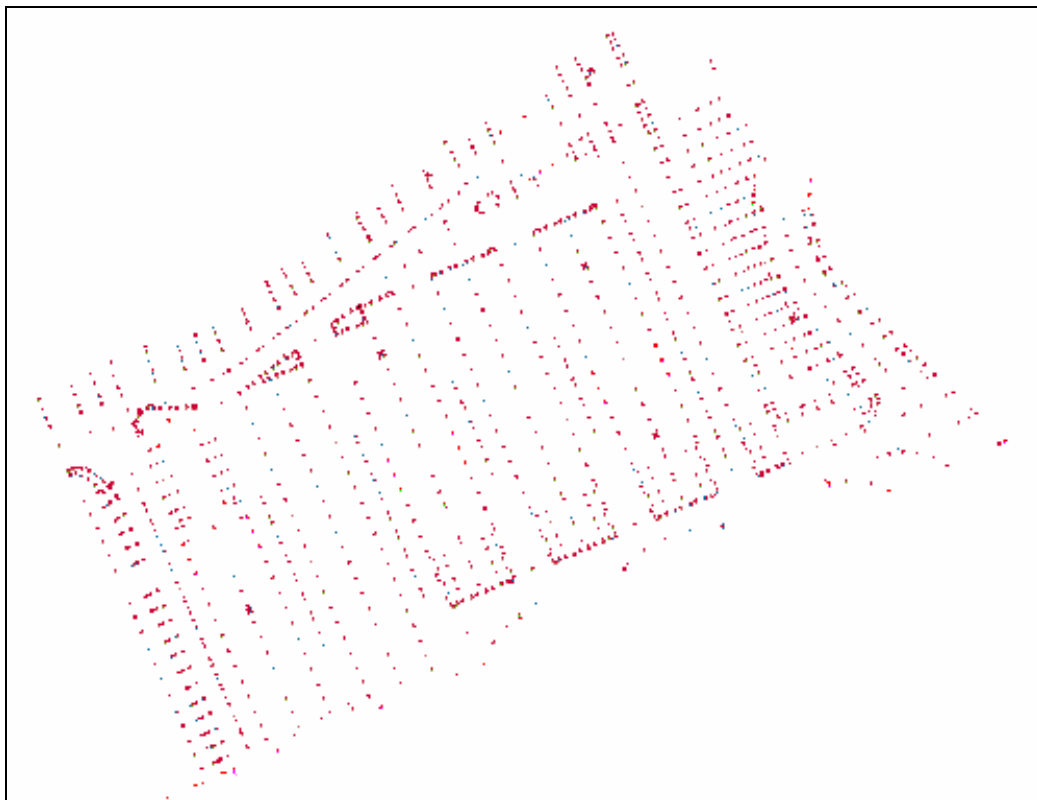
1) Comparação Nº 1: Área de Calibração - Supermercado Carrefour

Como apresentado no Capítulo 5 do presente trabalho de pesquisa, a área de calibração, situada próxima à sede da empresa que realizou os vãos de varredura laser disponibilizados para esta pesquisa, compreende a área de estacionamento e a edificação principal do Supermercado Carrefour (unidade Parolin). Os conjuntos de pontos comparados relativos a esta área foram:

- Varreduras executadas ao longo da área, no sentido longitudinal e transversal e processadas a fim de que os arquivos resultantes apresentassem as coordenadas UTM (E, N, h) do primeiro e último retornos, além dos valores de intensidade.
- Levantamento topográfico plano-altimétrico de cerca de 2.350 pontos, utilizando estação total e partindo de pontos de controle determinados com GPS.

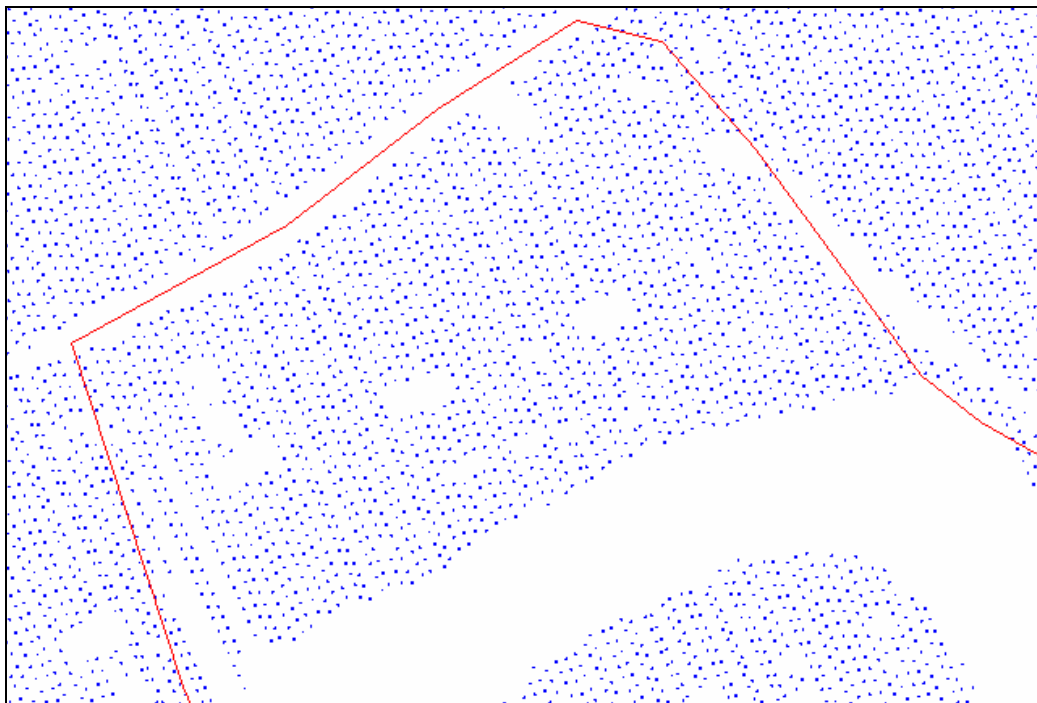
A figura 6.9 apresenta o conjunto de pontos levantados por topografia (CAD) enquanto a figura 6.10 apresenta a nuvem de pontos ALS (somente último pulso) processada para a área em questão.

FIGURA 6.9 - ÁREA DE CALIBRAÇÃO: PONTOS TOPOGRÁFICOS



FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2003)

FIGURA 6.10 - ÁREA DE CALIBRAÇÃO: PONTOS ALS



FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2003)

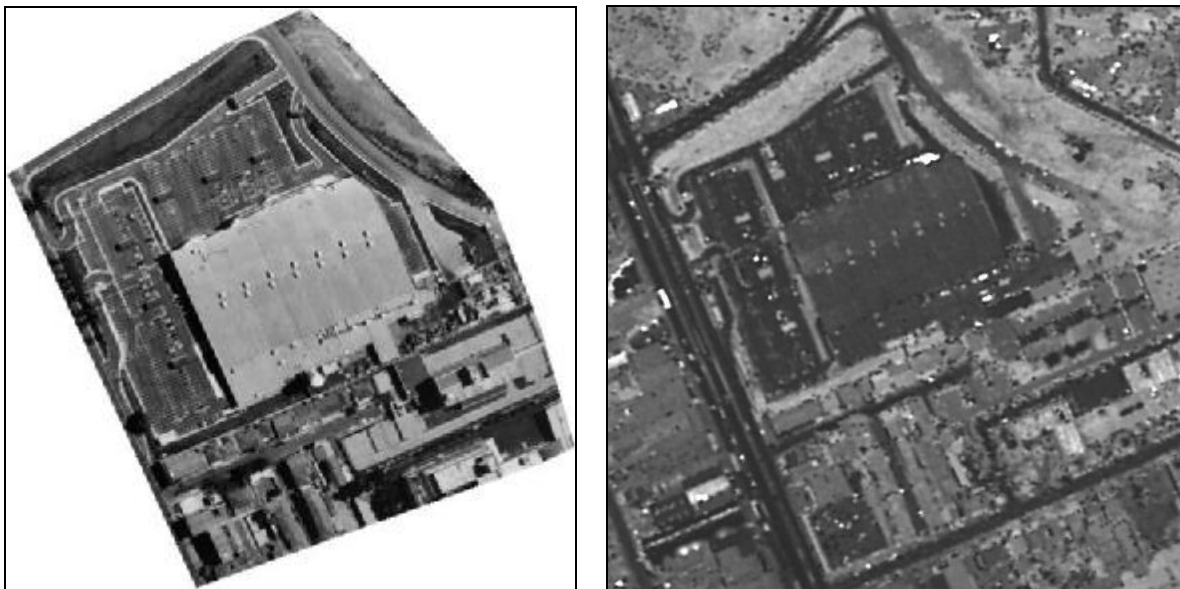
A comparação entre os conjuntos de pontos citados foi feita com base em pontos comuns provenientes do levantamento topográfico e do levantamento ALS, identificados sobre a imagem de intensidade (relativa ao último retorno) (figura 6.11). A tabela 6.1 apresenta um resumo dos parâmetros computados para os pontos amostrados e seus respectivos resultados.

TABELA 6.1 - ÁREA DE CALIBRAÇÃO: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE NUVENS DE PONTOS (ALS x TOPOGRAFIA)

| PARÂMETROS | DE (m) | DN (m) | Dh (m) |
|----------------------|--------|--------|--------|
| Máxima | 0,506 | 0,495 | 0,518 |
| Mínima | -0,490 | -0,457 | -0,235 |
| Média | 0,062 | 0,002 | 0,049 |
| Desvio Padrão | 0,222 | 0,175 | 0,130 |

NOTA: Foram amostrados e comparados 40 pontos.

FIGURA 6.11 - ÁREA DE CALIBRAÇÃO: ORTOFOTOGRAFIA x IMAGEM DE INTENSIDADE



FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2003)

A ortofotografia apresentada na figura 6.11 indica, em concordância com as informações apresentadas no Capítulo 5, que a superfície do terreno analisada é predominantemente plana, com baixa densidade da cobertura vegetal (apresentando apenas algumas árvores isoladas) e com baixa densidade de edificações (edificação principal e algumas edificações menores).

Por ser a área de estacionamento do referido supermercado, totalmente asfaltada e sinalizada (as vagas são pintadas sobre o asfalto), os pontos levantados por topografia foram facilmente identificados na imagem de intensidade gerada a partir do levantamento ALS. De cada ponto foram obtidas as coordenadas 3D (E, N e h), contidas num arquivo geral de pontos resultante do processamento deste último levantamento. Os valores das coordenadas dos pontos selecionados (ALS e não-ALS) foram armazenados em uma planilha e as estatísticas computadas utilizando o *software* Microsoft Excel 2002. Tais valores de coordenadas bem como os valores de todas as estatísticas computadas encontram-se disponíveis no Anexo I.

2) Comparação Nº 2: Bairro Água Verde

O bairro Água Verde, varrido ao longo de toda a avenida República Argentina, teve apenas parte dos resultados obtidos do processamento ALS, comparados em relação aos dados obtidos por restituição estereofotogramétrica. Assim, a superfície do terreno avaliada está compreendida pelas seguintes coordenadas (quadro 6.7).

QUADRO 6.7 - BAIRRO ÁGUA VERDE: LIMITES DA
ÁREA COMPARADA

| COORDENADA | E | N |
|------------|-------------|---------------|
| Mínima | 672.344,622 | 7.183.321,989 |
| Máxima | 673.169,363 | 7.184.250,350 |

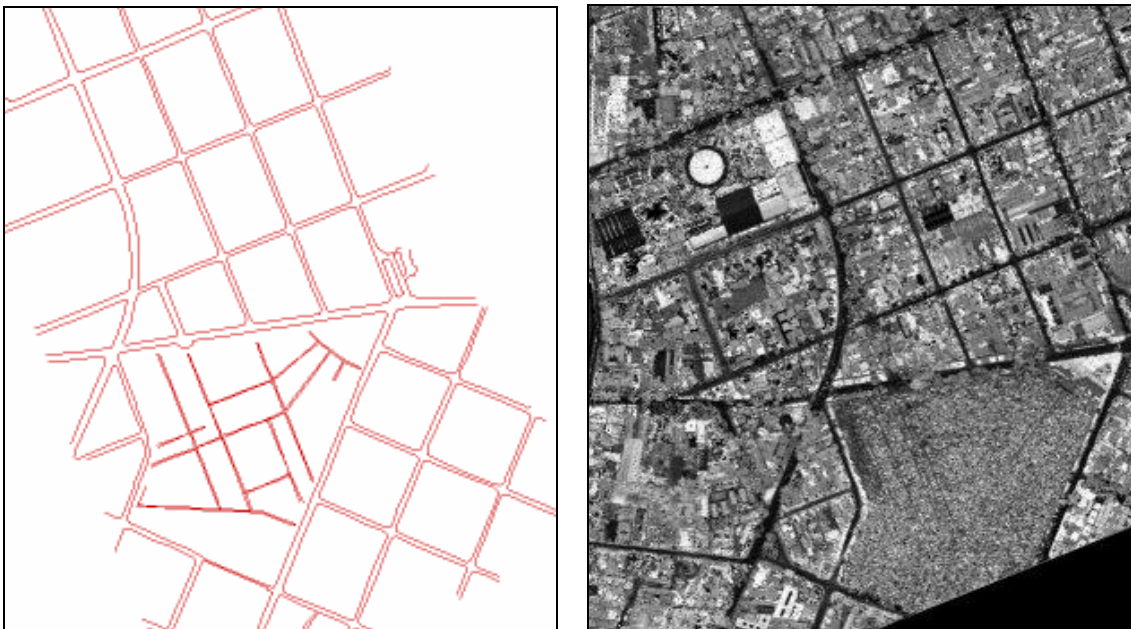
A comparação foi realizada com base em pontos comuns provenientes de restituição estereofotogramétrica (pontos definidores dos arruamentos restituídos tridimensionalmente) (figura 6.12) e do levantamento ALS (pontos identificados sobre imagem de intensidade relativa ao primeiro retorno) (figura 6.12). Desta comparação resultaram as estatísticas constantes da tabela 6.2.

TABELA 6.2 - BAIRRO ÁGUA VERDE: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE NUVENS DE PONTOS (ALS x RESTITUIÇÃO)

| PARÂMETROS | DE (m) | DN (m) | Dh (m) |
|----------------------|--------|--------|--------|
| Máxima | 1,100 | 0,790 | 0,540 |
| Mínima | -0,620 | -0,990 | -0,510 |
| Média | 0,102 | -0,071 | 0,053 |
| Desvio Padrão | 0,396 | 0,406 | 0,234 |

NOTA: Foram amostrados e comparados 40 pontos.

FIGURA 6.12 - ÁGUA VERDE: ESTEREO-RESTITUIÇÃO x IMAGEM DE INTENSIDADE



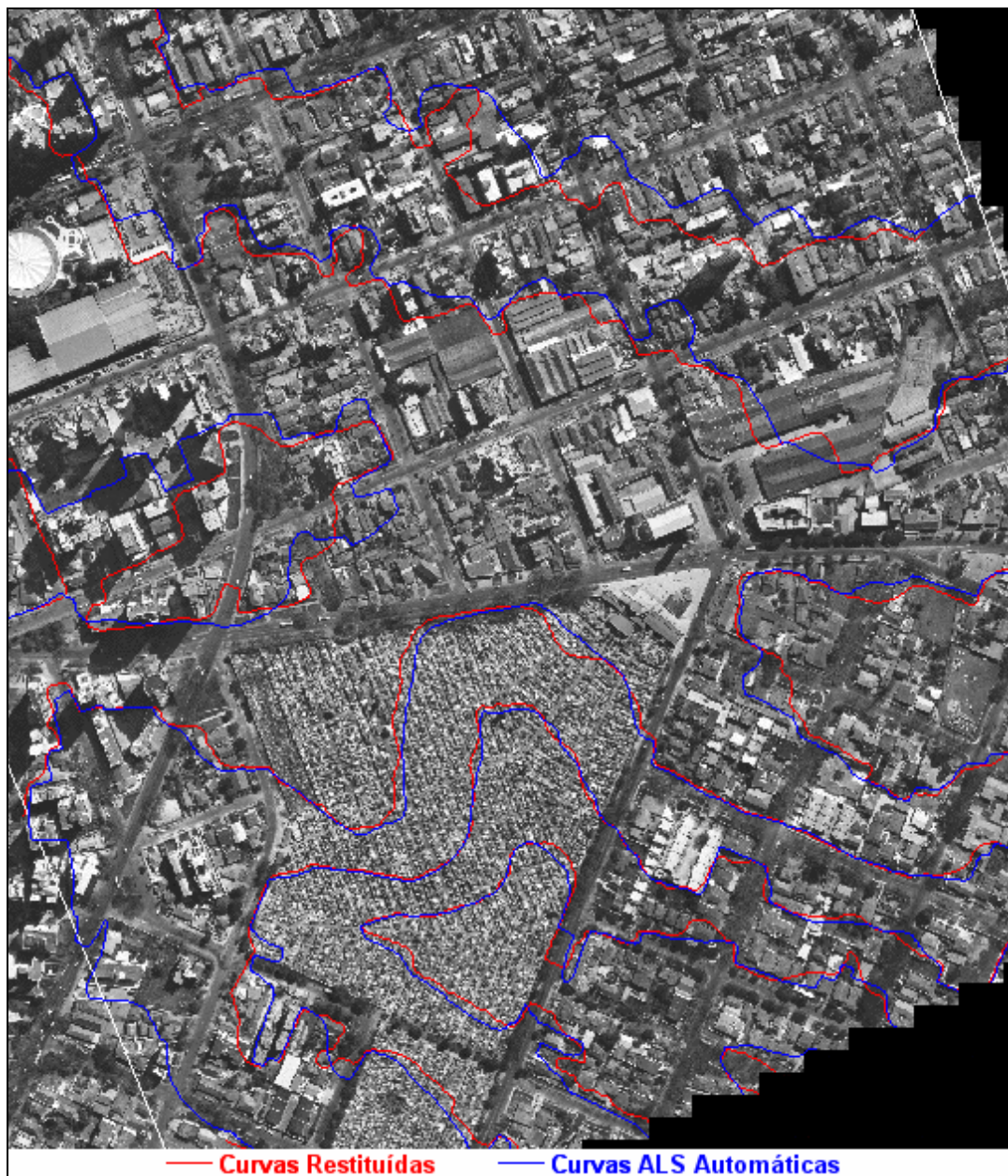
FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2003)

As informações contidas no Capítulo 5 acerca da referida área indicam relevo variando de plano a ondulado, com baixa densidade da cobertura vegetal (apresentando apenas árvores isoladas) e com alta densidade de edificações.

Desta mesma área foram disponibilizadas, ainda, as curvas de nível restituídas por estereofotogrametria e as curvas de nível geradas automaticamente a partir dos pontos ALS processados. Por serem processos de obtenção bastante distintos, optou-se por não realizar a comparação entre as referidas feições. Uma rápida inspeção visual, no entanto, permitiu verificar discrepâncias horizontais para

curvas mestras de mesma cota (900, 905, 910, 915 e 920), principalmente em áreas vegetadas e sombreadas da ortofotografia disponibilizada (figura 6.13).

FIGURA 6.13 - ÁGUA VERDE: CURVAS RESTITUÍDAS x CURVAS ALS AUTOMÁTICAS



FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2003)

Da mesma forma que para a comparação do item anterior, os valores das coordenadas dos pontos selecionados (ALS e não-ALS) foram armazenados em uma planilha e as estatísticas computadas utilizando o *software* Microsoft Excel 2002. Tais valores de coordenadas bem como os valores de todas as estatísticas

computadas encontram-se disponíveis no Anexo J.

3) Comparação Nº 3: BR-116

Como apresentado no Capítulo 5, a BR-116, no trecho compreendido entre o trevo do Atuba e a rua Salgado Filho, encontra-se totalmente dentro do município de Curitiba (cortando-o de norte a sul) e, portanto, foi caracterizada como área urbana. Em função da extensão do projeto (10 km), optou-se por realizar as comparações sobre o trecho de aproximadamente 1,3 km compreendido pela ortofotografia digital delimitada pelas coordenadas apresentadas no quadro 6.8.

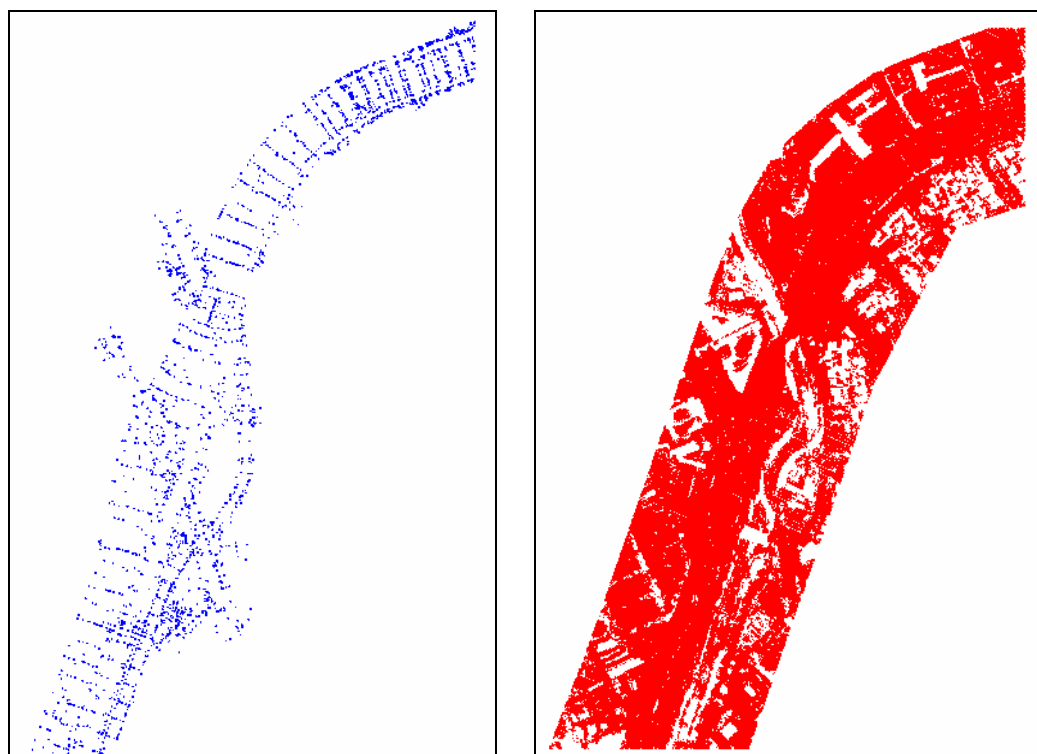
QUADRO 6.8 - BR-116: LIMITES DA ÁREA COMPARADA

| COORDENADA | E | N |
|------------|-------------|---------------|
| Mínima | 174.621,084 | 2.182.749,625 |
| Máxima | 175.363,903 | 2.183.826,853 |

Desta área foram disponibilizados, além da referida ortofotografia digital, os conjuntos de pontos levantados por topografia (resultantes de nivelamento e cadastro), ambos armazenados em arquivo padrão AutoCAD. Para a comparação foram selecionados, da nuvem geral de pontos proveniente do processamento do levantamento ALS, apenas aqueles pontos compreendidos pelos limites acima especificados. Assim, de um conjunto de cerca de 3,7 milhões de pontos foram selecionados cerca de 205 mil. Uma vez que o arquivo geral de pontos ALS ocupa cerca de 110 Mb de memória em disco, o mesmo teve que ser dividido (utilizando o Microsoft Bloco de Notas 5.1) em arquivos menores (de \approx 27,3 Mb), a fim de que pudesse ser utilizado por outros programas. Estes mesmos arquivos foram posteriormente importados, classificados, selecionados e exportados utilizando o Microsoft Access 2002. Ainda numa etapa posterior, os arquivos resultantes da exportação (em formato de texto) tiveram que ser transformados para o formato

DWG (próprio do AutoCAD), utilizando um *software* desenvolvido pela empresa que realizou o levantamento e o processamento dos pontos ALS originais. Desta forma, o arquivo DWG contendo os pontos ALS processados pode ser incorporado ao arquivo DWG contendo os pontos levantados por topografia e a comparação pode ser realizada (figura 6.14). A identificação dos pontos comuns foi feita utilizando a ortofotografia digital e a imagem de intensidade (relativa ao primeiro retorno) da área em questão.

FIGURA 6.14 - BR-116: PONTOS DE NIVELAMENTO x PONTOS ALS



FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2003)

Da mesma forma que para as comparações anteriores, os pontos comuns selecionados foram armazenados em uma planilha e as estatísticas computadas utilizando o Microsoft Excel 2002. A tabela 6.3 apresenta tais estatísticas, relativamente aos pontos amostrados e comparados. Os valores das coordenadas de tais pontos bem como os valores de todas as estatísticas computadas encontram-se no Anexo K.

TABELA 6.3 - BR-116: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE NUVENS DE PONTOS (ALS x TOPOGRAFIA)

| PARÂMETROS | DE (m) | DN (m) | Dh (m) |
|----------------------|--------|--------|--------|
| Máxima | 0,641 | 0,529 | 0,312 |
| Mínima | -0,415 | -0,782 | -0,572 |
| Média | 0,044 | -0,062 | -0,065 |
| Desvio Padrão | 0,247 | 0,334 | 0,206 |

NOTA: Foram amostrados e comparados 40 pontos.

4) Comparação № 4: Folhas 19 e 20 - OSBRA/PETROBRAS

Em relação ao Projeto PETROBRAS, trecho Replan-Brasília (OSBRA), foi selecionada a área compreendida pelas folhas 19 e 20 e cujos limites estão apresentados a seguir (quadro 6.9).

QUADRO 6.9 - OSBRA: LIMITES DA ÁREA COMPARADA

| COORDENADA | E | N |
|---------------|-------------|---------------|
| Mínima | 278.712,150 | 7.503.132,280 |
| Máxima | 279.412,440 | 7.503.787,610 |

As referidas folhas caracterizam-se por apresentarem relevo variando de ondulado suave a ondulado forte, com densidade da cobertura vegetal variando de baixa (áreas cultivadas ou preparadas para cultivo) a alta (áreas de mata nativa), além da presença de algumas edificações. A partir dos pontos ALS processados, curvas de nível foram geradas automaticamente e comparadas às curvas de nível geradas por restituição estereofotogramétrica (figura 6.15). Desta comparação não resultaram estatísticas, sendo a mesma realizada somente no âmbito visual, uma vez que as características da área em questão não permitiram a identificação precisa de pontos que pudessem ser comparados. Assim, a partir das curvas de nível geradas por restituição estereofotogramétrica e dos pontos laser processados (somente os relativos à superfície nua do terreno), foram geradas grades regulares

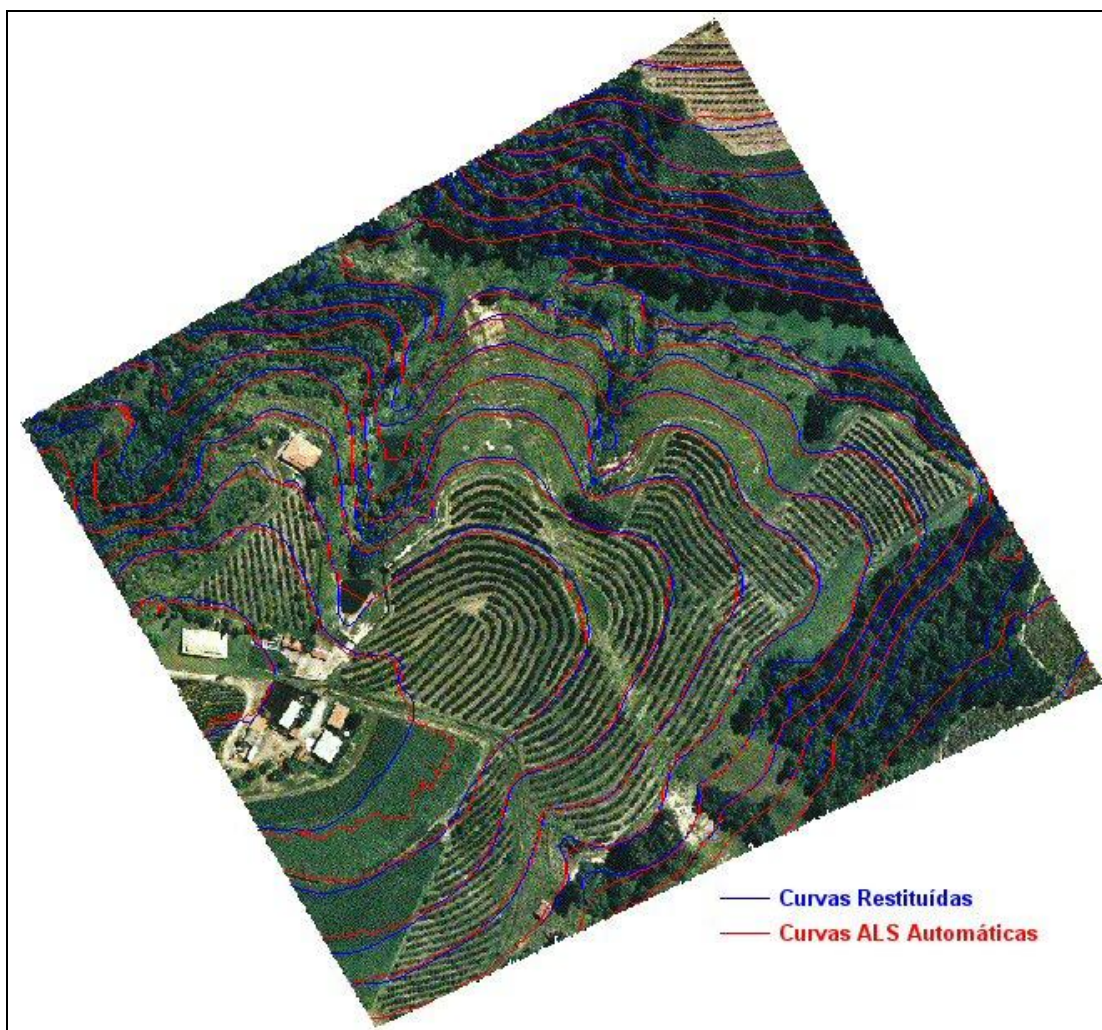
de pontos, com o mesmo espaçamento. Desta forma, os pontos definidores das grades, no plano horizontal, puderam ser tomados como pontos comuns e suas respectivas cotas puderam ser automaticamente comparadas, resultando nas estatísticas apresentadas na tabela 6.4.

TABELA 6.4 - OSBRA: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE GRADES REGULARES

| PARÂMETROS | DE (m) | DN (m) | Dh (m) |
|---------------|--------|--------|--------|
| Máxima | 0,000 | 0,000 | 1,050 |
| Mínima | 0,000 | 0,000 | -1,240 |
| Média | 0,000 | 0,000 | 0,177 |
| Desvio Padrão | 0,000 | 0,000 | 0,221 |

NOTA: Foram comparados 19.813 pontos.

FIGURA 6.15 - OSBRA: CURVAS RESTITUÍDAS x CURVAS ALS AUTOMÁTICAS



FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2003)

Ressalta-se, mais uma vez, que para a geração automática de curvas de nível, bem como, para a geração e comparação automática entre grades 3D (modelos de superfície), é necessário utilizar *softwares* específicos. Neste caso utilizou-se, para a geração automática das curvas de nível e para a geração e comparação entre as grades 3D, o *software* SOCET SET® versão 4.4.0 (distribuído pela LH Systems), de propriedade da empresa que realizou as varreduras.

No Anexo L encontra-se parte (primeira e última página) da planilha utilizada para armazenar os pontos comparados e computar as estatísticas apresentadas acima. O *software* utilizado, mais uma vez, foi o Microsoft Excel 2002.

5) Comparação Nº 5: SC-414

No que diz respeito ao levantamento ALS realizado na SC-414 (trecho de 21,8 km entre Luís Alves e Belchior), foram comparados os pontos ALS coletados e processados compreendidos pela folha cujos limites encontram-se apresentados a seguir (quadro 6.10). Tal folha compreende cerca de 4,2 km daquele mesmo trecho.

QUADRO 6.10 - SC-414: LIMITES DA ÁREA COMPARADA

| COORDENADA | E | N |
|------------|-------------|---------------|
| Mínima | 200.869,283 | 2.037.672,734 |
| Máxima | 203.187,013 | 2.041.202,843 |

Como explicitado no Capítulo 5 do presente trabalho de pesquisa, a superfície do terreno compreendida pela SC-414 e varrida pelo laser aerotransportado é predominantemente rural. No que diz respeito à área delimitada pela folha em questão, o relevo se apresenta variando de ondulado suave a ondulado forte, com densidade da cobertura vegetal variando de média a alta e sem a presença de edificações.

O procedimento adotado para a comparação entre os pontos ALS processados e os pontos obtidos por topografia, resultantes de nivelamento e cadastro, foi similar ao já descrito no item 6.2.3, relativamente aos arquivos utilizados. Assim, de um total de 1,02 milhões de pontos ALS (coletados ao longo de todo o trecho) foram selecionados cerca de 240 mil (compreendidos pela referida folha). Uma vez selecionados e transformados para o formato DWG, estes mesmos pontos foram incorporados ao arquivo dos pontos obtidos por levantamento de campo, já mencionado. A verificação da existência de pontos comuns, no entanto, não pode ser feita com base em imagens, pois não havia imagens disponíveis para o trecho em questão. Assim, a amostragem dos pontos ALS processados foi realizada utilizando o seguinte critério: um “ponto comum” é definido como aquele cujas diferenças entre as coordenadas planas UTM, para as nuvens consideradas (no caso, pontos ALS e pontos de campo), não ultrapassam a acurácia horizontal especificada pelo fabricante do sistema ALS cujos resultados estão sendo avaliados. Em outras palavras, pontos ALS foram considerados “comuns” a pontos de campo, desde que a distância entre eles fosse inferior a $1/2000$ da altura de vôo. Ressalta-se, no entanto, que este é o critério adotado, pelo método em proposição, para a comparação de nuvens cujos pontos não puderam ser identificados sobre ortofotografia (gerada por fotogrametria) e/ou sobre imagem de intensidade (gerada por varredura laser).

Do conjunto de 240 mil pontos mencionado acima foram amostrados 40 pontos e verificadas suas coordenadas (XYZ) em relação aos respectivos pontos levantados em campo (figura 6.16). Os resultados obtidos da comparação constam da tabela 6.5, apresentada a seguir.

TABELA 6.5 - SC-414: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE NUVENS DE PONTOS (ALS x TOPOGRAFIA)

| PARÂMETROS | DE (m) | DN (m) | Dh (m) |
|----------------------|--------|--------|--------|
| Máxima | 0,320 | 0,350 | 0,290 |
| Mínima | -0,350 | -0,450 | -0,500 |
| Média | -0,022 | -0,035 | -0,099 |
| Desvio Padrão | 0,183 | 0,220 | 0,152 |

NOTA: Foram amostrados e comparados 40 pontos.

Pontos ALS e pontos de campo foram considerados comuns para distâncias inferiores a 0,5 m.

FIGURA 6.16 - SC-414: PONTOS DE NIVELAMENTO x PONTOS ALS



FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2003)

Uma vez que da área em questão também foram disponibilizados os pontos cotados obtidos por restituição estereofotogramétrica, optou-se por realizar uma comparação entre a nuvem de pontos ALS selecionada e a nuvem de pontos cotados restituídos. Também neste caso a amostragem dos pontos comuns se deu sob o critério acima estabelecido. Os resultados obtidos desta comparação estão apresentados na tabela 6.6.

TABELA 6.6 - SC-414: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE NUVENS DE PONTOS (ALS x RESTITUIÇÃO)

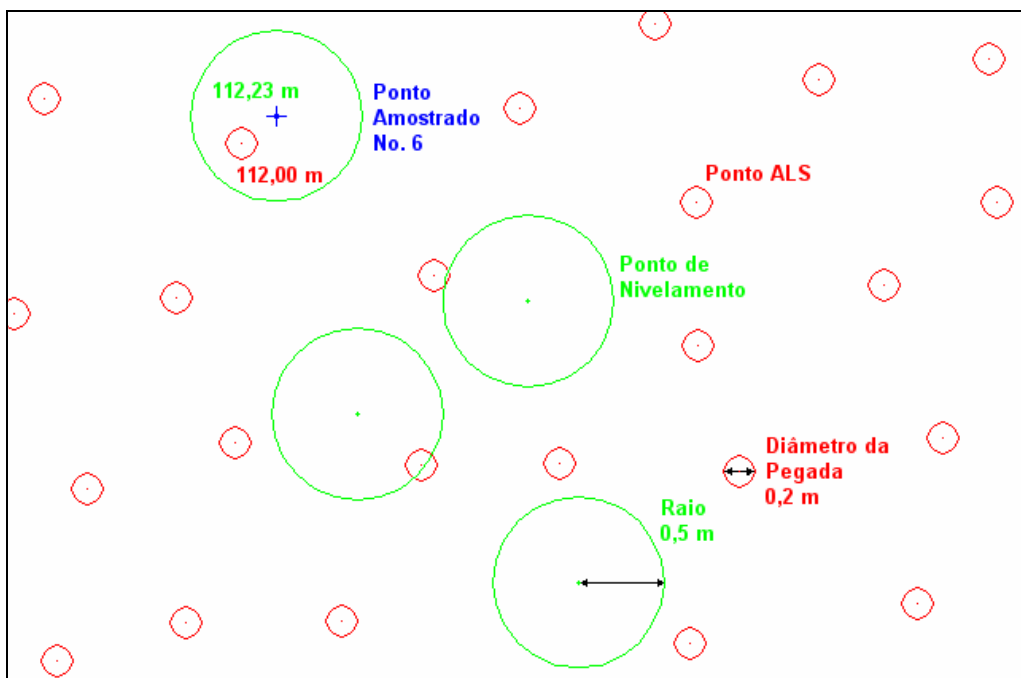
| PARÂMETROS | DE (m) | DN (m) | Dh (m) |
|---------------|--------|--------|--------|
| Máxima | 0,489 | 0,456 | 0,272 |
| Mínima | -0,437 | -0,437 | -0,508 |
| Média | 0,096 | 0,072 | -0,067 |
| Desvio Padrão | 0,251 | 0,239 | 0,222 |

NOTA: Foram amostrados e comparados 40 pontos.

Pontos ALS e pontos cotados foram considerados comuns para distâncias inferiores a 0,5 m.

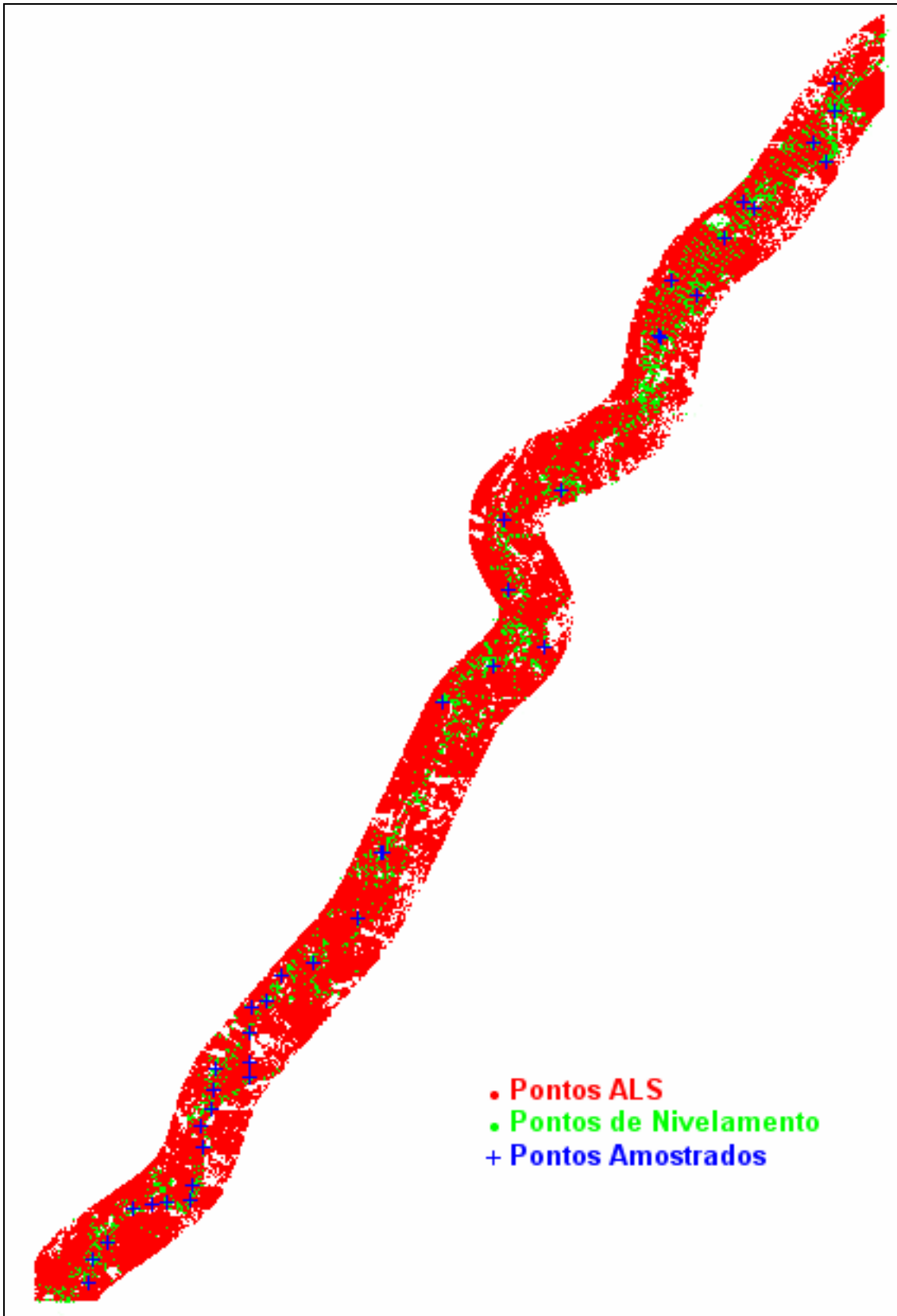
Relativamente ao critério do “ponto comum” mencionado, para a SC-414 o valor do raio do círculo (no interior do qual devem ser amostrados pontos ALS considerados comuns aos pontos obtidos por nivelamento) foi calculado com base na altura de vôo programada para a varredura (1.000 m), resultando, portanto, em meio metro (0,5 m). A figura 6.17 apresenta, em detalhes, o critério empregado para a amostragem dos pontos, enquanto a figura 6.18 apresenta os pontos amostrados (40) e sua distribuição ao longo da área varrida considerada.

FIGURA 6.17 - SC-414: CRITÉRIO DO “PONTO COMUM”



FONTE: Criada com base em arquivos de pontos fornecidos pela ESTEIO S.A. (2003)

FIGURA 6.18 - SC-414: DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS AMOSTRADOS



FONTE: Criada com base em arquivos de pontos fornecidos pela ESTEIO S.A. (2003)

Da mesma forma que para as comparações anteriores, as planilhas contendo os valores de coordenadas de cada ponto amostrado, bem como, os valores de todas as estatísticas computadas, encontram-se no Anexo M.

6) Comparação Nº 6: SC-471

As características dos levantamentos executados na SC-471, trecho entre Romelândia e Anchieta, são bastante similares às dos levantamentos executados na SC-414. Assim, da SC-471, cujo projeto de varredura compreende uma extensão de 20,4 km, foram testados os pontos levantados (por varredura laser e por topografia) compreendidos pela folha cujos limites estão apresentadas a seguir (quadro 6.11). O trecho analisado tem, portanto, aproximadamente 2,2 km de extensão.

QUADRO 6.11 - SC-471: LIMITES DA ÁREA COMPARADA

| COORDENADA | E | N |
|-------------------|-------------|---------------|
| Mínima | 191.538,750 | 2.047.320,040 |
| Máxima | 192.987,850 | 2.049.471,040 |

Relativamente à superfície do terreno, a referida folha apresenta relevo variando de ondulado suave a ondulado forte; densidade da cobertura vegetal variando de baixa a média; e baixa densidade de edificações (pois parte da folha compreende algumas ruas, quadras e lotes da cidade de Romelândia).

Da mesma forma, os testes realizados compreenderam a seleção de cerca de 310 mil pontos ALS (de um total de 3,2 milhões) que, transformados para o formato DWG puderam ser incorporados ao arquivo de pontos levantados por topografia (nivelamento e cadastro). Uma vez verificada a existência de pontos comuns a ambas as nuvens de pontos (segundo o critério estabelecido anteriormente), foram amostrados 40 pontos cujas coordenadas (XYZ) foram comparadas e cujos resultados obtidos são os apresentados na tabela 6.7.

TABELA 6.7 - SC-471: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO
ENTRE NUVENS DE PONTOS
(ALS x TOPOGRAFIA)

| PARÂMETROS | DE (m) | DN (m) | Dh (m) |
|----------------------|--------|--------|--------|
| Máxima | 0,430 | 0,420 | 0,590 |
| Mínima | -0,410 | -0,370 | -0,390 |
| Média | 0,004 | 0,031 | 0,107 |
| Desvio Padrão | 0,184 | 0,186 | 0,201 |

NOTA: Foram amostrados e comparados 40 pontos.

Pontos ALS e pontos de campo foram considerados comuns para distâncias inferiores a 0,5 m.

Da área em questão foi ainda disponibilizada a nuvem de pontos cotados obtidos por restituição estereofotogramétrica. Da mesma forma que para a comparação efetuada na SC-414 (item anterior), procedeu-se a comparação entre a nuvem de pontos cotados restituídos e a nuvem de pontos ALS selecionada. O critério utilizado foi o mesmo já empregado anteriormente, ou seja, foram amostrados 40 “pontos comuns”, cuja distribuição está apresentada na figura 6.19. Da referida comparação resultaram as estatísticas constantes da tabela 6.8.

TABELA 6.8 - SC-471: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO
ENTRE NUVENS DE PONTOS
(ALS x RESTITUIÇÃO)

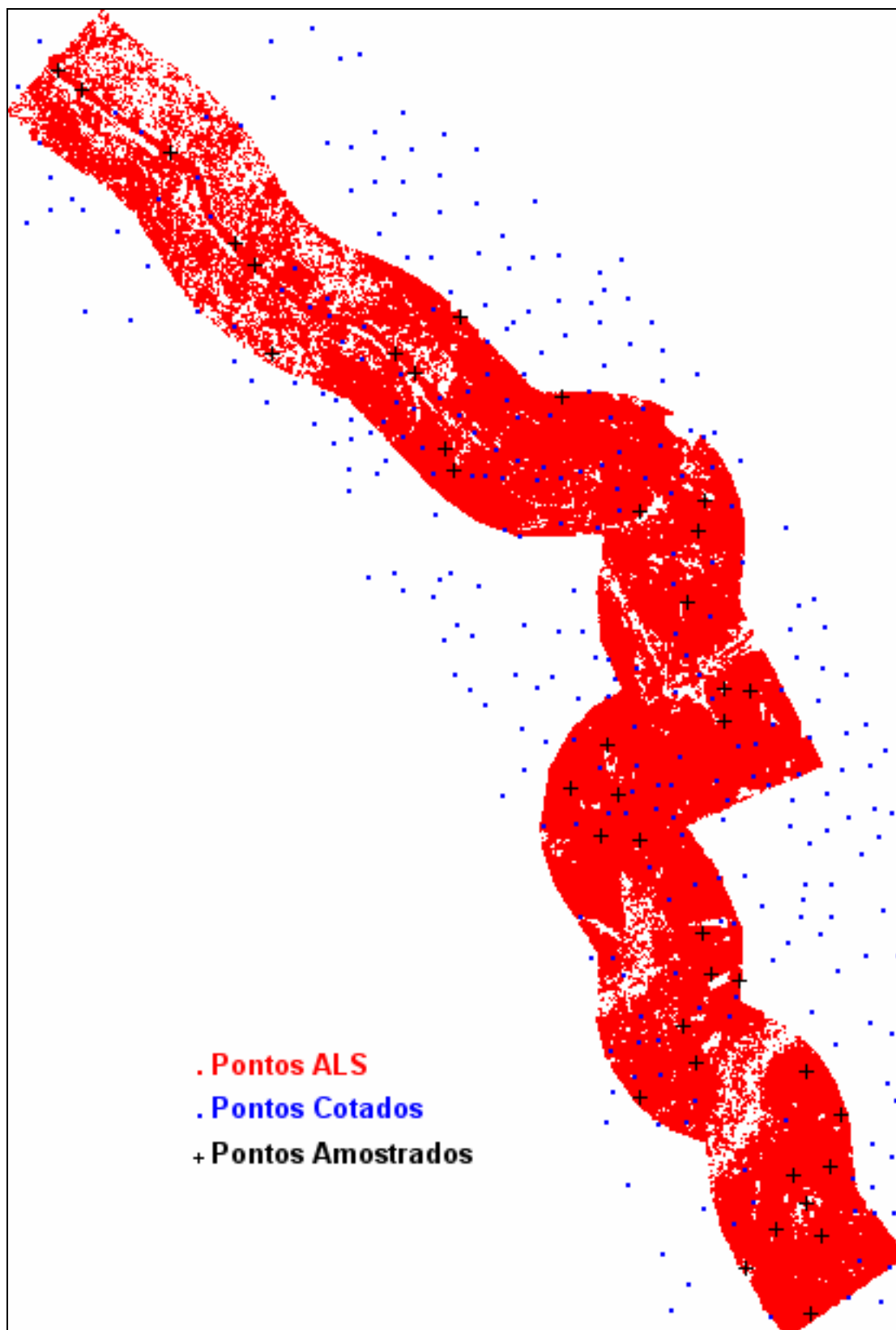
| PARÂMETROS | DE (m) | DN (m) | Dh (m) |
|----------------------|--------|--------|--------|
| Máxima | 0,420 | 0,290 | 0,549 |
| Mínima | -0,420 | -0,460 | -0,515 |
| Média | 0,002 | -0,073 | 0,049 |
| Desvio Padrão | 0,269 | 0,219 | 0,274 |

NOTA: Foram amostrados e comparados 40 pontos.

Pontos ALS e pontos cotados foram considerados comuns para distâncias inferiores a 0,5 m.

Os valores das coordenadas dos pontos amostrados bem como os valores de todas as estatísticas computadas podem ser encontrados no Anexo N.

FIGURA 6.19 - SC-471: DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS AMOSTRADOS



FONTE: Criada com base em arquivos de pontos fornecidos pela ESTEIO S.A. (2003)

7) Comparação № 7: SP-270

A rodovia SP-270, entre Assis e Presidente Prudente, tem uma extensão de 20 km que foram levantados pela técnica ALS e também por topografia convencional. Do trecho em questão foram disponibilizados os arquivos de pontos ALS processados, totalizando cerca de 2,2 milhões de pontos. Destes foram selecionados cerca de 530 mil, compreendidos pela folha cujos limites estão apresentados a seguir (quadro 6.12). Tal folha compreende cerca de 6,8 km do referido trecho.

QUADRO 6.12 - SP-270: LIMITES DA ÁREA COMPARADA

| COORDENADA | E | N |
|---------------|-------------|---------------|
| Mínima | 200.446,606 | 2.497.377,471 |
| Máxima | 205.724,637 | 2.501.798,173 |

A superfície do terreno, relativamente à área selecionada para análise, apresenta relevo variando de plano a ondulado, com densidade da cobertura vegetal baixa (predominantemente de cultura temporária) e com a presença de algumas edificações (ao longo da rodovia).

Assim como para as comparações anteriores, realizadas sobre conjuntos de pontos provenientes do levantamento de estradas, o conjunto de pontos ALS processado relativo à área delimitada acima foi transformado para o formato DWG e posteriormente incorporado ao conjunto de pontos levantados por topografia (nivelamento). Deste conjunto geral de pontos foram identificados e amostrados 40 pontos comuns e realizadas as comparações. As coordenadas 3D dos pontos amostrados foram armazenadas em uma planilha do Microsoft Excel 2002 e resultaram nas estatísticas apresentadas na tabela 6.9.

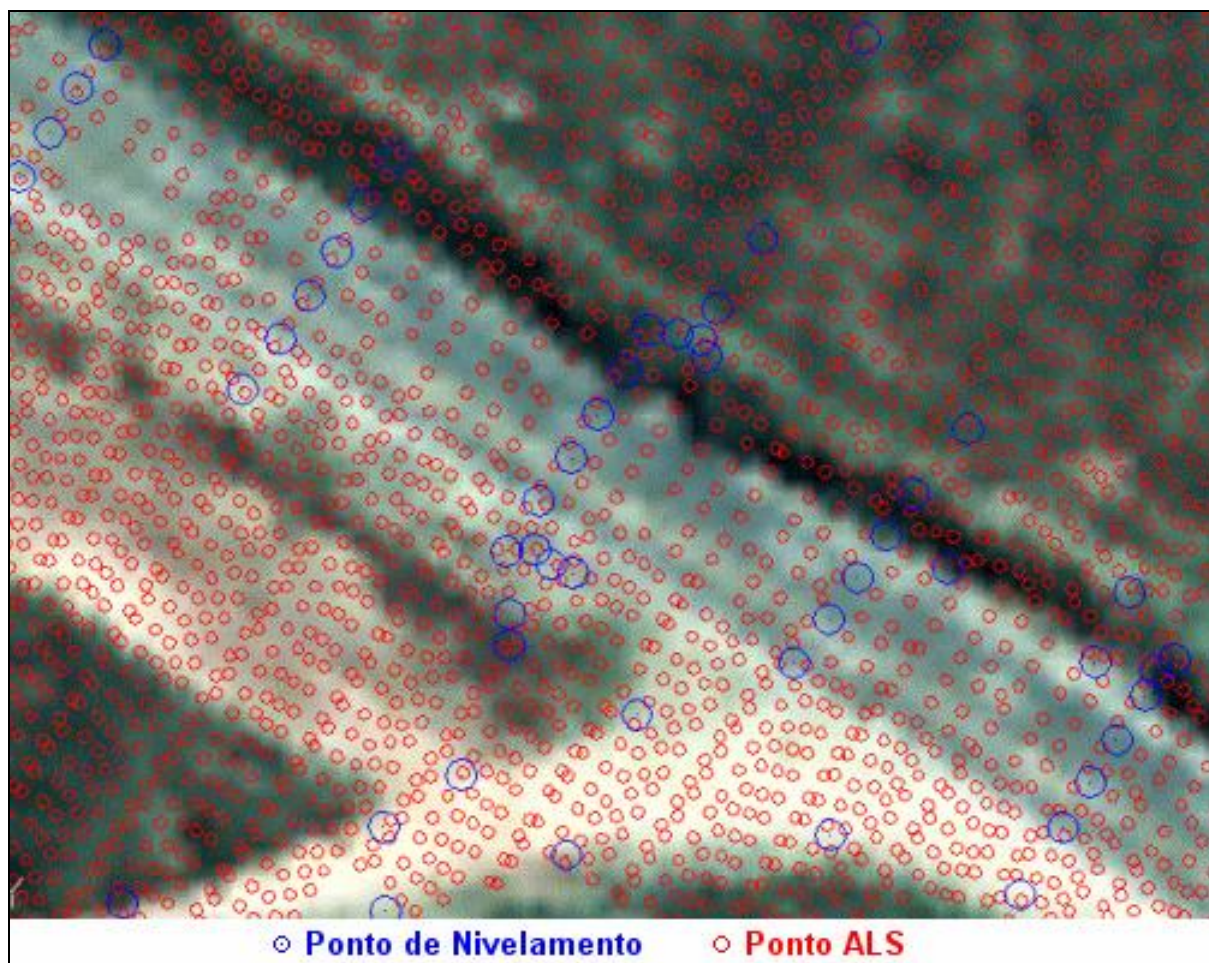
TABELA 6.9 - SP-270: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE NUVENS DE PONTOS (ALS x TOPOGRAFIA)

| PARÂMETROS | DE (m) | DN (m) | Dh (m) |
|----------------------|--------|--------|--------|
| Máxima | 0,302 | 0,353 | 0,136 |
| Mínima | -0,295 | -0,271 | -0,333 |
| Média | -0,026 | -0,018 | -0,153 |
| Desvio Padrão | 0,157 | 0,167 | 0,095 |

NOTA: Foram amostrados e comparados 40 pontos.

Pontos ALS e pontos de campo foram considerados comuns para distâncias inferiores a 0,4 m.

FIGURA 6.20 - SP-270: PONTOS DE NIVELAMENTO E PONTOS ALS SOBRE ORTOFOTOGRAFIA



FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2003)

Ressalta-se que apesar de terem sido disponibilizadas a ortofotografia digital e a imagem de intensidade da área em questão, não foi possível identificar os pontos de nivelamento sobre estas imagens, uma vez que os mesmos não consistiam pontos bem definidos sobre a superfície do terreno, mas apenas pontos

quaisquer levantados sobre a rodovia e nivelados com o propósito de gerar curvas de nível automaticamente (figura 6.20). Por esta razão o critério adotado para as comparações № 5 (SC-414) e № 6 (SC-471) foi também empregado para esta comparação. No Anexo O pode ser encontrada a planilha com as coordenadas dos pontos amostrados, bem como, as estatísticas computadas.

Realizadas as comparações, procede-se a avaliação e, conseqüentemente, a análise dos resultados encontrados. Na seqüência, portanto, serão apresentados os indicadores de qualidade utilizados na avaliação dos resultados de cada conjunto de pontos ALS comparado, bem como, serão feitas algumas considerações quanto aos resultados obtidos das comparações, em relação ao PEC. Assim, num primeiro passo, serão definidos os indicadores de qualidade que foram utilizados na avaliação dos resultados obtidos de cada comparação. Tais indicadores, baseados no que determina o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), são o PEC planimétrico, o PEC altimétrico e seus respectivos erros-padrão.

Como explicitado anteriormente no Capítulo 3, o PEC é um indicador estatístico de dispersão que define a exatidão (acurácia) dos trabalhos cartográficos produzidos no território nacional. Embora tenha sido estabelecido em 1984 (Decreto № 89.817), quando tais trabalhos cartográficos eram elaborados manualmente e apresentados em mídias analógicas, o PEC ainda é utilizado, atualmente, como indicador da qualidade de trabalhos cartográficos, mesmo que estes sejam elaborados por processos automatizados ou automáticos, com pouca ou nenhuma intervenção humana, e sendo armazenados e apresentados em meio digital. É necessário ressaltar, no entanto, que a utilização do PEC como indicador da qualidade de um produto cartográfico se dá, não porque o mesmo seja o instrumento

mais apropriado para isso, mas, principalmente, porque é o único instrumento legalmente disponível.

Assim, no que diz respeito à utilização do PEC como indicador da qualidade de produtos cartográficos, a tabela 6.10 apresenta os valores correspondentes ao PEC planimétrico e altimétrico e respectivos erros-padrão, em função da escala e da eqüidistância das curvas de nível, para os projetos anteriormente apresentados e cujas áreas delimitadas foram objeto desta pesquisa. Na seqüência também é apresentada outra tabela (6.11) contendo um resumo das estatísticas computadas para as áreas comparadas e cujos valores serão utilizados na avaliação dos levantamentos ALS executados, em função do PEC estabelecido.

TABELA 6.10 - VALORES DO PEC PARA AS ÁREAS COMPARADAS

| PROJETO | ESCALA | EV | PEC PLANIMÉTRICO | | | ERRO PADRÃO | | | PEC ALTIMÉTRICO | | | ERRO PADRÃO | | |
|-----------|--------|----|------------------|-------|------|-------------|------|------|-----------------|------|------|-------------|------|------|
| | | | A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B | C |
| | | | Água Verde | 2.000 | 1 | 1,00 | 1,60 | 2,00 | 0,60 | 1,00 | 1,20 | 0,50 | 0,60 | 0,75 |
| BR-116 | 2.000 | 1 | 1,00 | 1,60 | 2,00 | 0,60 | 1,00 | 1,20 | 0,50 | 0,60 | 0,75 | 0,33 | 0,40 | 0,50 |
| Carrefour | 2.000 | 1 | 1,00 | 1,60 | 2,00 | 0,60 | 1,00 | 1,20 | 0,50 | 0,60 | 0,75 | 0,33 | 0,40 | 0,50 |
| OSBRA | 2.000 | 1 | 1,00 | 1,60 | 2,00 | 0,60 | 1,00 | 1,20 | 0,50 | 0,60 | 0,75 | 0,33 | 0,40 | 0,50 |
| SC-414 | 5.000 | 5 | 2,50 | 4,00 | 5,00 | 1,50 | 2,50 | 3,00 | 2,50 | 3,00 | 3,75 | 1,67 | 2,00 | 2,50 |
| SC-471 | 5.000 | 5 | 2,50 | 4,00 | 5,00 | 1,50 | 2,50 | 3,00 | 2,50 | 3,00 | 3,75 | 1,67 | 2,00 | 2,50 |
| SP-270 | 1.000 | 1 | 0,50 | 0,80 | 1,00 | 0,30 | 0,50 | 0,60 | 0,50 | 0,60 | 0,75 | 0,33 | 0,40 | 0,50 |

NOTA: A Equidistância Vertical (EV) bem como os valores do PEC e Erro Padrão (para as Classes A, B e C) estão em metros.

TABELA 6.11 - VALORES COMPUTADOS PARA O ERRO PADRÃO EM FUNÇÃO DOS PONTOS AMOSTRADOS

| PROJETO | ESCALA | EV | PONTOS AMOSTRADOS | | | EP | | | Nº DE PONTOS QUE ATENDEM AO PEC P | | | Nº DE PONTOS QUE ATENDEM AO PECA | | |
|-----------|--------|----|-------------------|-------|-------|-------|-------|----|-----------------------------------|-------|----|----------------------------------|-------|-------|
| | | | P | A | 90 % | P | A | | A | B | C | A | B | C |
| | | | Água Verde | 2.000 | 1 | 40 | 40 | 36 | 0,251 | 0,234 | | 37 | 40 | 40 |
| BR-116 | 2.000 | 1 | 40 | 40 | 36 | 0,198 | 0,206 | | 40 | 40 | 40 | 39 | 40 | 40 |
| Carrefour | 2.000 | 1 | 40 | 40 | 36 | 0,142 | 0,130 | | 40 | 40 | 40 | 39 | 40 | 40 |
| OSBRA | 2.000 | 1 | 19813 | 19813 | 17832 | - | 0,221 | | - | - | - | 18039 | 18782 | 19573 |
| SC-414 | 5.000 | 5 | 40 | 40 | 36 | 0,104 | 0,152 | | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| SC-471 | 5.000 | 5 | 40 | 40 | 36 | 0,136 | 0,222 | | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| SP-270 | 1.000 | 1 | 40 | 40 | 36 | 0,117 | 0,201 | | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | | | 40 | 40 | 36 | 0,109 | 0,274 | | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | | | 40 | 40 | 36 | 0,093 | 0,095 | | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |

NOTA: Sinais convencionais utilizados: (P) Planimetria ou Planimétrico; (A) Altimetria ou Altimétrico.

(EP) Erro Padrão; (EV) Equidistância Vertical.

A Equidistância Vertical bem como os valores do PEC e Erro Padrão (para as Classes A, B e C) estão em metros.

É importante ressaltar que, para as tabelas anteriormente apresentadas neste capítulo (6.1 a 6.9), o desvio padrão dos pontos amostrados foi computado para as abscissas (E) e ordenadas (N), separadamente. A avaliação em relação ao PEC, no entanto, exige que o desvio padrão seja computado considerando abscissas e ordenadas como coordenadas planas horizontais, ou seja, como um círculo cujo raio representa o erro médio dos pontos comparados. Desta forma, para a tabela 6.11 da página anterior, os valores do erro padrão (ou seja, do desvio padrão) para os conjuntos de pontos amostrados, foram computados em relação às coordenadas planas UTM e também em relação às altitudes.

No que diz respeito à quantidade de pontos amostrados ressalta-se que a mesma foi definida em função das quantidades de pontos disponibilizados para as comparações (considerando cada projeto como um todo), bem como, das quantidades de pontos efetivamente utilizados (considerando a área delimitada para comparação, em cada projeto). A tabela 6.12 apresenta, portanto, as quantidades de pontos disponibilizados e os efetivamente utilizados, por projeto e por tipo de levantamento.

TABELA 6.12 - QUANTIDADE DE PONTOS DISPONIBILIZADOS E UTILIZADOS

| PROJETO | PONTOS ALS | | PONTOS DE CAMPO | | PONTOS RESTITUÍDOS | |
|------------|------------|----------------|-----------------|----------------|--------------------|----------------|
| | Total | Área Comparada | Total | Área Comparada | Total | Área Comparada |
| Água Verde | 1.883.984 | 622.044 | - | - | 1.400 | 1.040 |
| BR-116 | 3.713.019 | 204.983 | 36.319 | 9.153 | - | - |
| Carrefour | 328.611 | 177.807 | 4.730 | 4.730 | - | - |
| OSBRA | 162.780 | 19.813 | - | - | 162.780 | 19.813 |
| SC-414 | 1.015.657 | 242.321 | 11.693 | 3.560 | 4.763 | 632 |
| SC-471 | 3.175.911 | 309.235 | 4.288 | 621 | 6.388 | 716 |
| SP-270 | 2.157.701 | 532.174 | 8.507 | 4.798 | - | - |

Em conformidade com o apresentado anteriormente nas tabelas 6.1 a 6.9, e também na tabela 6.11, o número de pontos amostrados para cada conjunto ou

nuvem disponibilizada foi 40 (quarenta), exceto para o conjunto relativo às folhas 19 e 20 do OSBRA/PETROBRAS, onde o tamanho da amostra foi de 19.813 pontos em função da grade regular gerada automaticamente.

Para SPIEGEL (1993), populações infinitas ou muito grandes (como é o caso dos conjuntos de pontos obtidos de levantamentos ALS) requerem amostras com no mínimo 30 pontos para serem consideradas distribuições normais ou quase normais. De acordo com este mesmo autor, para grandes valores de $N (\geq 30)$ a distribuição amostral das médias é aproximadamente normal, com média da população próxima à média da amostra e desvio padrão da população próximo ao desvio padrão da amostra, independentemente da população, desde que a variância e a média desta sejam finitas e o seu tamanho seja, no mínimo, o dobro da amostra. Ainda segundo SPIEGEL (1993), a amostragem de populações infinitas ou muito grandes deve ser feita de forma aleatória e sem reposição. Assim, com base em SPIEGEL (1993) foram amostrados os pontos relativos a cada população e foram computados as médias e desvios-padrão, bem como os valores máximos e mínimos, em relação às diferenças de coordenadas (E, N e h) encontradas. Ressalta-se ainda que foram estabelecidas amostras de 40 pontos (ao invés de 30) em função da possibilidade destas amostras conterem *outliers*, ou seja, medidas não representativas da população (AXELSSON, 1999). De acordo com LOHMANN et al. (2000), ao serem detectados, os *outliers* devem ser excluídos da análise, o que efetivamente não ocorreu para os conjuntos comparados.

Ainda no que diz respeito ao PEC, ressalta-se que este exige que a avaliação de um produto cartográfico seja realizada com base em pontos bem definidos e que estes sejam testados diretamente sobre a superfície do terreno. No caso dos sete conjuntos disponibilizados, apenas cinco puderam ter seus pontos ALS comparados

a pontos obtidos diretamente de levantamentos de campo, os dois conjuntos restantes foram comparados a pontos obtidos por processos indiretos (fotogramétricos) e, por esta razão, fogem das especificações do PEC. No entanto, acredita-se, isto não inviabiliza que os resultados obtidos destes conjuntos sejam analisados, pois, de acordo com MAUNE et al. (2001d), na falta de uma fonte independente de maior acurácia, pode-se lançar mão de um meio alternativo a fim de que a avaliação de um determinado produto possa ser realizada. Ainda no que diz respeito ao PEC, ressalta-se, mais uma vez, que este foi estabelecido para avaliar a qualidade das séries de cartas gerais que compõem a Cartografia Sistemática Terrestre e que compreende as escalas-padrão entre 1:1.000.000 e 1:25.000. No entanto, na falta de um instrumento apropriado à avaliação de produtos em escalas maiores, as empresas brasileiras produtoras de cartografia, no intuito de atender a uma demanda por qualidade, vêm aplicando o PEC também para a classificação de produtos gerados em escalas maiores que 1:25.000. Por esta razão e, por ser o único instrumento atualmente disponível para avaliação de produtos cartográficos gerados no território brasileiro, o PEC está sendo utilizado nesta pesquisa como indicador da qualidade dos produtos obtidos com o emprego da técnica ALS.

Quanto à qualidade dos dados não-ALS utilizados nas comparações, os levantamentos de campo foram obtidos com acurácias até dez vezes superiores às esperadas para os levantamentos ALS, enquanto os pontos obtidos por fotogrametria foram obtidos com acurácias compatíveis àquelas estabelecidas pelo PEC, para as diferentes escalas empregadas (conforme informações obtidas junto à empresa que disponibilizou os conjuntos de dados ALS e não-ALS utilizados).

No que diz respeito ao emprego do critério do “ponto comum” (estabelecido para as comparações na SC-414, SC-471 e SP-270), salienta-se que o efeito do relevo (inclinação) não foi considerado significativo para a superfície compreendida pelo círculo contendo os pontos comparados. Nestes casos, considerou-se também que tais pontos (nivelado x ALS ou restituído x ALS), por constituírem “pontos comuns”, deveriam ter os erros planimétricos computados (como apresentados nas tabelas 6.5 a 6.9), uma vez que estes erros evidenciam que os pontos amostrados efetivamente seguiram o critério estabelecido para as comparações. É importante ressaltar ainda que AHOKAS et al. (2003), ao compararem altitudes de pontos ALS com altitudes de pontos levantados em campo, utilizaram como critérios: a interpolação da altitude, a média das altitudes para um círculo teste e a altitude do vizinho mais próximo (no qual está baseado o critério do “ponto comum” adotado para esta pesquisa). Os três critérios utilizados resultaram em valores similares para a média das diferenças de altitude, indicando, portanto, que o critério empregado nas comparações da SC-414, SC-471 e SP-270 foi válido para a pesquisa em questão.

Uma vez elaboradas as considerações necessárias, prossegue-se com a análise dos resultados obtidos das comparações. Como determina o PEC, computou-se a exatidão (acurácia) posicional absoluta dos produtos ALS, com 90% de grau de confiança, atribuindo-lhes classificações (A, B ou C) e incluindo-os numa escala específica em função dos produtos não-ALS gerados para as áreas dos projetos em questão. Os valores de acurácia computados constam da tabela 6.11 anteriormente apresentada. Observando-se os valores expostos na referida tabela e comparando-os aos valores computados na tabela 6.10, relativamente ao PEC

planimétrico e altimétrico e seus respectivos erros-padrão, constata-se que os pontos ALS de todas as amostras atendem às especificações de acurácia e precisão estabelecidas pelos referidos PEC e, desta forma, tanto às nuvens de pontos como à grade regular obtidas dos levantamentos ALS pode-se atribuir a classificação “A”.

Um observador mais atento, no entanto, poderia questionar o critério adotado na amostragem dos pontos relativos às áreas comparadas da SC-414, da SC-471 e da SP-270, afirmando que este força a comparação de pontos que, à priori, atenderiam as especificações de acurácia do PEC Planimétrico. Tal afirmação não se justifica pelo fato de que para os demais conjuntos comparados e nos quais o referido critério não foi adotado, as especificações de acurácia do PEC Planimétrico também foram atendidas. Nestes casos, embora as discrepâncias observadas (máxima e mínima) para E e N isolados tenham sido maiores, as médias das discrepâncias (considerando E e N em conjunto) se mantiverem constantes, não excedendo 52 cm. A média das discrepâncias para os conjuntos comparados relativos à BR-116, por exemplo, se manteve próxima às verificadas para os conjuntos comparados relativos à SC-414 e SC-471, embora o critério utilizado para a amostragem dos pontos tenha sido diferente.

De todos os conjuntos comparados, aquele que resultou nas piores estatísticas foi o relativo à varredura executada no bairro Água Verde. Acredita-se, no entanto, que os resultados computados para a referida varredura devem-se aos seguintes fatos.

- Em primeiro lugar, deve-se deixar claro que o objetivo da empresa proprietária do sistema ALS cujos dados foram disponibilizados para esta pesquisa, não foi o de desenvolver um projeto, com critérios estabelecidos para o levantamento e para os produtos gerados deste levantamento, na

área em questão, mas, apenas realizar um teste para verificar os resultados obtidos com o referido sistema em áreas urbanas. Isto significa que, até a execução desta varredura, nenhum projeto desenvolvido pela referida empresa havia compreendido levantamentos ALS sobre áreas densamente edificadas.

- A nuvem de pontos ALS obtida da varredura laser foi comparada a dados obtidos por restituição estereofotogramétrica. É do conhecimento dos profissionais que trabalham com mapeamento aerofotogramétrico que a restituição 3D de feições sobre áreas densamente edificadas é dificultada pelas sombras e pelos deslocamentos de imagem provocados pelas edificações mais altas. Como explicitado anteriormente, o bairro Água Verde, ao longo da avenida República Argentina, apresenta uma densidade bastante alta de edificações, com a maioria dos edifícios possuindo mais de 20 andares. Assim, por melhor que seja a acuidade visual do operador e, por mais que este seja experiente, tais características acabam dificultando a restituição, por exemplo, de feições altimétricas (curvas de nível e pontos cotados), uma vez que a marca estereoscópica deve ser mantida coincidente com a superfície do terreno visualizada. Esta é uma das razões pela qual as curvas de nível geradas a partir dos dados ALS processados, ao serem comparadas às curvas de nível restituídas, apresentaram discrepâncias principalmente nas áreas localizadas entre os edifícios muito altos e nas áreas cobertas por vegetação. Por outro lado, observou-se uma certa coincidência dos traçados destas mesmas curvas nas áreas abertas (áreas de estacionamento, praças e cemitério).

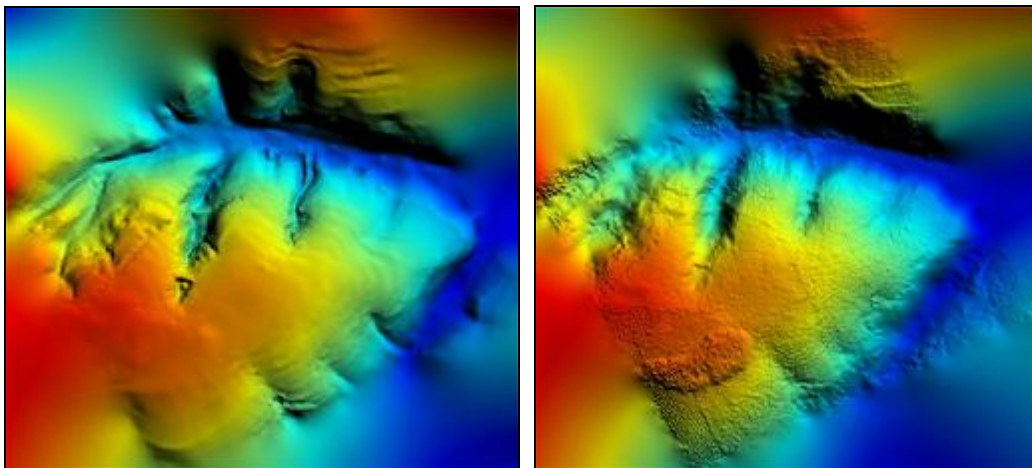
- O último e principal ponto a ser analisado está relacionado ao planejamento do voo laser em questão. O quadro 5.4 revela que a divergência do feixe laser utilizado para esta varredura foi de 1 mrad, enquanto para as demais varreduras comparadas a divergência utilizada foi de 0,2 mrad. BALTSAVIAS (1999b) explica que grandes alturas de voo (acima de 1.000 m) exigem uma menor divergência do feixe laser de forma a poder obter um sinal de retorno útil. CUDDY (1999), por sua vez, afirma que o excesso de divergência resulta em mistura do alvo (*target mixing*), ou seja, conduz a uma situação onde a habilidade de localizar precisamente um ponto laser específico, sobre a superfície do terreno, é impedida porque cada ponto se tornou muito grande e difuso. Para este mesmo autor, alturas de voo acima de 1.000 m exigem divergências do feixe laser menores ou iguais a 0,3 mrad. Ainda em relação à divergência do feixe laser, IAVARONE (2002) afirma ser este um dos parâmetros que afetam tanto a “resolução vertical” (mínima diferença em profundidade detectável por um sistema ALS) como a “resolução horizontal” (caracterizada pelo tamanho da menor feição discernível sobre uma superfície homogênea) dos pontos ALS coletados. Em outras palavras, pegadas pequenas produzem conjuntos de pontos ALS de maior “resolução”. Portanto, no caso da varredura laser executada ao longo da avenida República Argentina, os pontos deveriam ter sido coletados com diâmetro médio de 20 cm, e não com diâmetro de 100 cm como apresentado no quadro 5.4. Com certeza, esta foi uma das causas das discrepâncias verificadas entre os conjuntos de pontos comparados.

Ainda no que diz respeito à área selecionada do bairro Água Verde, o fato da nuvem de pontos ALS ter sido comparada à nuvem de pontos restituídos não inviabiliza a análise dos resultados, uma vez que este mesmo tipo de comparação foi aplicado às áreas selecionadas da SC-414 e SC-471, sendo que as estatísticas computadas para estas áreas resultaram bem próximas das computadas para as comparações entre as nuvens de pontos ALS e as nuvens de pontos levantados em campo. As únicas diferenças verificadas entre as referidas varreduras (Água Verde, SC-414 e SC-471) foram em relação à superfície do terreno varrida e, mais uma vez, em relação à divergência do feixe laser, pois todos os demais parâmetros planejados, para os vôos laser mencionados, são idênticos.

Em relação às demais áreas amostradas e comparadas, ressalta-se que os resultados obtidos da comparação entre grades regulares (OSBRA) permitiram verificar que as maiores discrepâncias de altitude ocorreram nas áreas de vegetação densa (floresta ou mata nativa). A comparação entre as curvas de nível geradas automaticamente a partir dos dados ALS processados e as geradas por restituição fotogramétrica, para esta mesma área, evidenciou a semelhança de traçado nas áreas abertas (preparadas para cultura ou cultivadas) e diferenças significativas nas áreas de vegetação fechada. Testes realizados em 2001 pela empresa que disponibilizou os dados de varredura laser para esta pesquisa confirmam que, em áreas onde a densidade da vegetação é alta e a declividade do terreno é acentuada, ocorreram diferenças de altitude entre pontos comuns de grades regulares de até $\pm 8,5$ m, devidas, principalmente, à dificuldade de penetração do feixe laser e à propagação, sobre a altitude dos pontos coletados, dos erros devido à inclinação do relevo. Dos dados disponibilizados para a área delimitada pelas folhas 19 e 20 do OSBRA foram gerados dois hipsométricos (figura 6.21) utilizando o *software* ER

Mapper versão 6.2. O primeiro é relativo às curvas de nível restituídas e o segundo é relativo à nuvem de pontos ALS. De maneira geral não é possível notar diferenças significativas entre os referidos hipsométricos. Percebe-se, no entanto, que o hipsométrico gerado a partir das curvas de nível restituídas é mais suave, enquanto o gerado a partir da nuvem de pontos ALS parece representar melhor a superfície do terreno e suas nuances (isto se deve à densidade de pontos e à distribuição destes sobre a superfície do terreno). Recomenda-se, para as comparações realizadas entre grades regulares, a geração do hipsométrico das diferenças de altitude computadas, a fim de avaliar, de forma mais efetiva e relativamente às imagens de intensidade ou ortofotografias existentes, as áreas que apresentaram problemas em relação à varredura.

FIGURA 6.21 - HIPSOMÉTRICO: RESTITUIÇÃO x ALS



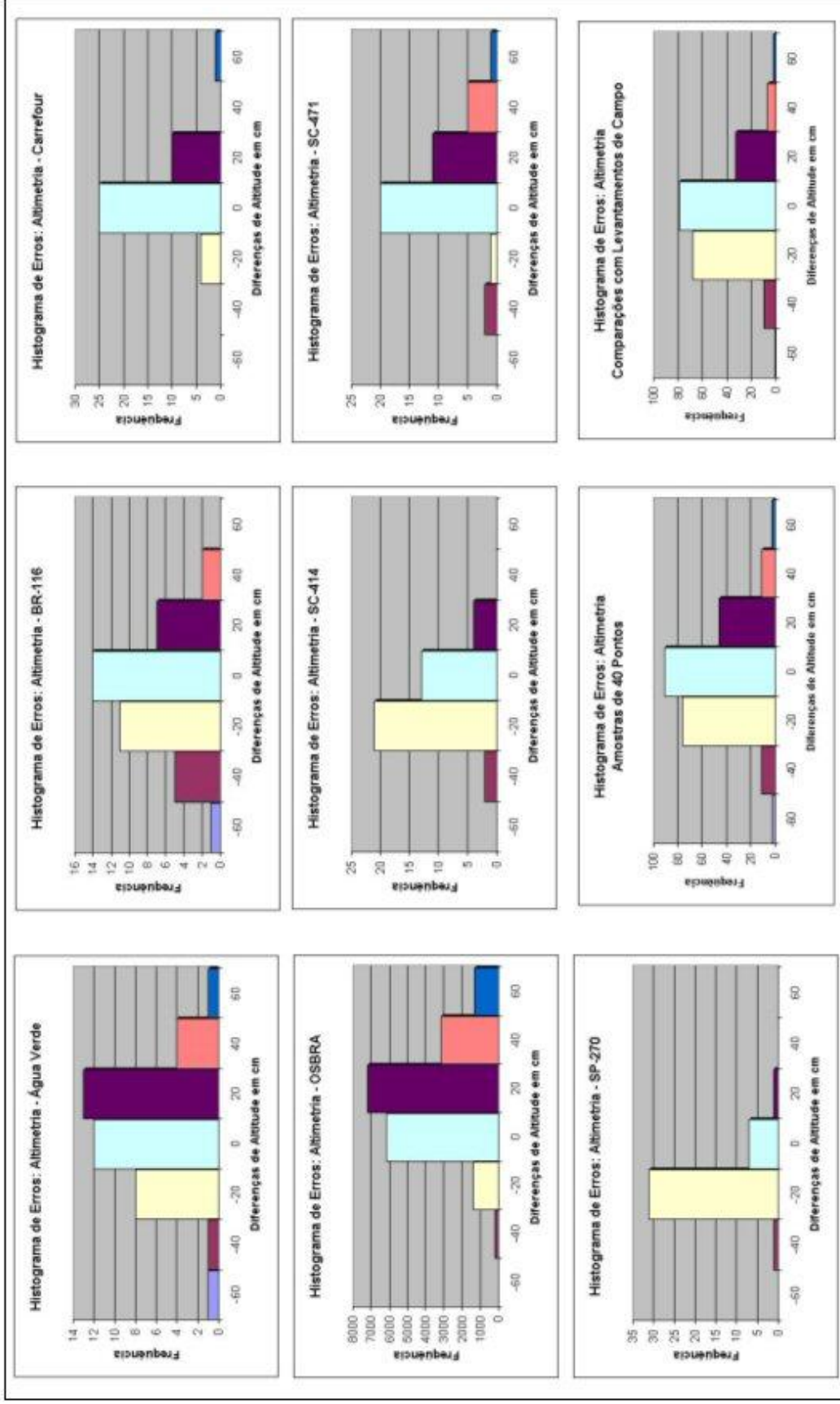
FONTE: ESTEIO Engenharia e Aerolevantamentos S.A. (2004)

Relativamente a todos os conjuntos de pontos ALS e não-ALS comparados, as médias das discrepâncias altimétricas computadas se mantiveram entre $\pm 4,9$ e $\pm 17,7$ cm. Um teste de hipótese e significância para a diferença das médias, disponibilizado no Anexo P, evidencia que as amostras estão livres de erros sistemáticos (relativamente à altitude). Os desvios-padrão altimétricos, para estas mesmas amostras, variaram entre 9,5 e 27,4 cm. Os maiores desvios-padrão

computados foram nas comparações entre as nuvens de pontos ALS e as nuvens de pontos obtidos por fotogrametria (entre 22,1 e 27,4 cm). SCHENK et al. (2001) afirmam que no caso das comparações de pontos laser com pontos restituídos, o erro computado para a altitude consiste dos erros dos pontos ALS processados e dos erros dos pontos determinados fotogrametricamente. Admite-se, portanto, que os resultados obtidos dos levantamentos ALS sejam melhores que os observados nas referidas comparações.

Para melhor visualizar os resultados obtidos das comparações, apresenta-se na figura 6.22 os histogramas dos erros altimétricos verificados para cada um dos conjuntos de dados ALS disponibilizados, além de dois histogramas de erros altimétricos gerais, o primeiro considerando todas as amostras de 40 pontos e o segundo considerando apenas as amostras de 40 pontos comparadas a pontos levantados em campo. Como explicitado anteriormente durante a descrição do método, outros tipos de gráficos também poderiam ter sido utilizados, com a mesma finalidade. Percebe-se, dos gráficos citados, que as diferenças de altitude concentram-se entre zero e ± 30 cm. É possível perceber ainda que as distribuições das diferenças de altitude, para as amostras comparadas, resultaram assimétricas (estatísticas apresentadas no Anexo P), sendo que as comparações realizadas para os projetos Carrefour, OSBRA, SC-414 (campo), SC-471 (campo) e SP-270 resultaram em distribuições com assimetrias positivas enquanto as realizadas para os projetos Água Verde, BR-116, SC-414 (restituição) e SC-471 (restituição) resultaram em distribuições com assimetrias negativas. Assim, as distribuições dos erros de altitude do ALS em relação à superfície do terreno constituem distribuições inclinadas ou assimétricas, significando que as altitudes do ALS tendem para fora da superfície do terreno, como já comprovado por PFEIFER et al. (1999).

FIGURA 6.22 - HISTOGRAMAS DOS ERROS ALTIMÉTRICOS



NOTAS: O gráfico intitulado "Amostras de 40 Pontos" refere-se às diferenças altimétricas computadas para todas as amostras, com exceção do OSBRA.

O gráfico intitulado "Comparações com Levantamentos de Campo" refere-se às diferenças altimétricas computadas para as amostras da BR-116, SC-414, SC-471, SP-270 e Carrefour.

Terminada a análise dos resultados obtidos das comparações em relação ao PEC, na seqüência serão apresentados os resultados das comparações, relativamente às acurácias especificadas pelo fabricante do sistema ALS cujos dados coletados foram utilizados na presente pesquisa. De acordo com a Optech Inc., fabricante dos sistemas ALTM comercializados no Brasil, a acurácia vertical dos dados ALS obtidos por tais sistemas é de 15 cm a 1.200 m de altura, para 68,27% dos pontos coletados sob condições ideais de varredura. Ainda de acordo com o referido fabricante, a acurácia horizontal daqueles mesmos dados é melhor que 1/2000 da altura de vôo, também para 68,27% dos pontos coletados sob condições ideais de varredura. É importante ressaltar que, por “condições ideais”, entende-se: sistema calibrado apropriadamente; funcionando perfeitamente; superfície do terreno com descontinuidade ou densidade baixa da vegetação e relevo plano; levantamento planejado para coletar o máximo de pontos possível ao longo de uma faixa bastante estreita do terreno; e utilização de bases GPS localizadas a menos de 30 km da área levantada (CRAMER, 1999; FOWLER, 2001; TURNER, 2001; BURTCHE, 2002).

TABELA 6.13 - ACURÁCIAS ESPECIFICADAS PELO FABRICANTE

| PROJETO | Acurácia Horizontal | | Acurácia Vertical | | | |
|------------|---------------------|------------|-----------------------|--------------|--------------|------------|
| | 1/2000 x H' (m) | Nº Pts (%) | ±15 cm ⁽¹⁾ | ±20 cm | ±25 cm | ±30 cm |
| | | | Nº Pts (%) | Nº Pts (%) | Nº Pts (%) | Nº Pts (%) |
| Água Verde | 0,500 | 23 (57,5) | 18 (45) | 23 (57,5) | 29 (72,5) | 33 (82,5) |
| BR-116 | 0,550 | 33 (82,5) | 22 (55) | 25 (62,5) | 31 (77,5) | 33 (82,5) |
| Carrefour | 0,600 | 40 (100) | 32 (80) | 35 (87,5) | 39 (97,5) | 39 (97,5) |
| OSBRA | 0,550 | - | 9246 (46,7) | 11116 (56,1) | 14489 (73,1) | 16049 (81) |
| SC-414 | 0,500 | 40 (100) | 24 (60) | 28 (70) | 36 (90) | 38 (95) |
| SC-471 | 0,500 | 40 (100) | 27 (67,5) | 29 (72,5) | 31 (77,5) | 32 (80) |
| SP-270 | 0,600 | 40 (100) | 18 (45) | 29 (72,5) | 34 (85) | 40 (100) |

(1) Para alturas de vôo de 1.200 m e condições de varredura ideais.

A tabela 6.13 revela, portanto, que os únicos resultados obtidos das comparações que atendem às especificações de acurácia horizontal e vertical do fabricante são os relativos à área de calibração. As demais comparações, como esperado, não foram realizadas sob as “condições ideais” citadas anteriormente e, portanto, não resultaram nos valores estabelecidos. Ressalta-se, no entanto, que os resultados obtidos para estas comparações, considerando-se a complexidade das superfícies varridas, foram satisfatórios e condizentes com os resultados obtidos por pesquisadores como LOHMANN & KOCH (1999), TURTON & JONAS (1999), AL-BAYARI et al. (2002), SATALE & KULKARNI (2003) e MAAS (2003).

Assim, os resultados obtidos para a referida área de calibração concordam com o estabelecido por PETZOLD et al. (1999). Estes autores consideram que os resultados de um levantamento ALS, realizado sobre uma área de calibração, devem ser aceitos quando as diferenças altimétricas computadas dos pontos coletados, em relação aos pontos levantados em campo, for inferior a 30 cm para 95% dos pontos comparados. Estes mesmos autores, no entanto, não estabelecem parâmetros de aceitação para varreduras executadas sobre superfícies com características diversas das mencionadas acima.

Mais uma vez, ao observar as características de cada superfície varrida (quadro 5.5), percebe-se que o tipo de relevo, a densidade e tipo da cobertura vegetal, bem como, a densidade das edificações, são parâmetros que determinam e afetam diretamente a qualidade dos resultados obtidos das varreduras. Portanto, mais que um planejamento cuidadoso dos parâmetros do sistema de varredura, cada levantamento ALS precisa considerar as características do terreno a ser levantado a fim de obter os melhores resultados possíveis deste levantamento. Parâmetros normalmente planejados para a varredura de um determinado tipo de

relevo, não devem ser tomados como padrão, pois, um outro relevo similar pode apresentar diferentes tipos de cobertura vegetal, ou, diferentes tipos de densidade da vegetação, em função, por exemplo, da época do ano, e levar a resultados que não são os esperados.

Especialistas e pesquisadores do mundo todo têm se preocupado em afirmar que existe a necessidade de padronizar os levantamentos ALS, bem como, estabelecer padrões de acurácia horizontal e vertical para os produtos gerados a partir destes levantamentos. Alguns esforços têm sido feitos neste sentido e, até a presente data, o único documento do qual se tem conhecimento e que pretende estabelecer um padrão de acurácia vertical para os produtos gerados de levantamentos ALS, considerando-se, entre outras, as características da superfície do terreno mencionadas, é o da ASPRS (2004) intitulado “*ASPRS Lidar Guidelines: Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data*”.

A presente pesquisa, portanto, com o intuito de ser útil aos usuários dos produtos gerados a partir de levantamentos ALS, propôs, desenvolveu e aplicou um método de avaliação para os resultados obtidos de alguns levantamentos ALS executados no território brasileiro, não apenas em relação a levantamentos de campo, como determina o PEC em vigor, mas também em relação a outros produtos disponíveis. Assim, a partir das informações disponibilizadas no presente relatório, procurou-se atender a uma demanda pelo conhecimento e compreensão da referida técnica, principalmente no que se refere às aplicações que esta vem tendo, no mercado cartográfico nacional, e também, no que se refere à qualidade dos produtos dela derivados.

7 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez proposto e aplicado o método e feita a análise dos resultados obtidos das diversas comparações realizadas, chegou-se à conclusão que a técnica ALS foi válida para os projetos disponibilizados, sendo que as acurácias altimétricas absolutas computadas permaneceram entre 9,5 e 20,6 cm para as comparações realizadas entre nuvens de pontos ALS e nuvens de pontos levantados em campo e, entre 22,1 e 27,4 cm para as comparações realizadas entre nuvens de pontos ALS e nuvens de pontos restituídos. A qualidade dos pontos coletados por meio do emprego da técnica ALS ficou provada, comparando-se os erros-padrão computados com os valores do erro-padrão e PEC altimétrico estabelecidos para os projetos disponibilizados.

Desta forma, o principal problema proposto pela pesquisa foi solucionado e, como resposta, pode-se afirmar que os resultados do laserscanner aerotransportado atendem às especificações de qualidade cartográfica impostas pelo PEC (planimétrico e altimétrico) e estendidos para as tolerâncias e escalas de referência utilizadas, seguindo os critérios estabelecidos para o método proposto e empregado na avaliação daqueles resultados.

O segundo problema proposto e que pergunta se a utilização do PEC como um indicador de qualidade, é adequado ou não à avaliação e classificação de produtos cartográficos gerados a partir do emprego da técnica ALS, merece algumas considerações. Nos trabalhos publicados sobre o assunto, vários autores concluem que o PEC, por ser um padrão estabelecido para avaliar e classificar produtos analógicos, não seria adequado à avaliação de produtos, como no caso da varredura laser aerotransportada, coletados e gerados automática e digitalmente.

Para BURITY et al. (1999), por exemplo, os parâmetros que determinam a qualidade de um produto cartográfico são função do processo de obtenção deste produto, ou seja, se as informações cartografadas foram obtidas analógica ou digitalmente. Portanto, para estes mesmos autores a qualidade geométrica ou posicional definida e determinada pelo PEC não é suficiente para avaliar o referido produto. Estes mesmos autores salientam ainda que, no meio digital, o modo como as informações são armazenadas diferem totalmente do modo como as mesmas são visualizadas na tela de um monitor, referindo-se à informação cartográfica digital como destituída de escala e explicando que a escala de saída ou de visualização de um produto digital está condicionada apenas à precisão e/ou acurácia com que os dados foram obtidos. O maior problema, no entanto, não está em saber se o produto digital, enquanto informação armazenada digitalmente, possui escala ou não, mas, está em saber se o usuário tem consciência das restrições de uso e manipulação desta informação, enquanto comandadas pelas normas e padrões de exatidão estabelecidos. Por outro lado, GIRARDI & CORDINI (2002) salientam que a preocupação com a qualidade e a quantidade de informações obtidas, independentemente do processo ser analógico ou digital, é a mesma, estando estas diretamente relacionadas à escala final de representação daquelas informações.

Para LEAL & DALMOLIN (2002), a cartografia brasileira é historicamente norteadada por métodos analógicos tradicionais e o avanço da tecnologia digital e a inserção da cartografia neste contexto resolveu alguns problemas antigos (como o aumento de produção e a agilização de alguns processos), mas, também fez surgir outros, como a falta de normas adequadas e de parâmetros de avaliação e conversão dos dados. De acordo com estes mesmos autores, a necessidade de produção e dinamismo, inerentes às tecnologias de *hardware* e *software*,

condicionaram a manutenção e melhoria da qualidade do produto gerado, a um segundo plano. Ainda de acordo com os mesmos autores, a busca do equilíbrio entre produção e qualidade do produto é, portanto, imprescindível, suscitando uma revisão das normas e padrões estabelecidos, além da definição de parâmetros mínimos que garantam a qualidade do produto final sem que este se perca na evolução das tecnologias. O Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) peca, portanto, ao não contemplar os procedimentos de avaliação para a cartografia digital e, desta forma, por contemplar apenas os procedimentos que resultam na avaliação de produtos impressos, relativamente à escala (planimetria) e à eqüidistância das curvas de nível (altimetria).

De acordo com KARNAUKHOVA (2001), as propriedades distintas dos produtos cartográficos digitais condicionam as dificuldades de avaliar a sua qualidade pelos critérios estabelecidos para os produtos em papel. Para esta mesma autora, no entanto, o principal parâmetro utilizado na avaliação da qualidade de qualquer produto cartográfico, continua sendo a sua precisão. Esta mesma autora constata ainda que a geração de um produto cartográfico digital, assim como de um analógico, é um processo complexo e poliestructural e que requer o planejamento de procedimentos que permitam avaliar corretamente, desde o início, a capacidade laboral e temporal do processo, além das forças e dos meios necessários para se chegar a um resultado final adequado.

O método apresentado nesta pesquisa constitui, portanto, um processo para averiguação da qualidade de produtos digitais de natureza cartográfica (nuvens de pontos e/ou grades regulares 3D) obtidos do emprego da técnica de varredura laser aerotransportada. A utilização de indicadores de qualidade como o erro-padrão (ou desvio-padrão), para avaliar a precisão, e do PEC, para avaliar a exatidão, está

vinculada ao fato da obrigatoriedade legal daqueles produtos serem avaliados pelo padrão estabelecido e em vigor.

Ressalta-se, no entanto, que apesar do PEC necessitar uma revisão quanto à compreensão da avaliação de produtos gerados por processos digitais, padrões similares continuam sendo utilizados pelo mundo afora. Dentre eles podem ser citados o da *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)*, intitulado “*Accuracy Standards for Large-Scale Maps*” e, o do *North Atlantic Treaty Organisation (NATO)*, intitulado “*Evaluation of Land Maps, Aeronautical Charts and Digital Topographic Data*” (STANAG 2215). Ambos tratam a acurácia horizontal absoluta como um erro circular que consiste no comprimento do raio do círculo com centro na posição estimada e dentro do qual a verdadeira posição se encontra, com uma certa probabilidade dada pelo grau de confiança; e, a acurácia vertical absoluta como um erro linear ao longo do eixo Z, também determinado com um certo grau de confiança (AFONSO et al., 2002). Ambos adotam ainda para a acurácia posicional absoluta (horizontal e vertical), graus de confiança de 90%, indicando que a acurácia vertical é uma função da acurácia horizontal, como faz o PEC.

É importante ressaltar, no entanto, que tais padrões vêm sofrendo modificações nos últimos anos e sendo reeditados. O STANAG 2215, por exemplo, encontra-se em fase de discussão da sua 6ª edição, que introduziu inúmeras alterações relativamente à sua última edição, que é de 1989. Por sua vez, o padrão da ASPRS sofreu algumas modificações e abandonou as classificações 1, 2 e 3 que impunha aos produtos impressos (como faz o PEC com as classes A, B e C), por concluir que as mesmas poderiam gerar interpretações subjetivas no que diz respeito à qualidade dos dados geo-espaciais representados (MAUNE et al, 2001d).

Esforços também têm sido verificados no sentido de abandonar antigos padrões, substituindo-os por outros mais adequados. Dentre eles podem ser citados o do *Federal Geographic Data Committee* (FGDC) intitulado “*Geospatial Positioning Accuracy Standards*” (1998) e que compreende cinco documentos (ou partes). O documento padrão número três, intitulado “*National Standards for Spatial Data Accuracy*” (NSSDA), além de adotar um grau de confiança de 95% para a acurácia posicional absoluta, trata os erros verticais em função da escala e não em função do intervalo das curvas de nível. Outra vantagem deste documento é a implementação de metodologias estatísticas para estimar a acurácia de pontos sobre mapas impressos e também sobre dados geo-espaciais digitais. Este padrão tem sido utilizado por diversas instituições, nos EUA, para avaliar a acurácia de modelos digitais 3D gerados de varreduras laser aerotransportadas. Entre eles o *North Carolina Geodetic Survey* (NCGS), cujo programa para o mapeamento de bacias hidrográficas (*North Carolina Cooperating Technical State Mapping Program*) desenvolveu e adotou especificações próprias quanto à execução de levantamentos ALS e quanto à geração de DEMs no estado. Outra instituição que utiliza o padrão NSSDA para reportar a acurácia de modelos digitais 3D obtidos com o emprego da técnica ALS é a *Federal Emergency Management Agency* (FEMA), que também propôs um padrão de acurácia e desempenho para a técnica ALS voltado à geração de DEMs para uso no programa americano de seguro contra enchentes (*National Flood Plain Insurance Program*). Ainda em relação ao desenvolvimento de padrões específicos para a varredura laser aerotransportada, em maio de 2003 a ASPRS anunciou a aprovação de um documento intitulado “*LIDAR Data Exchange Format Standard* (LAS)” e que pretende servir como padrão industrial para a troca de dados LIDAR entre fabricantes de *hardware*, desenvolvedores de *software*, provedores de

dados e usuários da referida tecnologia. Além deste, em maio de 2004 a mesma ASPRS anunciou a publicação de um documento (já mencionado no Capítulo 6) que estabelece diretrizes para a reportagem da acurácia vertical de dados LIDAR. Tal documento está em harmonia com o estabelecido pelo *National Digital Elevation Program* (NDEP), já submetido ao FGDC para inclusão, como texto revisado e aprovado, no NSSDA. O documento da ASPRS estabelece que a acurácia vertical é o principal critério para especificação da qualidade de dados de elevação ou altitude e que esta deve ser reportada em termos de 1,96 do RMSE (*Root Mean Square Error*), quando se tratar de uma distribuição normal. As diretrizes para teste e reportagem da acurácia vertical para distribuições não normais ainda está em fase de recomendação, pelo NDEP, ao FGDC.

Visto que as dificuldades encontradas quanto ao emprego de padrões adequados à avaliação de produtos cartográficos digitais não constituem um problema localizado, mas mundial, reconhece-se a importância do PEC como único padrão existente e legalmente estabelecido para avaliação da qualidade geométrica dos produtos de natureza cartográfica gerados em território brasileiro e, portanto, confirma-se a sua adequabilidade à avaliação da qualidade geométrica dos produtos gerados pelo emprego da varredura laser aerotransportada. Desta forma, e uma vez solucionados os problemas propostos para a presente pesquisa, admitem-se como verdadeiras as hipóteses inicialmente apresentadas no Capítulo 1.

Quanto ao emprego da técnica ALS e quanto aos resultados dela obtidos é preciso considerar ainda que, de maneira geral, os fabricantes de sistemas de varredura laser aerotransportados normalmente não indicam a quais parâmetros de aquisição estão relacionadas as acurácias por eles reportadas. Tampouco há indicações de como as referidas acurácias foram checadas. É importante ter em

mente, no entanto, que as acurácias reportadas são baseadas em análises rigorosas sobre a engenharia dos sistemas e, na prática, geralmente não são alcançáveis (FLOOD & SATALICH, 2001). Portanto, relatar que os resultados obtidos de um levantamento ALS atendem ou não às especificações do fabricante do sistema empregado no levantamento, exige um certo cuidado.

Outro ponto importante diz respeito aos softwares utilizados no processamento dos dados ALS obtidos com o emprego da referida técnica. 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. Um levantamento ALS requer, portanto, além de um planejamento cuidadoso (relativamente aos parâmetros programados para a varredura), um processamento cuidadoso, com a documentação dos parâmetros adotados e dos algoritmos empregados, caso contrário, corre-se o risco de observar diferentes resultados para uma mesma área varrida.

Relativamente aos testes realizados por outros pesquisadores (concentrados na Europa e América do Norte), há que se considerar a quantidade de varreduras realizadas, a qualidade da fonte de maior acurácia utilizada como referência, o sistema empregado e as condições da superfície do terreno levantada. Existem diferenças significativas de solo, vegetação, estrutura das edificações e, sobretudo, do clima, entre as várias regiões do globo. Tais fatores devem ser levados em consideração antes que os resultados obtidos de tais testes, e quaisquer padrões

deles derivados, sejam aplicados aos levantamentos realizados em território brasileiro.

Outras investigações, portanto, se fazem necessárias, relativamente ao processamento dos dados ALS coletados no Brasil; à interação do feixe laser com a superfície do terreno, levando em conta suas características específicas; e, ainda, relativamente ao desenvolvimento de padrões adequados à avaliação de produtos que, como os obtidos da varredura laser aerotransportada, precisam ter sua qualidade comprovada.

REFERÊNCIAS

ACKERMANN, F. Airborne laser scanning: present status and future expectations. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Zürich, v. 54, n. 2-3, p. 64-67, 15 jul. 1999.

AFONSO, A. J. G. et al. Sistema para orientação e avaliação da exactidão posicional em cartografia digital. In: ESIG 2002, Encontro de Utilizadores de Informações Geográficas, 7., 13-15 nov. 2002, Oeiras. 9p.

AHOKAS, E.; KAARTINEN, H.; HYYPPÄ, J. A quality assessment of airborne laser scanner data. In: Proceedings of the ISPRS Workshop on 3-D Reconstruction from Airborne Laserscanner and INSAR Data, 8-10 out. 2003, Dresden. 23p.

AIRBORNE 1 CORPORATION. LIDAR accuracy: an Airborne 1 perspective. Los Angeles, 2002. 24p.

AL-BAYARI, O. Some problems in kinematic airborne laser survey. In: Geodetic Millenium Meeting, 6., 29 jun. - 1 jul. 2000, Krakow. 9p.

AL-BAYARI, O. et al. Quality assessment of DTM and orthophoto generated by airborne laser scanning system using automated digital photogrammetry. In: Proceedings of the ISPRS Photogrammetric Computer Vision Symposium, 9-13 set. 2002, Graz. 6p.

AMHAR, F.; ECKER, R. Accurate mapping of buildings in digital orthophotos. In: Proceedings of the International Cartographic Conference, 17., 3-9 set. 1995, Barcelona. p. 605-609.

ANDERSEN, H.-E. et al. A comparison of forest canopy models derived from LIDAR and INSAR data in a pacific northwest conifer forest. In: Proceedings of the ISPRS Workshop on 3-D Reconstruction from Airborne Laserscanner and INSAR Data, 8-10 out. 2003a, Dresden. 7p.

ANDERSEN, H.-E.; FOSTER, J. R.; REUTEBUCH, S. E. Estimating forest structure parameters on Fort Lewis military reservation using airborne laser scanner (LIDAR). In: Proceedings of the International Precision Forestry Symposium, 2., 2003b, Seattle. p. 45-53.

ANDERSEN, H.-E.; REUTEBUCH, S. E.; SCHREUDER, G. F. Automated individual tree measurement through morphological analysis of a lidar-based canopy surface model. In: Proceedings of the International Precision Forestry Cooperative Symposium, 1., 17-20 jun. 2001, Seattle. 32p.

ARGALL, P. S.; SICA, R. J. LIDAR introduction. In: The encyclopedia of imaging science and technology. New York: John Wiley & Sons, 2002. p. 869-889.

AXELSSON, P. Integrated sensors for improved 3D interpretation. In: ISPRS Symposium on GIS - Between Visions and Applications, 7-10 set. 1998a, Stuttgart. IAPRS, v. 32, parte 4, p. 27-34.

AXELSSON, P. Integrated sensors for platform orientation and topographic data acquisition. In: Symposium on Digital Photogrammetry, 21-22 maio 1998b, Istambul. 11p.

AXELSSON, P. Processing of laser scanner data: algorithms and applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Zürich, v. 54, n. 2-3, p. 138-147, 15 jul. 1999.

AXELSSON, P.; PETZOLD, B. OEEPE project on laser data acquisition: phase I, preliminary report. Stockholm: OEEPE, 1999. 16p.

BALTSAVIAS, E. P. A comparison between photogrammetry and laser scanning. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Zürich, v. 54, n. 2-3, p. 83-94, 15 jul. 1999a.

BALTSAVIAS, E. P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Zürich, v. 54, n. 2-3, p. 199-214, 15 jul. 1999b.

BALTSAVIAS, E. P. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Zürich, v. 54, n. 2-3, p. 164-198, 15 jul. 1999c.

BEHAN, A. On the matching accuracy of rasterised scanning laser altimeter data. In: ISPRS Conference on Geoinformation for All, 16-23 jul. 2000, Amsterdam. IAPRS, v. 33, parte B2, p. 75-79.

BEHAN, A.; MAAS, H.-G.; VOSSELMAN, G. Steps towards quality improvement of airborne laser scanner data. In: Proceedings of the Annual Conference of the Remote Sensing Society, 26., 12-14 set. 2000, Leicester. 9p.

BERALDIN, J.-A. et al. Active 3D sensing. Scuola Normale Superiore Pisa, Quaderni 10, p. 22-46, 2000.

BRASIL. Decreto n.º 2.278, de 18 de julho de 1997. Regulamenta o decreto-lei n.º 1.177, de 21 de junho de 1971 que dispõe sobre aerolevantamento no território nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 jul. 1997. Disponível em: <<http://www.defesa.gov.br/divcar/d2278.html>>. Acesso em: 14 mar. 2002.

BRASIL. Decreto n.º 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 jun. 1984. Disponível em: <<http://www.concar.ibge.gov.br/CCA32.htm>>. Acesso em: 08 nov. 2002.

BRASIL. Decreto-lei n.º 1.177, de 21 de junho de 1971. Dispõe sobre aerolevanteamento no território nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 jun. 1971. Disponível em: <<http://www.defesa.gov.br/divcar/dl1177.html>>. Acesso em: 14 mar. 2002.

BRASIL. Decreto-lei n.º 243, de 28 de fevereiro de 1967. Fixa as diretrizes e bases da cartografia brasileira. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 fev. 1967. Disponível em: <<http://www.concar.ibge.gov.br/CCA22.htm>>. Acesso em: 21 abr. 2002.

BRASIL. Portaria n.º 637-SC-6/FA-61, de 05 de março de 1998. Aprova as instruções reguladoras de aerolevanteamento no território nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 06 mar. 1998. Disponível em: <<http://www.defesa.gov.br/divcar/indexdivcar.html>>. Acesso em: 29 maio 2002.

BRASIL. Projeto de lei n.º 3.587, de 08 de setembro de 2000. Dispõe sobre aerolevanteamento e levantamento espacial no território nacional. Poder Executivo, Brasília, DF, 08 set. 2000. Disponível em: <<http://www.agespacial.gov.br/>>. Acesso em: 1º set. 2003.

BROOKER, G. Target characteristics. In: Sensors & signals. Sydney: Australian Centre for Field Robotics, University of Sydney, 2003. cap. 17, 21p.

BROVELLI, M. A.; CANNATA, M.; LONGONI, U. M. Managing and processing LIDAR data within GRASS. In: Proceedings of the Open Source GIS-GRASS Users Conference, 11-13 set. 2002, Trento. 29p.

BRUTON, A. M.; MOSTAFA, M. M. R.; SCHERZINGER, B. Airborne DGPS without dedicated base stations for mapping applications. In: ION-GPS Proceedings, set. 2001, Salt Lake City. 8p.

BUCKNER, B. The nature of measurement: part IV - precision and accuracy. Professional Surveyor Magazine, Frederick, v. 17, n. 5, 6p., jul./ago. 1997.

BURITY, E. F.; PHILIPS, J. W.; BRITO, J. L. Qualidade de dados para mapeamento. In: XIX Congresso Brasileiro de Cartografia, 3-8 set. 1999, Recife. 8p.

BURITY, E. F.; SILVEIRA, J. C. Requisitos de qualidade no contexto da série de normas ISO 9000. In: XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, 29 set. - 3 out. 2003, Belo Horizonte. 9p.

BURMAN, H. Calibration and orientation of airborne image and laser scanner data using GPS and INS. Stockholm: Royal Institute of Technology, abr. 2000. Tese, 125p.

BURMAN, H. Laser strip adjustment for data calibration and verification. In: ISPRS Commission III Symposium, 9-13 set. 2002, Graz. IAPRS, v. 34, parte 3, p. 67-72.

BURTCH, R. LIDAR principles and applications. In: IMAGIN Conference, maio 2002, Traverse City. 13p.

CARNEIRO, J. S.; VALERIANO, D. de M. Padrão espacial da diversidade beta da mata atlântica: uma análise da distribuição da biodiversidade em banco de dados geográficos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 5-10 abr. 2003, Belo Horizonte. Anais XI SBSR, p. 629-636.

CARTER, W. et al. Airborne laser swath mapping: shines new light on earth's topography. EOS, Transactions, American Geophysical Union, Washington, DC, v. 82, n. 46, p. 549-555, 13 nov. 2001.

COLOMINA, I.; CREIXELL, F.; WIS, M. A general INS/GPS system for remote sensing and geodesy. In: ISPRS Mid-Term Symposium on Integrated Remote Sensing at the Global, Regional and Local Scale, 10-15 nov. 2002, Denver. 5p.

CRAMER, M. GPS/INS integration. In: Photogrammetric Week, 46., 1997, Stuttgart. p. 1-10.

CRAMER, M.; HAALA, N. Direct exterior orientation of airborne sensors: an accuracy investigation of an integrated GPS/inertial system. GIM International Magazine, Lemmer, v. 13, p. 46-49, set. 1999.

CRAMER, M.; STALLMANN, D.; HAALA, N. Direct georeferencing using GPS/inertial exterior orientations for photogrammetric applications. In: Proceedings of the ISPRS Congress, 19., 16-23 jul. 2000, Amsterdam. IAPRS, v. 33, parte B3, p. 198-205.

CROMBAGHS, M. J. E.; BRÜGELMANN, R.; DE MIN, E. J. On the adjustment of overlapping strips of laseraltimeter height data. In: IAPRS, v. 33, parte B3/1, jul. 2000, Amsterdam. p. 230-237.

CUDDY, M. Flying higher, working faster. EOM Magazine, Frederick, v. 8, n. 6, 1p., jul.-ago. 1999.

DENT, B. D. Cartography: thematic map design. 5. ed. McGraw-Hill, 1999. 417p. ISBN 0-697-38495-0.

DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO. Manual técnico do exército T34-700: convenções cartográficas. 1ª. Parte. 2. ed. Rio de Janeiro, 1998. 109p.

DUBAYAH, R. O. et al. Land surface characterization using LIDAR remote sensing. In: Spatial information for land use management. Singapore: International Publishers Direct, 2000. p. 25-38.

ESPÍRITO SANTO, M. do; AUGUSTO, A. A. Z. Levantamento e reconhecimento das áreas verdes e arborização urbana da cidade de Mococa. Revista de Iniciação Científica da FUNDEG, Guaxupé, n. 1, 2001. 13p.

FERREIRA, A. B. de H. Novo Aurélio século XXI: o dicionário da língua portuguesa. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 1999. ISBN 85-209-10106.

FILIN, S. Analysis and implementation of a laser strip adjustment model. In: Proceedings of the ISPRS Workshop on 3-D Reconstruction from Airborne Laserscanner and InSAR Data, 8-10 out. 2003, Dresden. 6p.

FILIN, S.; CSATHO, B. A novel approach for calibrating satellite laser altimeter systems. In: ISPRS Workshop on Mapping Surface Structure and Topography by Airborne and Spaceborne Lasers, 9-11 nov. 1999, La Jolla. IAPRS, v. 32, parte 3/W14, p. 47-54.

FLOOD, M. Airborne laser altimetry: a cost effective tool for mapping coastal zone topography. ICZM Journal, London, n. 2, seção 4, p. 179-183, out. 2000.

FLOOD, M. Industry directory. Disponível em: <<http://www.airbornelasermapping.com>>. Acesso em: 16 jun. 2003.

FLOOD, M. Laser altimetry: from science to commercial LIDAR mapping. PE&RS Journal, Bethesda, v. 67, n. 11, p. 1209-1218, nov. 2001.

FLOOD, M.; GUTELIUS, B. Commercial implications of topographic terrain mapping using scanning airborne laser RADAR. PE&RS Journal, Bethesda, v. 63, n. 4, p. 327-329 e 363-366, abr. 1997.

FLOOD, M.; SATALICH, J. LIDAR 101. POB Online, Troy, 28 mar. 2001. Disponível em: <<http://www.pobonline.com>>. Acesso em: 21 set. 2001.

FOWLER, R. The lowdown on LIDAR. EOM Magazine, Frederick, v. 9, n. 3, p. 27-30, mar. 2000.

FOWLER, R. Topographic LIDAR. In: MAUNE, D. F. (Ed.). Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual. Bethesda: ASPRS, 2001. cap. 7, p. 207-236.

FRASER, C.; JONAS, D.; TURTON, D. A. Report on 1998 airborne laser scanner trials. Melbourne: AAM Surveys Pty Limited, versão 2, 11 maio 2000. 43p.

GEMAEL, C. Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas. Curitiba: Editora UFPR, 1994. 319p. ISBN 85-85132-92-2.

GIRARDI, R. V.; CORDINI, J. Identificação de áreas de conflito entre a ocupação do solo urbano e a legislação: bairro Forquilha - São José/SC. In: Anais do 5º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário e Gestão Territorial, 6-10 out. 2002, Florianópolis.

GRANT, C. Uncertainty, error, and precision in quantitative measurements. Chemistry Teaching Laboratories, University of Oregon, jan. 1997. 5p.

GREJNER-BRZEZINSKA, D. A. Direct sensor orientation in airborne and land-based mapping applications. Ohio State University, Columbus, jun. 2001. Report n. 461, 52p.

GREJNER-BRZEZINSKA, D. A.; TOTH, C. Precision mapping of highway linear features. In: Proceedings of the ISPRS Congress on Geoinformation for All, 19., 16-23 jul. 2000, Amsterdam. p. 233-240.

HANCOCK, J. et al. Active laser RADAR for high-performance measurements. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, v. 2, 16-21 maio 1998, Leuven. p. 1465-1470.

HARDING, D. J. Principles of airborne laser altimeter terrain mapping. Greenbelt: NASA's Goddard Space Flight Center, 17 mar. 2000. 2p.

HARRINGTON, A. What's the difference between accuracy and precision?. GeoWorld Magazine, Chicago, v. 13, n. 10, p. 26-27, out. 2000.

HASKELL, L.; O'DONNELL, R. Stand straight up: a true ortho perspective on downtown Denver. ArcUser Magazine, Redlands, 4p., out.-dez. 2001.

HATGER, C. Assigning the 3rd dimension to roads by use of laser scanning data. In: ISPRS Symposia on Geospatial Theory, Processing and Applications, 8-12 jul. 2002, Ottawa. WG IV/6: Landscape Modelling and Visualization, v. 34, parte 4, 6p.

HENSLEY, S.; MUNJY, R.; ROSEN, P. Interferometric synthetic aperture radar (IFSAR). In: MAUNE, D. F. (Ed.). Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual. Bethesda: ASPRS, 2001. cap. 6, p. 142-206.

HERNANDES, P. Você sabia? In: Língua portuguesa. 29 jun. 2001, n. 33. Disponível em: <<http://www.paulohernandes.pro.br>>. Acesso em: 6 jan. 2004.

HONKAVAARA, E. et al. Investigations on system calibration of GPS/IMU and camera for direct georeferencing. In: Proceedings of the ISPRS Symposium on Photogrammetric Computer Vision, 9-13 set. 2002, Graz. IAPRS, v. 34, 3B, p. 85-89.

HOSS, H. DTM derivation with laser scanner data: promising results in Germany. GIM International Magazine, Lemmer, v. 10, p. 28-31, out. 1996.

HOUAISS, A.; VILLAR, M. de S. Dicionário eletrônico Houaiss da língua portuguesa. Versão para Windows 95, 98, Me, 2000, NT e XP. Rio de Janeiro: Editora Objetiva, Versão 1.0.5, ago. 2002.

HUISING, E. J.; PEREIRA, L. M. G. Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Zürich, v. 53, n. 5, p. 245-261, out. 1998.

HYYPÄ, J. et al. Elevation accuracy of laser scanning-derived digital terrain and target models in forest environment. In: EARSeL Workshop on LIDAR Remote Sensing of Land and Sea, 4., 16-17 jun. 2000, Dresden. 9p.

IAVARONE, A. Laser scanner fundamentals. Professional Surveyor Magazine, Frederick, v. 22, n. 9, set. 2002.

IBGE. Resolução PR n.º 22, de 21 de julho de 1983. Aprova as especificações e normas gerais para levantamentos geodésicos em território brasileiro. IBGE, CONCAR, Normas Cartográficas, Rio de Janeiro, 21 jul. 1983. Disponível em: <<http://www.concar.ibge.gov.br/CCA33.htm>>. Acesso em: 8 nov. 2002.

INMETRO. Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia. 2. ed. Brasília: SENAI/DN, 2000. 75p. Convênio SENAI/DN/INMETRO. ISBN 85-87090-90-9.

ISO. ISO 9000: quality management system - fundamentals and vocabulary. Oslo: ISO/TC 176, 2000. 29p.

ISO. ISO 19113: geographic information - quality principles. Oslo: ISO/TC 211, 2002. 29p.

ISO. ISO 19114: geographic information - quality evaluation procedures. Oslo: ISO/TC 211, 2003. 63p.

JONAS, D.; BYRNE, P. Airborne laser scanning: beyond its formative years. In: Spatial Sciences Conference - Spatial Knowledge without Boundaries, 22-27 set. 2003, Canberra. 14p.

KAPLAN, E. D. (Ed.) Understanding GPS: principles and applications. Boston: Artech House Publishers, 1996. 554p.

KARNAUKHOVA, E. Anotações ao controle de qualidade da produção cartográfica digital. Geodésia Online, Florianópolis, n. 4, 2001.

KARTSOUNIS, M.; HEYNS, F. J. Using 3-D data video imaging from an aerial laser altimetry survey in road user safety assessment and road asset management. In: IRF & ARF Asia Pacific Roads Conference, 1-5 set. 2002, Sydney. 8p.

KATZENBEISSER, R. About the calibration of LIDAR sensors. In: Proceedings of the ISPRS Workshop on 3-D Reconstruction from Airborne Laserscanner and InSAR Data, 8-10 out. 2003, Dresden. 6p.

KAVANAGH, B. F.; BIRD, G. Surveying: principles and applications. 4. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1996. 700p. ISBN 0-13-438300-1.

KELLY, A. Concept design of a scanning laser rangefinder for autonomous vehicles. Technical Report CMU-RI-TR-94-21. Pittsburgh: Carnegie Mellon University - Robotics Institute, maio 1994. 61p.

KILIAN, J.; HAALA, N.; ENGLICH, M. Capture and evaluation of airborne laser scanner data. In: Proceedings of the ISPRS Conference, 1996, Vienna. IAPRS, v. 32, parte 3/B3, p. 383-388.

KIM, H. et al. The fusion of photogrammetric image and laser scanning data. In: ASPRS Annual Conference, 2000, Washington. 6p.

KLEUSBERG, A.; KLAEDTKE, H.-G. Accuracy assessment of a digital height model derived from airborne synthetic aperture radar measurements. In: Photogrammetric Week, 47., 1999, Stuttgart. p. 139-143.

KNABENSCHUH, M.; PETZOLD, B. Data post-processing of laser scan data for countrywide DTM production. In: Photogrammetric Week, 47., 1999, Stuttgart. p. 233-240.

KOCAMAN, S. GPS and INS integration with Kalman filtering for direct georeferencing of airborne imagery. Institute of Geodesy and Photogrammetry, Zürich, jan. 2003. Geodetic Seminar Report, 37p.

KRABIL, W. B. et al. Accuracy of airborne laser altimetry over the Greenland ice sheet. International Journal of Remote Sensing, Dundee, v. 16. n. 7, p. 1211-1222, 1995.

LEAL, E. da M.; DALMOLIN, Q. Considerações sobre a classificação de documentos cartográficos. Geodésia Online, Florianópolis, n.1, 2002.

LEIK, A. GPS satellite surveying. 2. ed. Orone: John Wiley & Sons, 1995. 560p.

LEMESHEWSKY, G. P. Vegetation density mapping from multispectral and SAR imagery using artificial neural network technologies. In: Greater Everglades Ecosystem Restoration Science Conference, 11-15 dez. 2000, Naples. p. 112-113.

LEMMENS, M. J. P. M. Accurate height-information from airborne laser-altimetry. In: Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE, v. 1, 3-8 ago. 1997. p. 423-426.

LEMMENS, M. J. P. M. Height information from laser-altimetry for urban areas. GIS Development, Noida, p. 1-7, 8 abr. 2001.

LEMMENS, M. J. P. M.; FORTUIN, E. H. W. Error analysis of airborne laser altimetry. Delft: Survey Department Rijkswaterstaat, 1997. 70p.

LEMOS, R. C. de; SANTOS, R. D. dos. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 3. ed. Campinas: SBCS/Embrapa-CNPS, 1996. 83p.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. LIDAR. In: Remote sensing and image interpretation. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2000. p. 700-710.

LITHOPOULOS, E. The applanix approach to GPS/INS integration. In: Photogrammetric Week, 47., 1999, Stuttgart. p. 53-57.

LOHMANN, P. Laserscanning introduction. Hannover: Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Remote Sensing II Lecture, 2003. 31p.

LOHMANN, P.; KOCH, A.; SCHAEFFER, M. Approaches to the filtering of laser scanner data. In: Proceedings of the ISPRS Congress, 19., 16-23 jul. 2000, Amsterdam. IAPRS, v. 33, parte B3, p. 534-541.

LOHMANN, P.; KOCH, A. Quality assessment of laser-scanner-data. In: Proceedings of the ISPRS Workshop on Sensors and Mapping from Space, 27-30 set. 1999, Hannover. 9p. CD-ROM.

LOHR, U. High resolution laserscanning, not only for 3D-city models. In: Photogrammetric Week, 47., 1999, Stuttgart. p. 133-138.

LOHR, U. Laserscan DEM for various applications. In: ISPRS Symposium on GIS - Between Visions and Applications, 7-10 set. 1998, Stuttgart. IAPRS, v. 32, parte 4, p. 353-356.

LOHR, U.; EIBERT, M. The TopoSys laser scanner-system. In: Photogrammetric Week, 45., 1995, Stuttgart. p. 263-267.

MAAS, H.-G. Methods for measuring height and planimetry discrepancies in airborne laserscanner data. PE&RS Journal, Bethesda, v. 68, n. 9, p. 933-940, set. 2002.

MAAS, H.-G. Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data: user requirements and system performance. In: Photogrammetric Week, 49., 1-5 set. 2003, Stuttgart. p. 117-125.

MAUNE, D. F. et al. Introduction. In: MAUNE, D. F. (Ed.). Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual. Bethesda: ASPRS, 2001a. cap. 1, p. 1-34.

MAUNE, D. F.; BLAK, T. A.; CONSTANCE, E. W. DEM user requirements. In: MAUNE, D. F. (Ed.). Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual. Bethesda: ASPRS, 2001b. cap. 13, p. 441-460.

MAUNE, D. F.; HUFF, L. C.; GUENTHER, G. C. DEM user applications. In: MAUNE, D. F. (Ed.). Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual. Bethesda: ASPRS, 2001c. cap. 11, p. 367-394.

MAUNE, D. F.; MAITRA, J. B.; MCKAY, E. J. Accuracy standards. In: MAUNE, D. F. (Ed.). Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual. Bethesda: ASPRS, 2001d. cap. 3, p. 61-82.

MENEZES, D. L. de. Abecedário da teoria dos erros e do cálculo das compensações pelo método dos mínimos quadrados. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional, 1935. 188p.

MERCER, B. Comparing LIDAR and IFSAR: what can you expect? In: Photogrammetric Week, 48., 2001, Stuttgart. p. 227-237.

MOLANDER, C. W. Photogrammetry. In: MAUNE, D. F. (Ed.). Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual. Bethesda: ASPRS, 2001. cap. 5, p. 121-141.

MOREIRA, J. et al. Surface and ground topography determination in tropical rainforest areas using airborne interferometric SAR. In: Photogrammetric Week, 48., 2001, Stuttgart. p. 167-173.

MORIN, K; EL-SHEIMY, N. Post-mission adjustment methods of airborne laser scanning data. In: Proceedings of FIG International Congress, 22., 19-26 abr. 2002, Washington. 12p.

MOSTAFA, M. M. R. Quality control of direct georeferencing data. In: ISPRS Commission I Mid-Term Symposium, 10-15 nov. 2002, Denver. 6p.

MOSTAFA, M. M. R.; HUTTON, J. Airborne kinematic positioning and attitude determination without base stations. In: International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics, and Navigation, 4-8 jun. 2001a, Banff. 8p.

MOSTAFA, M. M. R.; HUTTON, J. Direct positioning and orientation systems. How do they work? What is the attainable accuracy? In: Proceedings of the ASPRS Annual Meeting, 23-27 abr. 2001b, St. Louis. 11p.

MOSTAFA, M. M. R.; HUTTON, J.; REID, B. GPS/IMU products: the Applanix approach. In: Photogrammetric Week, 48., set. 2001, Stuttgart. 22p.

MUSSI, R. O sensoriamento remoto e sua regulamentação. Revista Brasileira de Direito Aeroespacial, Rio de Janeiro, n. 86, jun. 2003.

NORTH CAROLINA GEODETIC SURVEY. LIDAR accuracy assessment report. North Carolina Cooperating Technical State Mapping Program, Phase I, 28 jun. 2001 a 1º jul. 2002. 61 relatórios.

NORTH CAROLINA GEODETIC SURVEY. LIDAR accuracy assessment report. North Carolina Cooperating Technical State Mapping Program, Phase II, 11 jul. 2003 a 22 abr. 2004. 39 relatórios.

OKUBO, T. Airborne laser measurement technology in Japan. In: FIG Working Week Conference, 6-11 maio 2001, Seoul. 11p.

OLIVEIRA, C. de. Dicionário cartográfico. 4. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1993. 646p. ISBN 85-240-0457-6.

OLLIER, S. et al. Comparing and classifying one-dimensional spatial patterns: an application to laser altimeter profiles. Remote Sensing of the Environment Interdisciplinary Journal, Amsterdam, v. 85, n. 4, p. 453-462, 15 jun. 2003.

OPETCH. ALTM - airborne laser terrain mapper: training manual. Toronto: Optech Inc., Document n. 195-090-04, Version 99B_gen, Release 1.1, fev. 2000a. 54p.

OPTECH. ALTM 2025 specifications. Toronto: Optech Inc., dez. 2000b. 1p.

OPTECH. ALTM demonstration CD. Toronto: Optech Inc., jan. 2001. CD-ROM.

OPETCH. GEOBrasil 2002 presentation. Toronto: Optech Inc., maio 2002a. 29p.

OPETCH. REALM survey suite: data processing manual. Toronto: Optech Inc., Document n. 195-090-06, Release 3.1, out. 2002b. 261p.

OSBORNE, K. et al. National Digital Elevation Program (NDEP). In: MAUNE, D. F. (Ed.). Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual. Bethesda: ASPRS, 2001. cap. 4, p. 83-120.

PEREIRA, L. M. G.; WICHERSON, R. J. Suitability of laser data for deriving geographical information: a case study in the context of management of fluvial zones. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Zürich, v. 54, n. 2-3, p. 105-109, 15 jul. 1999.

PETRIE, G. Warming up for the ISPRS Amsterdam: a look at current and future imagers, imagery & systems. Geoinformatics Magazine, Emmeloord, v. 3, n. 3, p. 36-43, abr./maio 2000.

PETZOLD, B.; AXELSSON, P. Results of the OEEPE working group on laser data acquisition. In: Proceedings of the ISPRS Congress, 19., 16-23 jul. 2000, Amsterdam. IAPRS, v. 33, parte B3, 6p.

PETZOLD, B.; REISS, P.; STÖSSEL, W. Laser scanning: surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Zürich, v. 54, n. 2-3, p. 95-104, 15 jul. 1999.

PETZOLD, B.; WALTER, V. Revision of topographic databases by satellite images. In: Proceedings of the ISPRS Workshop on Sensors and Mapping from Space, 27-30 set. 1999, Hannover. 9p. CD-ROM.

PFEIFER, N. et al. Interpolation of high quality ground models from laser scanner data in forested áreas. In: Proceedings of the Workshop on Mapping Surface and Topography by Airborne and Spaceborne Lasers, 9-11 nov. 1999, La Jolla. IAPRS, v. 32, 3/W14, p. 80-86.

RIAÑO, D. et al. Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling. Elsevier - Remote Sensing of the Environment Interdisciplinary Journal, Amsterdam, v. 86, n. 2, p. 177-186, 30 jul. 2003.

ROTTENSTEINER, F. et al. LIDAR activities at the viennese institute of photogrammetry and remote sensing. In: Proceedings of the LIDAR Workshop on Mapping Geo-Surficial Processes Using Laser Altimetry, 3., 7-9 out. 2002, Columbus. 17p.

SATALE, D. M.; KULKARNI, M. N. LIDAR in mapping. In: Proceedings of the Map India Conference, 6., 28-31 jan. 2003, Noida. 5p.

SATALICH, J. Error sources in airborne GPS positioning techniques. Los Angeles: Airborne 1 Corporation, 2001. 11p.

SCHENK, T.; SEO, S.; CSATHÓ, B. Accuracy study of airborne laser scanning data with photogrammetry. In: IAPRS, v. 34, parte 3/W4, 2001, Annapolis. p. 113-118.

SCHERZINGER, B. Precise robust positioning with inertial/GPS RTK. In: Proceedings of ION-GPS 2000, 20-23 set. 2000, Salt Lake City. 9p.

SCHERZINGER, B.; HUTTON, J.; MOSTAFA, M. Enabling technologies. In: MAUNE, D. F. (Ed.). Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual. Bethesda: ASPRS, 2001. cap. 10, p. 337-366.

SCHIEWE, J. Improving the integration of digital surface models. In: Proceedings of the ISPRS Symposium, 19., 16-23 jul. 2000, Amsterdam. IAPRS, v. 32, p. 807-813.

SCHULMEISTER, K. Standards. In: SCHRÖDER, K. (Ed.) Handbook on industrial laser safety. Wien: ARGELAS, ago. 2001. cap. 6. CD-ROM.

SCHWARZ, K.-P. Integrated airborne navigation systems for photogrammetry. In: Photogrammetric Week, 45., 11-14 set. 1995, Stuttgart. p. 139-153.

SEO, J.; HAN, S. Study on geographic information production using airborne laser scanning. In: FIG Working Week on New Technology for a New Century, 6-11 maio 2001, Seoul. 13p.

SHRESTHA, D. P.; ZINCH, J. A. Land use classification in mountainous areas: integration of image processing, digital elevation data and field knowledge. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Amsterdam, v. 3, n. 1, p. 78-85, 2001.

SHRESTHA, R. L. et al. Airborne laser swath mapping: accuracy assessment for surveying and mapping applications. Journal of American Congress on Surveying and Mapping, Gaithersburg, v. 59, n. 2, p. 83-94, 1999.

SKALLOUD, J. Direct georeferencing in aerial photogrammetric mapping. PE&RS Journal, Bethesda, v. 68, n. 3, p. 207-210, mar. 2002.

SKALLOUD, J. Optimizing georeferencing of airborne survey systems by INS/DGPS. Calgary: University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, mar. 1999a. 210p.

SKALLOUD, J. Problems in direct-georeferencing by INS/DGPS in the airborne environment. In: ISPRS Workshop on Direct Versus Indirect Methods of Sensor Orientation, Commission III, 25-26 nov. 1999b, Barcelona. 9p.

SKALLOUD, J.; SCHWARZ, K. P. Accurate orientation for airborne mapping systems. In: ISPRS Commission II Symposium on Data Integration - Systems and Techniques, 13-17 jul. 1998, Cambridge. p. 283-290.

SKONE, S.; EL-GIZAWY, M.; SHRESTHA, S. M. Analysis of differential GPS performance for marine users during solar maximum. Radio Science Journal of American Geophysical Union, v. 39, n. 1, 17 fev. 2004.

SLATTON, K. C.; CRAWFORD, M. M.; EVANS, B. L. Combining interferometric radar and laser altimeter data to improve estimates of topography. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 24-28 jul. 2000, Honolulu. p. 960-964.

SLOCUM, T. A. Thematic Cartography and Visualization. New Jersey: Prentice-Hall, 1999. 293p. ISBN 0-13-209776-1.

SMITH, S. L.; HOLLAND, D.; LONGLEY, P. Investigating the spatial structure of error in digital surface models derived from laser scanner data. In: Proceedings of the ISPRS Workshop on 3-D Reconstruction from Airborne Laserscanner and INSAR Data, 8-10 out. 2003, Dresden. 7p.

SOUZA, G. C. de; MAIA, T. C. B.; SILVA, C. A. U. da. Pontos GPS de apoio ao cadastro: análise de exatidão posicional entre diferentes condutas para obtenção de coordenadas. In: COBRAC 2002 - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, 5., 6-10 out. 2002, Florianópolis. CD-ROM.

SPIEGEL, M. R. Estatística. Tradução e revisão técnica de Pedro Consentino. 3. ed. São Paulo: Makron Books, 1993. 639p.

STERNER, H. Helicopter aerial laser ranging. In: EARSeL Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea, 3., 17-19 jul. 1997, Tallinn. 7p.

STIES, M. et al. Comparison of digital elevation data from airborne laser and interferometric SAR systems. In: Proceedings of the ISPRS Congress, 19., 16-23 jul. 2000, Amsterdam. IAPRS, v. 33, parte B3, p. 866-873.

STOVALL, S. H. Basic inertial navigation. China Lake: Naval Air Warfare Center Weapons Division (NAWCWD), 1997. 34p.

SURMANN, H. et al. Fast acquiring and analysis of three dimensional laser range data. In: International Workshop on Vision, Modelling and Visualization, 6., 21-23 nov. 2001, Stuttgart. p. 59-66.

THIEL, K.-H.; WEHR, A. Calibration procedures of the imaging laser altimeter and data processing. In: Proceedings of the ISPRS Workshop on Sensors and Mapping from Space, 27-30 set. 1999, Hannover. 7p. CD-ROM.

THOMAS, C. New applications for reflectorless lasers in drilling and blasting. In: Proceedings of the ISEE Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, 25., 1999, Cleveland. p. 41-55.

TURNER, A. K. Discover the importance of LIDAR technology. GeoWorld Magazine, Chicago, jan. 2001.

TURTON, D.; JONAS, D. Airborne laser scanning: a new technology for the supply of spatial data. Brisbane: AAM Geoscan Technical Papers, 1999. 9p.

VAN DER VEGT, J. W.; HOFFMANN, A. Airborne laser scanning reaches maturity: LIDAR hits the spot. Geoinformatics Magazine, Emmeloord, v. 4, n. 7, p. 32-39, set. 2001.

VARGAS, J. C. Densidade, paisagem urbana e vida da cidade: jogando um pouco de luz sobre o debate porto-alegrense. Arquitectos, especial 195, ago. 2003.

VENEZIANO, D.; HALLMARK, S.; SOULEYRETTE, R. Comparison of LIDAR and conventional mapping methods for highway corridor studies. Ames: Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, Final Report, out. 2002. 63p.

VOSSelman, G. Slope based filtering of laser altimetry data. In: Proceedings of the ISPRS Symposium, 19., 16-23 jul. 2000, Amsterdam. IAPRS, v. 32, p. 935-942.

VUOLO, J. H. Fundamentos da teoria de erros. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2002. 3ª reimpressão, 249p. ISBN 85-212-0056-0.

WAGNER, M. J. Seeing in 3-D without the glasses: new mapping systems makes data acquisition faster and less costly. EOM Magazine, Frederick, v. 4, n. 7, p. 51-53, jul. 1995.

WANG, J.; LEE, H. K.; RIZOS, R. GPS/INS integration: a performance sensitivity analysis. Wuhan University Journal of Nature Sciences, Wuhan, v. 8, n. 2B, p. 508-516, 2003.

WATSON, D. F. Contouring: a guide to the analysis and display of spatial data. New York: Elsevier Science Ltd - Pergamon, 1992. v. 10, 321p. ISBN 0-08-040286-0.

WEBSTER, T. L. et al. Using topographic LIDAR to map flood risk from storm-surge events for Charlottetown, Prince Edward Island, Canada. Canadian Journal of Remote Sensing, Ottawa, v. 30, n. 1, p. 64-76, fev. 2004.

WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning: an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Zürich, v. 54, n. 2-3, p. 68-82, 15 jul. 1999.

WEISZFLOG, W. (Ed.) Michaelis: moderno dicionário da língua portuguesa. São Paulo: Companhia Melhoramentos, 1998. ISBN 85-06-02759-4.

WEVER, C.; LINDENBERGER, J. Experiences of 10 years laser scanning. In: Photogrammetric Week, 47., 1999, Stuttgart. p. 125-132.

WOLF, M. Photogrammetric data capture and calculation for 3D city models. In: Photogrammetric Week, 47., 1999, Stuttgart. p. 305-312.

WRIGHT, C. W.; FRENCH, J. R. Comparison of aircraft attitude determination by GPS, INS, and airborne laser: preliminary results. In: Symposium of Meteorological Observation and Instrumentation, 11., 2001, Boston. p. 134-138.

ZHANG, J. A comparison of digital photogrammetric and LIDAR high resolution digital elevation models. Morgantown: West Virginia University, 2002. Dissertação, 52p.

ANEXO A - PLANEJAMENTO DE VÔO: LASERSCANNER x CÂMARA AÉREA

| PARÂMETROS | PLANEJAMENTO DE VÔO | |
|---|---------------------|----------------|
| | <i>Laserscanner</i> | Câmara Métrica |
| Licença (Ministério da Defesa) | X | X |
| Cliente | X | X |
| Serviço/Projeto | X | X |
| Aeroporto Base e Bases Alternativas | X | X |
| Tamanho da Área (Largura e Comprimento) | X | X |
| Altitude Média do Terreno | X | X |
| Altura de Vôo | X | X |
| Altitude de Vôo | X | X |
| Velocidade da Plataforma | X | X |
| Distância Focal | - | X |
| Escala das Fotografias | - | X |
| Número de Fotografias | - | X |
| FOV | X | X |
| IFOV | X | - |
| Taxa de Repetição do Laser | X | - |
| Frequência do <i>Scanner</i> | X | - |
| Divergência | X | - |
| Largura das Faixas | X | X |
| Número de Faixas | X | X |
| Comprimento das Faixas | X | X |
| Recobrimento Lateral | X | X |
| Recobrimento Longitudinal | - | X |
| Espaçamento dos Pontos | X | - |
| Densidade de Pontos | X | - |
| Tamanho dos Pontos | X | - |
| Condições Atmosféricas ⁽¹⁾ | X | X |
| Período do Dia ⁽²⁾ | - | X |
| Base Terrestre GPS ⁽³⁾ | X | X |
| Tempo de Vôo por Faixa | X | X |
| Tempo de Vôo Total | X | X |
| Relatório de Vôo | X | X |

FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. (2003)

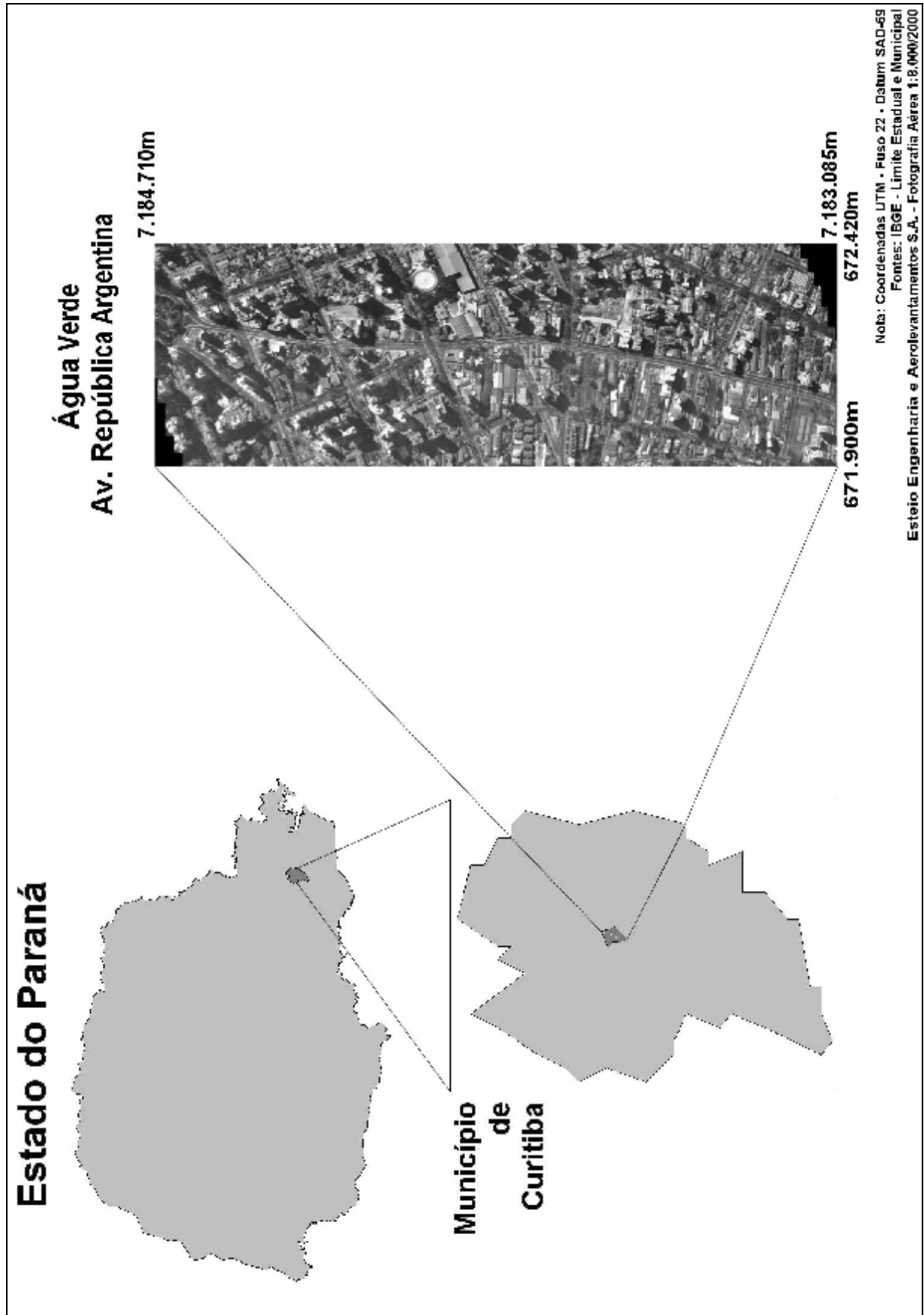
NOTA: Sinais convencionais utilizados: X Sim; - Não.

(1) Relativamente às seguintes condições: chuva, neve, vento, presença de nuvens ou dia muito claro (ensolarado).

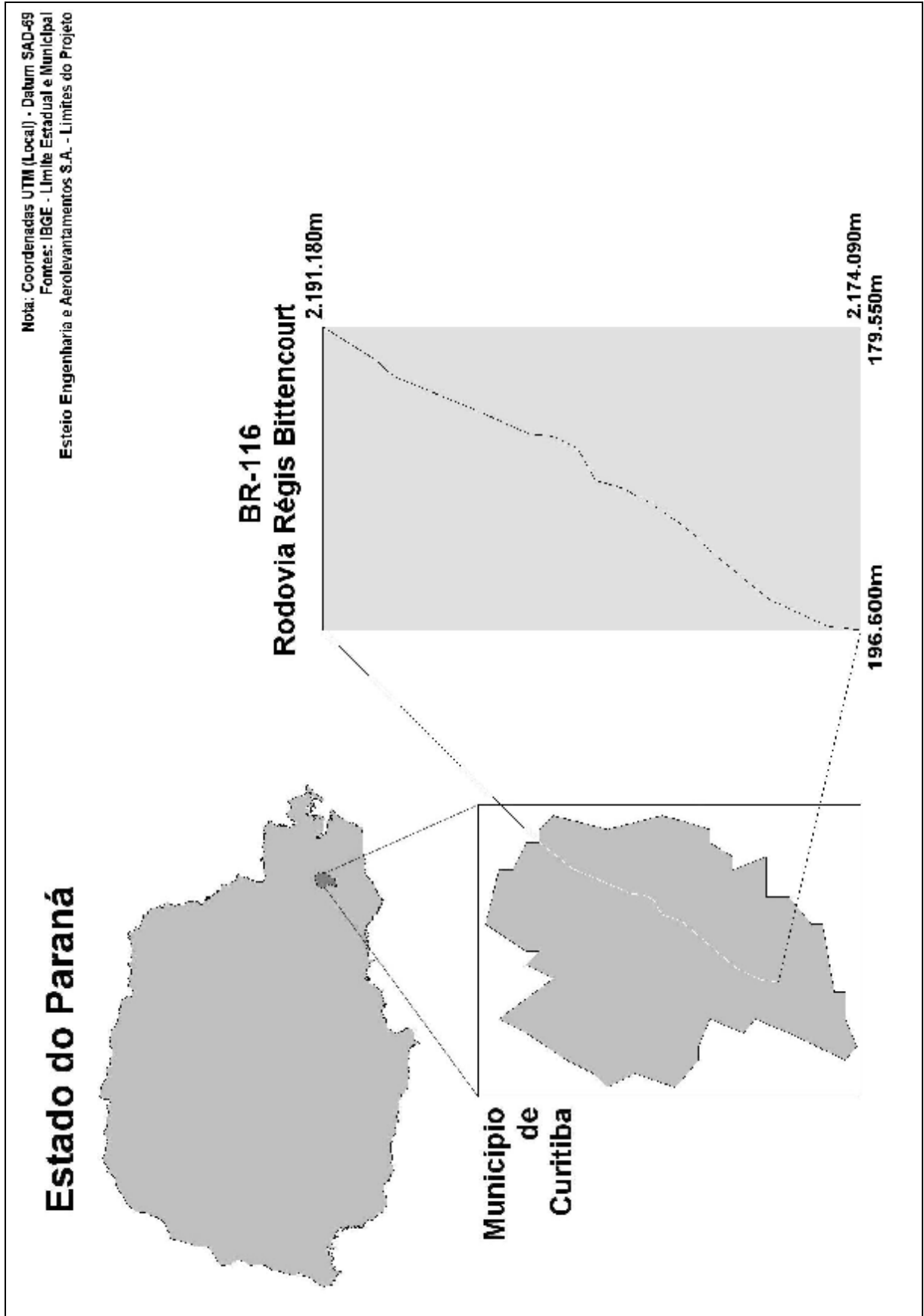
(2) Diurno ou noturno.

(3) No caso da câmara, somente quando o vôo é apoiado por GPS.

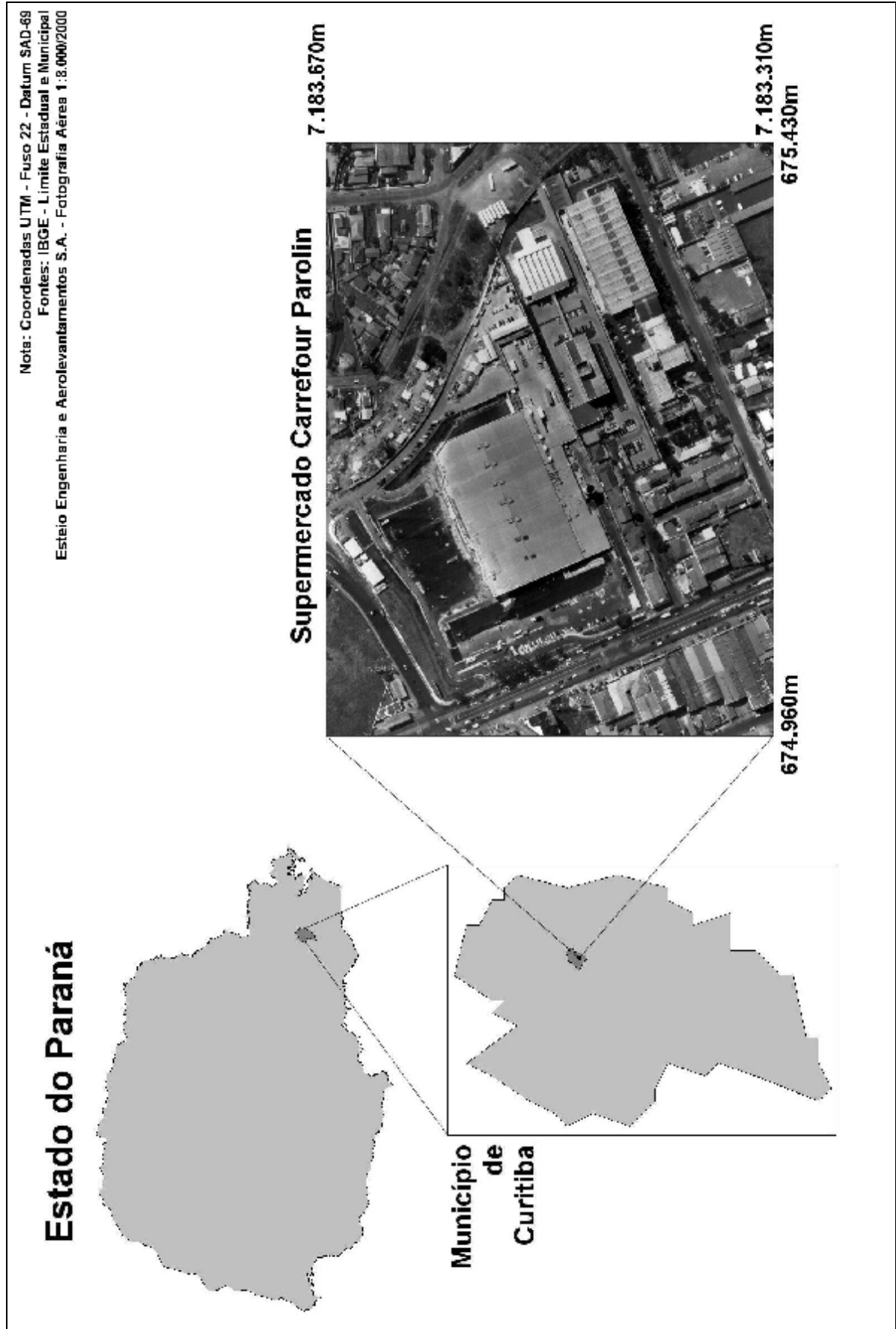
ANEXO B - MAPA DE LOCALIZAÇÃO: ÁGUA VERDE



ANEXO C - MAPA DE LOCALIZAÇÃO: BR-116



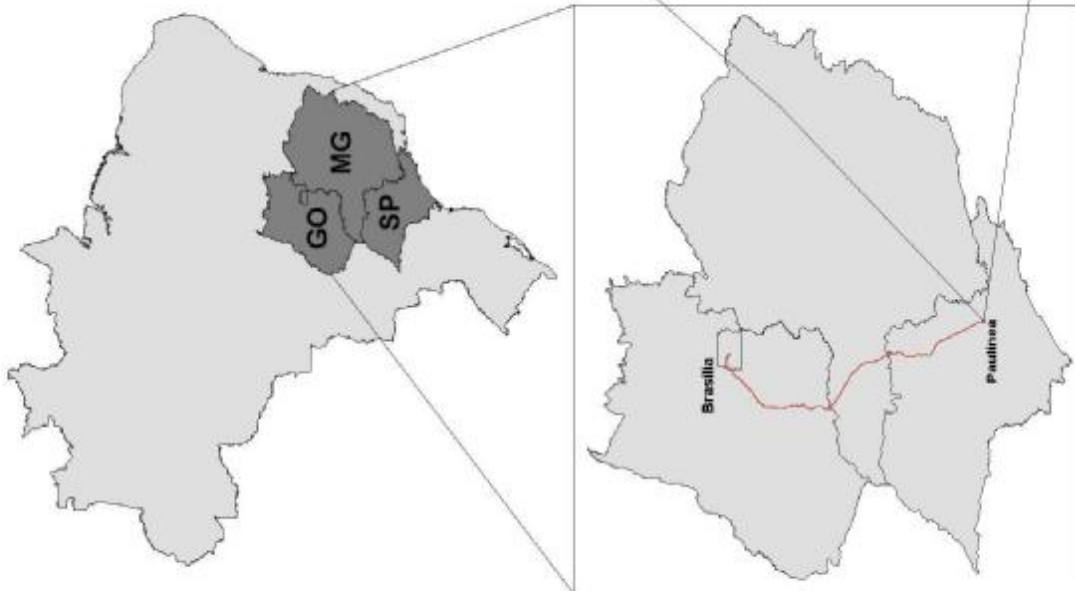
ANEXO D - MAPA DE LOCALIZAÇÃO: CARREFOUR



ANEXO E - MAPA DE LOCALIZAÇÃO: OSBRA/PETROBRAS

Abrangência do Projeto OSBRA/PETROBRAS

Nota: Coordenadas UTM - Fuso 23 - Datum SAD-69
Fontes: IBGE - Limite do País, Limites Estaduais e Localidades
Esteio Engenharia e Aerolevamentos S.A. - Limites do Projeto



Folhas 19 e 20 - OSBRA

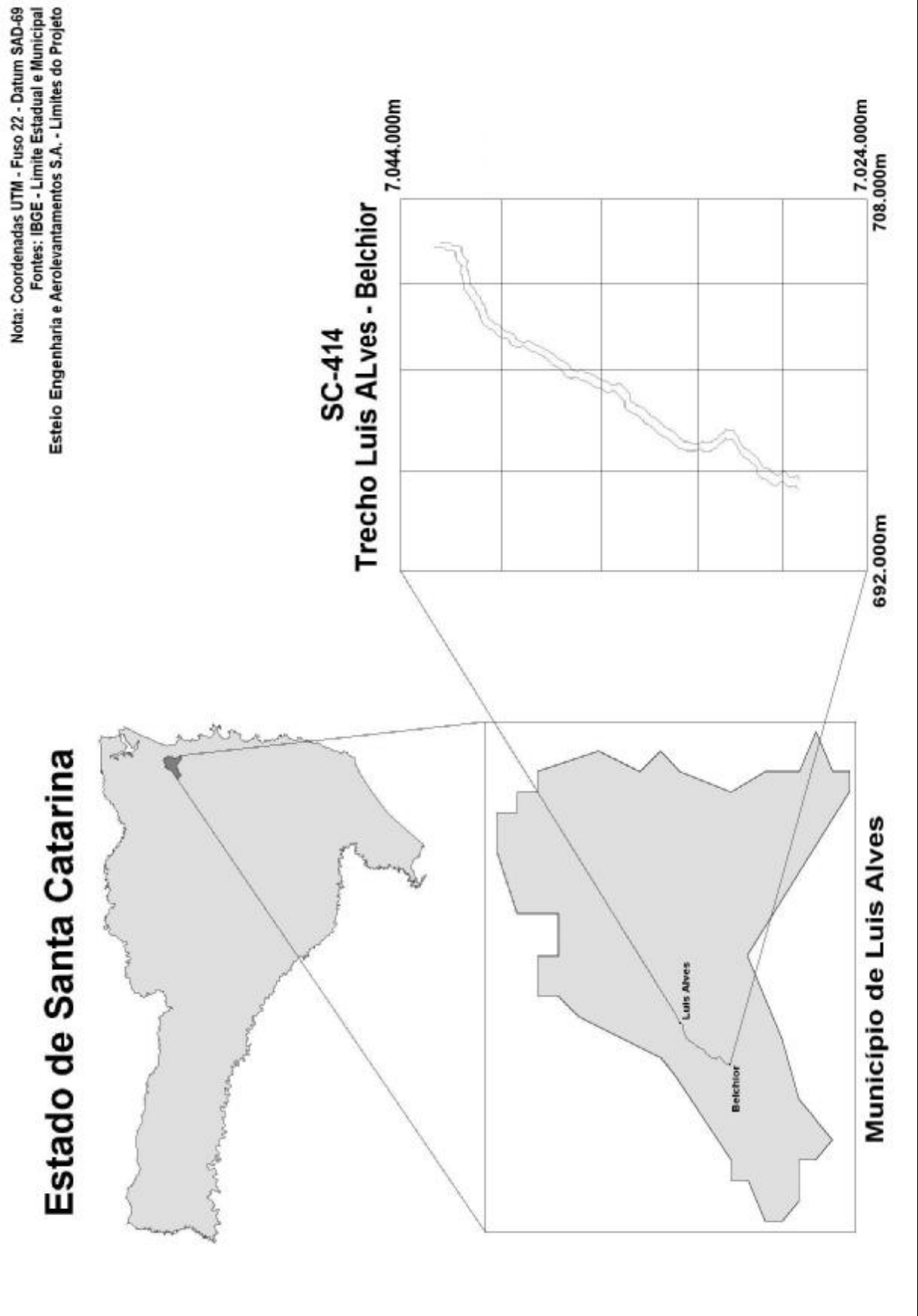
7.503.770m

278.720m

7.503.140m

279.400m

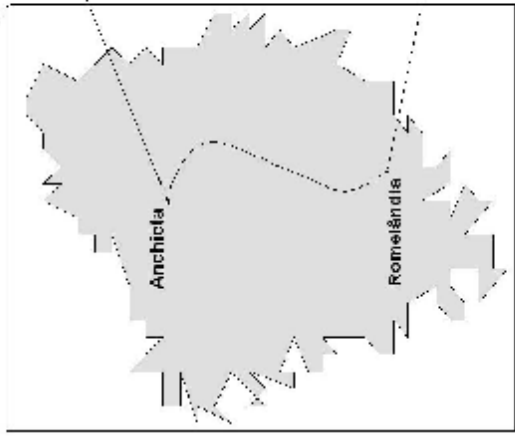
ANEXO F - MAPA DE LOCALIZAÇÃO: SC-414



ANEXO G - MAPA DE LOCALIZAÇÃO: SC-471

Nota: Coordenadas UTM - Fuso 22 - Datum SAD-69
Fontes: IBGE - Limite Estadual e Limites Municipais
Esteio Engenharia e Aerolevamentos S.A. - Limites do Projeto

Estado de Santa Catarina

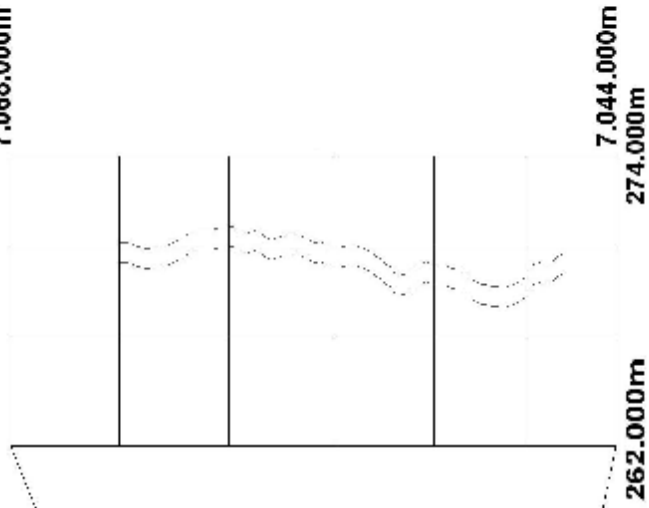


Municípios de Anchieta e Romelândia

SC-471

Trecho Anchieta - Romelândia

7.068.000m

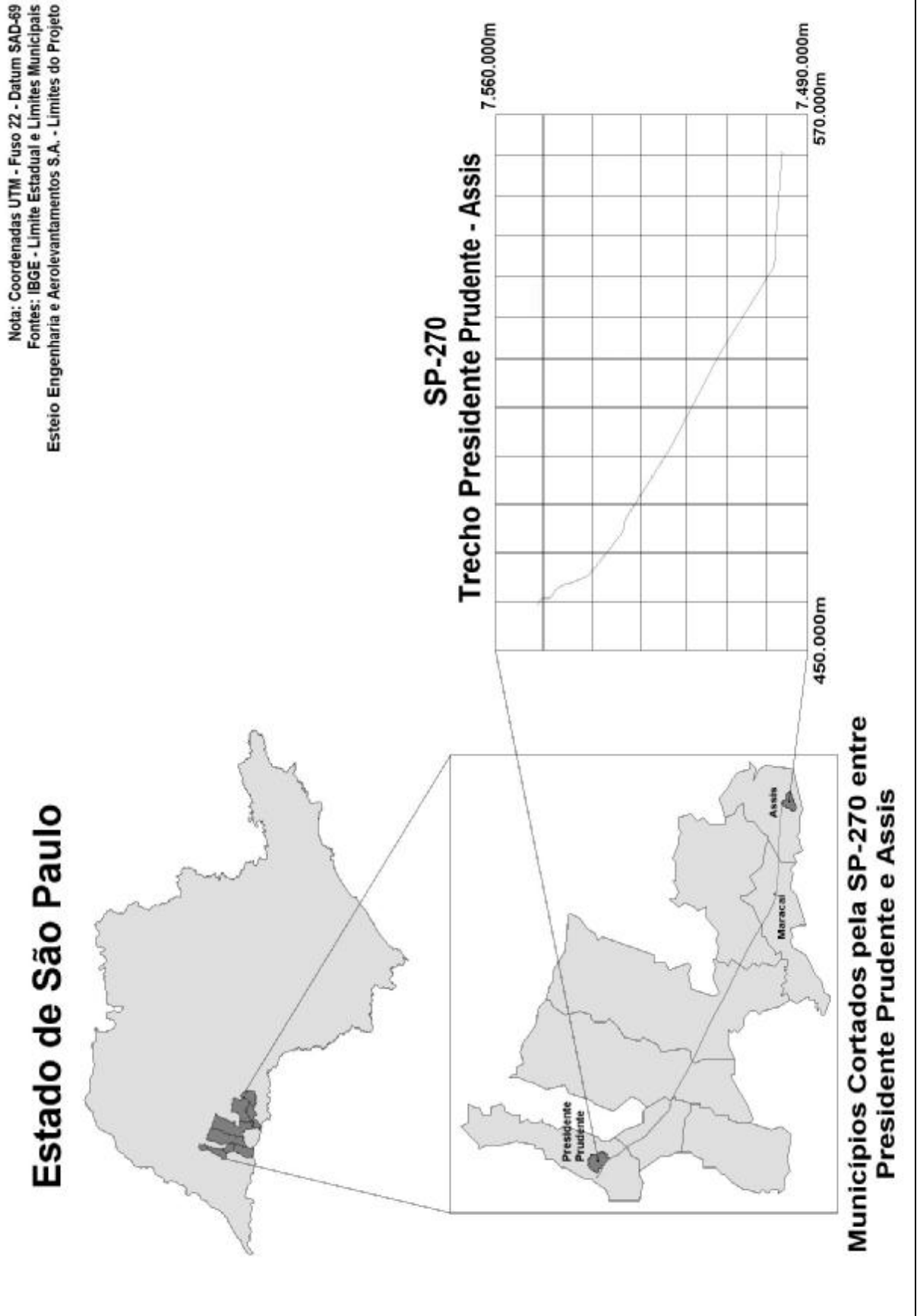


262.000m

7.044.000m

274.000m

ANEXO H - MAPA DE LOCALIZAÇÃO: SP-270



ANEXO I - PLANILHA DAS ESTATÍSTICAS COMPUTADAS: CARREFOUR

| Carrefour: Levantamento Topográfico | | | | Carrefour: Laser | | | | Diferenças | | | | Diferenças ao Quadrado | | | | Plano Hz | | 3D | |
|-------------------------------------|-------------|---------------|---------|------------------|---------------|---------|---------|------------|------------|------------|--------------|------------------------|--------------|-------|-------|----------|-------|----|--|
| Ponto | E | N | h | E | N | h | h | ΔE | ΔN | Δh | ΔE^2 | ΔN^2 | Δh^2 | Erro | Erro | Erro | Erro | | |
| 49 | 675.065,363 | 7.183.565,359 | 891.250 | 675.065,170 | 7.183.565,540 | 891.270 | 891,270 | -0,213 | 0,181 | 0,020 | 0,04537 | 0,03276 | 0,00040 | 0,280 | 0,280 | 0,280 | 0,280 | | |
| 109 | 675.133,131 | 7.183.548,746 | 892.414 | 675.133,480 | 7.183.548,830 | 892.360 | 892,360 | 0,349 | 0,084 | -0,054 | 0,12180 | 0,00706 | 0,00292 | 0,359 | 0,359 | 0,359 | 0,359 | | |
| 155 | 675.073,212 | 7.183.601,894 | 890.954 | 675.073,420 | 7.183.601,894 | 890,950 | 890,950 | 0,208 | 0,000 | -0,154 | 0,04326 | 0,00000 | 0,02372 | 0,208 | 0,208 | 0,208 | 0,208 | | |
| 180 | 675.035,353 | 7.183.440,588 | 896.524 | 675.035,570 | 7.183.440,588 | 896,510 | 896,510 | 0,217 | -0,088 | -0,014 | 0,04709 | 0,00774 | 0,00020 | 0,234 | 0,234 | 0,234 | 0,234 | | |
| 194 | 675.047,700 | 7.183.434,976 | 892.515 | 675.047,210 | 7.183.434,830 | 892,760 | 892,760 | -0,490 | -0,146 | 0,245 | 0,24010 | 0,02132 | 0,06003 | 0,511 | 0,511 | 0,511 | 0,511 | | |
| 249 | 675.068,048 | 7.183.527,210 | 892.365 | 675.067,870 | 7.183.526,950 | 892,140 | 892,140 | -0,178 | -0,260 | -0,225 | 0,03168 | 0,06760 | 0,05063 | 0,315 | 0,315 | 0,315 | 0,315 | | |
| 250 | 675.068,110 | 7.183.527,078 | 892.375 | 675.067,870 | 7.183.526,950 | 892,140 | 892,140 | -0,240 | -0,128 | -0,235 | 0,05760 | 0,01638 | 0,05523 | 0,272 | 0,272 | 0,272 | 0,272 | | |
| 251 | 675.068,042 | 7.183.526,944 | 892.119 | 675.067,870 | 7.183.526,950 | 892,140 | 892,140 | -0,172 | 0,006 | 0,021 | 0,02958 | 0,00004 | 0,00044 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | | |
| 263 | 675.064,559 | 7.183.525,817 | 892.065 | 675.064,480 | 7.183.525,820 | 892,110 | 892,110 | -0,079 | 0,003 | 0,045 | 0,00624 | 0,00001 | 0,00202 | 0,079 | 0,079 | 0,079 | 0,079 | | |
| 318 | 675.075,168 | 7.183.554,224 | 891.899 | 675.074,960 | 7.183.554,820 | 891,770 | 891,770 | -0,208 | 0,396 | 0,071 | 0,04326 | 0,15682 | 0,00504 | 0,447 | 0,447 | 0,447 | 0,447 | | |
| 337 | 675.095,069 | 7.183.548,320 | 891.978 | 675.095,250 | 7.183.548,250 | 891,990 | 891,990 | 0,181 | -0,070 | 0,012 | 0,03276 | 0,00490 | 0,00014 | 0,194 | 0,194 | 0,194 | 0,194 | | |
| 465 | 675.106,371 | 7.183.562,422 | 891.388 | 675.106,510 | 7.183.562,290 | 891,490 | 891,490 | 0,139 | -0,132 | 0,102 | 0,01932 | 0,01742 | 0,01040 | 0,192 | 0,192 | 0,192 | 0,192 | | |
| 474 | 675.114,753 | 7.183.566,025 | 891.377 | 675.114,870 | 7.183.566,000 | 891,340 | 891,340 | 0,117 | -0,025 | -0,037 | 0,01369 | 0,00063 | 0,00137 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | | |
| 605 | 675.107,725 | 7.183.573,462 | 890.505 | 675.107,910 | 7.183.573,290 | 890,490 | 890,490 | 0,185 | -0,162 | -0,015 | 0,03423 | 0,02624 | 0,00022 | 0,246 | 0,246 | 0,246 | 0,246 | | |
| 730 | 675.084,978 | 7.183.584,475 | 891.329 | 675.085,030 | 7.183.584,500 | 891,390 | 891,390 | 0,062 | 0,025 | 0,061 | 0,00270 | 0,00063 | 0,00372 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | | |
| 770 | 675.088,709 | 7.183.593,576 | 890.914 | 675.088,940 | 7.183.593,530 | 891,140 | 891,140 | 0,231 | -0,046 | 0,226 | 0,05336 | 0,00212 | 0,05108 | 0,236 | 0,236 | 0,236 | 0,236 | | |
| 801 | 675.080,887 | 7.183.594,030 | 891.298 | 675.080,760 | 7.183.594,030 | 891,260 | 891,260 | -0,127 | 0,000 | -0,038 | 0,01613 | 0,00000 | 0,00144 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | | |
| 870 | 675.088,111 | 7.183.546,293 | 892.080 | 675.088,410 | 7.183.546,290 | 892,140 | 892,140 | 0,286 | -0,003 | 0,069 | 0,08940 | 0,00001 | 0,00360 | 0,289 | 0,289 | 0,289 | 0,289 | | |
| 1001 | 675.063,154 | 7.183.554,275 | 891.593 | 675.063,260 | 7.183.554,370 | 891,740 | 891,740 | 0,106 | 0,095 | 0,147 | 0,01124 | 0,00902 | 0,02161 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | | |
| 1032 | 675.070,614 | 7.183.536,876 | 891.950 | 675.071,120 | 7.183.536,910 | 892,090 | 892,090 | 0,506 | 0,034 | 0,140 | 0,25604 | 0,00116 | 0,01960 | 0,507 | 0,507 | 0,507 | 0,507 | | |
| 1040 | 675.068,166 | 7.183.531,117 | 892.147 | 675.067,920 | 7.183.531,320 | 892,270 | 892,270 | -0,246 | 0,203 | 0,123 | 0,06052 | 0,04121 | 0,01513 | 0,319 | 0,319 | 0,319 | 0,319 | | |
| 1177 | 675.036,385 | 7.183.566,042 | 891.165 | 675.036,530 | 7.183.566,000 | 891,240 | 891,240 | 0,145 | -0,042 | 0,075 | 0,02103 | 0,00176 | 0,00563 | 0,151 | 0,151 | 0,151 | 0,151 | | |
| 1221 | 675.068,089 | 7.183.535,089 | 891.984 | 675.068,100 | 7.183.534,990 | 892,020 | 892,020 | 0,111 | -0,099 | 0,036 | 0,00012 | 0,00980 | 0,00130 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | | |
| 1227 | 675.044,474 | 7.183.568,954 | 891.181 | 675.044,760 | 7.183.569,080 | 891,270 | 891,270 | 0,286 | 0,126 | 0,089 | 0,08180 | 0,01568 | 0,00792 | 0,313 | 0,313 | 0,313 | 0,313 | | |
| 1228 | 675.044,303 | 7.183.568,931 | 891.178 | 675.044,760 | 7.183.569,080 | 891,270 | 891,270 | 0,457 | 0,149 | 0,092 | 0,20885 | 0,02220 | 0,00846 | 0,481 | 0,481 | 0,481 | 0,481 | | |
| 1394 | 675.030,562 | 7.183.561,355 | 891.229 | 675.030,800 | 7.183.561,660 | 891,140 | 891,140 | 0,038 | 0,305 | -0,089 | 0,00144 | 0,09302 | 0,00792 | 0,307 | 0,307 | 0,307 | 0,307 | | |
| 1396 | 675.031,523 | 7.183.559,420 | 891.275 | 675.031,550 | 7.183.559,540 | 891,270 | 891,270 | 0,027 | 0,120 | -0,005 | 0,00073 | 0,01440 | 0,00002 | 0,123 | 0,123 | 0,123 | 0,123 | | |
| 1435 | 675.036,740 | 7.183.574,921 | 891.205 | 675.036,740 | 7.183.574,540 | 891,360 | 891,360 | 0,000 | -0,381 | 0,155 | 0,00000 | 0,14516 | 0,02402 | 0,381 | 0,381 | 0,381 | 0,381 | | |
| 1574 | 675.010,180 | 7.183.557,264 | 891.328 | 675.010,210 | 7.183.557,250 | 891,370 | 891,370 | 0,050 | -0,014 | 0,042 | 0,00250 | 0,00020 | 0,00176 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | | |
| 1622 | 675.015,988 | 7.183.553,859 | 891.261 | 675.015,920 | 7.183.553,830 | 891,380 | 891,380 | -0,068 | -0,029 | 0,119 | 0,00462 | 0,00084 | 0,01416 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | | |
| 1628 | 675.006,969 | 7.183.551,112 | 891.280 | 675.007,230 | 7.183.550,990 | 891,340 | 891,340 | 0,261 | -0,122 | 0,060 | 0,06812 | 0,01488 | 0,00360 | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 | | |
| 1633 | 675.009,320 | 7.183.547,339 | 891.488 | 675.008,870 | 7.183.547,290 | 891,390 | 891,390 | -0,460 | -0,049 | -0,108 | 0,20250 | 0,00240 | 0,01166 | 0,463 | 0,463 | 0,463 | 0,463 | | |
| 1644 | 675.009,541 | 7.183.544,960 | 891.374 | 675.009,820 | 7.183.545,160 | 891,390 | 891,390 | 0,279 | 0,200 | 0,016 | 0,07784 | 0,04000 | 0,00026 | 0,343 | 0,343 | 0,343 | 0,343 | | |
| 1671 | 675.002,705 | 7.183.539,029 | 892.502 | 675.002,940 | 7.183.539,029 | 892,020 | 892,020 | 0,235 | 0,000 | 0,518 | 0,05522 | 0,00000 | 0,26832 | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 | | |
| 1696 | 675.009,539 | 7.183.537,157 | 891.539 | 675.009,800 | 7.183.536,700 | 891,510 | 891,510 | 0,261 | -0,467 | -0,029 | 0,06812 | 0,20885 | 0,00084 | 0,526 | 0,526 | 0,526 | 0,526 | | |
| 1835 | 675.027,239 | 7.183.516,024 | 891.970 | 675.027,120 | 7.183.516,040 | 892,130 | 892,130 | -0,119 | 0,016 | 0,160 | 0,01416 | 0,00026 | 0,02560 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | | |
| 1928 | 675.008,892 | 7.183.538,693 | 891.503 | 675.008,940 | 7.183.538,620 | 891,520 | 891,520 | 0,046 | -0,073 | 0,017 | 0,00230 | 0,00533 | 0,00029 | 0,087 | 0,087 | 0,087 | 0,087 | | |
| 2032 | 675.040,954 | 7.183.511,925 | 892.142 | 675.040,960 | 7.183.511,990 | 892,220 | 892,220 | 0,008 | 0,065 | 0,078 | 0,00004 | 0,00423 | 0,00608 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | | |
| 2035 | 675.044,647 | 7.183.515,903 | 892.130 | 675.044,660 | 7.183.516,040 | 892,210 | 892,210 | 0,013 | 0,137 | 0,080 | 0,00017 | 0,01877 | 0,00640 | 0,138 | 0,138 | 0,138 | 0,138 | | |
| 2073 | 675.022,376 | 7.183.555,525 | 891.274 | 675.022,480 | 7.183.555,950 | 891,390 | 891,390 | 0,104 | 0,425 | 0,116 | 0,01082 | 0,18062 | 0,01346 | 0,438 | 0,438 | 0,438 | 0,438 | | |

| | |
|-------|-------|
| Máx | 0,526 |
| Mín | 0,052 |
| Média | 0,249 |
| DP | 0,142 |

| | |
|-------|--------|
| Máx | 0,518 |
| Mín | -0,235 |
| Média | 0,049 |
| DP | 0,130 |

| | |
|-------|---------|
| Máx | 891,390 |
| Mín | 890,490 |
| Média | 891,270 |
| DP | 0,175 |

ANEXO J - PLANILHA DAS ESTATÍSTICAS COMPUTADAS: ÁGUA VERDE

| Água Verde: Restituição Vias (3D) | | | | Água Verde: Identificação Vias Laser | | | |
|-----------------------------------|-------------|---------------|---------|--------------------------------------|---------------|---------|---|
| Porto | E | N | h | h | E | N | h |
| 1 | 672.444,060 | 7.184.145,900 | 912.300 | 672.444,130 | 7.184.145,910 | 912.580 | |
| 2 | 672.448,780 | 7.184.131,320 | 913,030 | 672.448,470 | 7.184.132,110 | 912,890 | |
| 3 | 672.462,720 | 7.183.581,690 | 911,770 | 672.462,590 | 7.183.581,190 | 911,540 | |
| 4 | 672.464,990 | 7.184.136,860 | 912,050 | 672.464,770 | 7.184.136,610 | 912,300 | |
| 5 | 672.491,860 | 7.183.730,520 | 919,570 | 672.491,770 | 7.183.731,070 | 919,590 | |
| 6 | 672.508,230 | 7.183.990,430 | 918,030 | 672.508,410 | 7.183.990,060 | 917,570 | |
| 7 | 672.511,860 | 7.183.978,210 | 918,380 | 672.511,750 | 7.183.978,580 | 918,170 | |
| 8 | 672.513,660 | 7.183.977,460 | 918,360 | 672.513,410 | 7.183.976,780 | 918,260 | |
| 9 | 672.514,750 | 7.183.975,720 | 918,360 | 672.514,500 | 7.183.975,160 | 918,320 | |
| 10 | 672.524,880 | 7.183.993,730 | 917,150 | 672.524,540 | 7.183.994,030 | 917,690 | |
| 11 | 672.529,870 | 7.183.813,800 | 920,670 | 672.531,070 | 7.183.813,810 | 920,780 | |
| 12 | 672.532,220 | 7.183.827,150 | 920,750 | 672.532,540 | 7.183.826,160 | 920,980 | |
| 13 | 672.545,920 | 7.183.822,220 | 920,640 | 672.546,570 | 7.183.822,350 | 920,890 | |
| 14 | 672.603,530 | 7.184.018,100 | 915,670 | 672.603,290 | 7.184.017,810 | 915,840 | |
| 15 | 672.607,390 | 7.184.018,850 | 915,730 | 672.607,340 | 7.184.019,070 | 915,710 | |
| 16 | 672.609,830 | 7.184.017,880 | 915,750 | 672.610,290 | 7.184.018,070 | 915,710 | |
| 17 | 672.611,710 | 7.184.015,420 | 915,960 | 672.611,720 | 7.184.015,070 | 915,800 | |
| 18 | 672.669,680 | 7.183.611,750 | 914,860 | 672.669,380 | 7.183.611,480 | 914,720 | |
| 19 | 672.671,050 | 7.183.612,710 | 914,780 | 672.671,070 | 7.183.612,900 | 914,920 | |
| 20 | 672.739,740 | 7.184.263,740 | 906,460 | 672.739,470 | 7.184.263,700 | 906,340 | |
| 21 | 672.742,910 | 7.184.267,630 | 906,420 | 672.742,970 | 7.184.268,240 | 906,330 | |
| 22 | 672.748,180 | 7.183.389,090 | 906,590 | 672.748,290 | 7.183.389,410 | 906,320 | |
| 23 | 672.756,420 | 7.183.377,010 | 906,590 | 672.756,090 | 7.183.376,950 | 906,550 | |
| 24 | 672.761,740 | 7.183.649,750 | 908,230 | 672.761,520 | 7.183.649,740 | 907,720 | |
| 25 | 672.762,180 | 7.184.272,920 | 905,590 | 672.762,460 | 7.184.272,910 | 905,830 | |
| 26 | 672.763,780 | 7.183.651,260 | 907,720 | 672.763,570 | 7.183.650,770 | 907,770 | |
| 27 | 672.765,860 | 7.183.922,990 | 917,440 | 672.766,320 | 7.183.922,940 | 917,390 | |
| 28 | 672.765,910 | 7.183.649,130 | 907,770 | 672.766,290 | 7.183.649,280 | 907,640 | |
| 29 | 672.770,780 | 7.183.910,740 | 917,710 | 672.771,160 | 7.183.910,700 | 917,750 | |
| 30 | 672.775,110 | 7.183.925,590 | 917,040 | 672.775,110 | 7.183.925,740 | 917,410 | |
| 31 | 672.860,990 | 7.183.957,840 | 915,420 | 672.860,820 | 7.183.957,370 | 915,840 | |
| 32 | 672.862,900 | 7.183.951,530 | 915,860 | 672.863,220 | 7.183.951,520 | 916,060 | |
| 33 | 672.863,160 | 7.183.961,260 | 915,370 | 672.863,110 | 7.183.960,810 | 915,710 | |
| 34 | 672.863,410 | 7.183.963,880 | 915,330 | 672.863,770 | 7.183.964,320 | 915,590 | |
| 35 | 672.865,720 | 7.183.951,580 | 915,900 | 672.865,950 | 7.183.951,200 | 916,090 | |
| 36 | 672.913,860 | 7.183.795,230 | 918,720 | 672.914,590 | 7.183.795,070 | 919,000 | |
| 37 | 672.929,960 | 7.183.799,020 | 919,100 | 672.930,590 | 7.183.798,520 | 919,340 | |
| 38 | 672.931,230 | 7.183.818,000 | 919,080 | 672.932,110 | 7.183.817,370 | 919,280 | |
| 39 | 672.940,020 | 7.183.824,700 | 919,100 | 672.940,910 | 7.183.824,400 | 919,280 | |
| 40 | 672.950,460 | 7.183.821,070 | 919,410 | 672.950,570 | 7.183.821,700 | 919,340 | |

| |
|--------|
| 1,100 |
| -0,620 |
| 0,102 |
| 0,396 |

| |
|--------|
| 0,540 |
| -0,510 |
| 0,053 |
| 0,234 |

| |
|-------|
| 1,100 |
| 0,071 |
| 0,518 |
| 0,251 |

| Diferenças | | | | Diferenças ao Quadrado | | | | Plano Hz | | 3D |
|------------|--------|--------|---------|------------------------|---------|---------|-------|----------|-------|----|
| ΔE | ΔN | Δh | ΔE² | ΔN² | Δh² | Δh² | Erro | Erro | Erro | |
| 0,070 | 0,010 | 0,280 | 0,00490 | 0,00010 | 0,07840 | 0,07840 | 0,071 | 0,071 | 0,289 | |
| -0,310 | 0,790 | -0,130 | 0,09610 | 0,62410 | 0,01690 | 0,01690 | 0,849 | 0,849 | 0,859 | |
| -0,130 | -0,500 | -0,230 | 0,01690 | 0,25000 | 0,05290 | 0,05290 | 0,517 | 0,517 | 0,566 | |
| -0,220 | -0,250 | 0,250 | 0,04840 | 0,06250 | 0,06250 | 0,06250 | 0,333 | 0,333 | 0,416 | |
| -0,090 | 0,550 | 0,020 | 0,00810 | 0,30250 | 0,00040 | 0,00040 | 0,557 | 0,557 | 0,558 | |
| 0,180 | -0,370 | -0,460 | 0,03240 | 0,13690 | 0,21160 | 0,21160 | 0,411 | 0,411 | 0,617 | |
| -0,110 | 0,320 | -0,210 | 0,01210 | 0,10240 | 0,04410 | 0,04410 | 0,338 | 0,338 | 0,398 | |
| -0,150 | -0,680 | -0,100 | 0,02250 | 0,46240 | 0,01000 | 0,01000 | 0,696 | 0,696 | 0,703 | |
| -0,340 | -0,450 | -0,040 | 0,11560 | 0,20250 | 0,31360 | 0,31360 | 0,718 | 0,718 | 0,720 | |
| 0,300 | 0,300 | 0,540 | 0,09000 | 0,09000 | 0,29160 | 0,29160 | 0,463 | 0,463 | 0,705 | |
| 1,100 | 0,010 | 0,120 | 1,21000 | 0,00010 | 0,01440 | 0,01440 | 1,100 | 1,100 | 1,107 | |
| 0,320 | -0,990 | 0,230 | 0,10240 | 0,98010 | 0,05290 | 0,05290 | 1,040 | 1,040 | 1,066 | |
| 0,650 | 0,130 | 0,250 | 0,42250 | 0,01690 | 0,06250 | 0,06250 | 0,663 | 0,663 | 0,708 | |
| -0,240 | -0,290 | 0,170 | 0,05760 | 0,08410 | 0,02890 | 0,02890 | 0,376 | 0,376 | 0,413 | |
| -0,050 | 0,220 | -0,020 | 0,00250 | 0,04840 | 0,00040 | 0,00040 | 0,226 | 0,226 | 0,226 | |
| 0,460 | 0,190 | -0,040 | 0,21160 | 0,03610 | 0,00160 | 0,00160 | 0,498 | 0,498 | 0,489 | |
| 0,010 | -0,360 | -0,160 | 0,00010 | 0,12250 | 0,02560 | 0,02560 | 0,360 | 0,360 | 0,385 | |
| -0,200 | -0,260 | 0,140 | 0,04000 | 0,06760 | 0,01960 | 0,01960 | 0,328 | 0,328 | 0,367 | |
| 0,020 | 0,190 | 0,140 | 0,00040 | 0,03610 | 0,01960 | 0,01960 | 0,191 | 0,191 | 0,237 | |
| -0,270 | -0,040 | -0,120 | 0,07290 | 0,00160 | 0,01440 | 0,01440 | 0,273 | 0,273 | 0,298 | |
| 0,060 | 0,610 | -0,090 | 0,00360 | 0,37210 | 0,00810 | 0,00810 | 0,613 | 0,613 | 0,620 | |
| 0,110 | 0,320 | -0,270 | 0,01210 | 0,10240 | 0,07290 | 0,07290 | 0,338 | 0,338 | 0,433 | |
| -0,330 | -0,360 | -0,040 | 0,10890 | 0,12960 | 0,00160 | 0,00160 | 0,488 | 0,488 | 0,480 | |
| -0,220 | -0,010 | -0,510 | 0,04840 | 0,00010 | 0,26010 | 0,26010 | 0,220 | 0,220 | 0,556 | |
| 0,270 | 0,290 | 0,340 | 0,07290 | 0,08410 | 0,11560 | 0,11560 | 0,396 | 0,396 | 0,522 | |
| -0,210 | -0,490 | 0,050 | 0,04410 | 0,24010 | 0,00250 | 0,00250 | 0,533 | 0,533 | 0,535 | |
| 0,460 | -0,050 | -0,050 | 0,21160 | 0,00250 | 0,00250 | 0,00250 | 0,463 | 0,463 | 0,465 | |
| -0,620 | 0,150 | -0,130 | 0,38440 | 0,02250 | 0,01690 | 0,01690 | 0,638 | 0,638 | 0,651 | |
| 0,380 | -0,040 | 0,040 | 0,14440 | 0,00160 | 0,00160 | 0,00160 | 0,382 | 0,382 | 0,384 | |
| 0,000 | 0,150 | 0,370 | 0,00000 | 0,02250 | 0,13690 | 0,13690 | 0,150 | 0,150 | 0,399 | |
| -0,170 | -0,470 | 0,420 | 0,02890 | 0,22090 | 0,17640 | 0,17640 | 0,500 | 0,500 | 0,653 | |
| 0,320 | -0,010 | 0,200 | 0,10240 | 0,00010 | 0,04000 | 0,04000 | 0,320 | 0,320 | 0,377 | |
| -0,050 | -0,450 | 0,340 | 0,00250 | 0,20250 | 0,11560 | 0,11560 | 0,453 | 0,453 | 0,566 | |
| 0,360 | 0,440 | 0,260 | 0,12960 | 0,19360 | 0,06760 | 0,06760 | 0,569 | 0,569 | 0,625 | |
| 0,230 | -0,380 | 0,190 | 0,05290 | 0,14440 | 0,03610 | 0,03610 | 0,444 | 0,444 | 0,483 | |
| 0,730 | -0,160 | 0,280 | 0,53290 | 0,02560 | 0,07840 | 0,07840 | 0,747 | 0,747 | 0,798 | |
| 0,630 | -0,500 | 0,240 | 0,39690 | 0,25000 | 0,05760 | 0,05760 | 0,804 | 0,804 | 0,839 | |
| 0,880 | -0,630 | 0,010 | 0,77440 | 0,39690 | 0,00010 | 0,00010 | 1,062 | 1,062 | 1,082 | |
| 0,890 | -0,300 | 0,180 | 0,79210 | 0,09000 | 0,03240 | 0,03240 | 0,939 | 0,939 | 0,962 | |
| 0,120 | 0,630 | -0,070 | 0,01440 | 0,39690 | 0,00490 | 0,00490 | 0,641 | 0,641 | 0,645 | |

ANEXO K - PLANILHA DAS ESTATÍSTICAS COMPUTADAS: BR-116

| BR-116: Pontos de Topografia | | | | BR-116: Pontos Laser | | | | Diferenças | | | | Diferenças ao Quadrado | | | | Plano Hz | | 3D |
|------------------------------|-------------|---------------|---------|----------------------|-------------|---------------|---------|------------|------------|------------|--------------|------------------------|--------------|-------|-------|----------|--|----|
| Porto | E | N | h | h | E | N | h | ΔE | ΔN | Δh | ΔE^2 | ΔN^2 | Δh^2 | Erro | Erro | Erro | | |
| 1 | 174.806.238 | 2.182.753.880 | 882.185 | 882.185 | 174.806.530 | 2.182.753.560 | 882.050 | 0.292 | -0.120 | -0.135 | 0.08526 | 0.01440 | 0.01822 | 0.316 | 0.343 | 0.343 | | |
| 2 | 174.858.893 | 2.182.818.888 | 877.881 | 877.881 | 174.858.610 | 2.182.819.190 | 877.770 | -0.283 | 0.302 | -0.111 | 0.08009 | 0.09120 | 0.01232 | 0.414 | 0.429 | 0.429 | | |
| 3 | 174.897.567 | 2.182.921.280 | 875.970 | 875.970 | 174.897.430 | 2.182.921.320 | 875.730 | -0.137 | 0.040 | -0.240 | 0.01877 | 0.00160 | 0.05760 | 0.143 | 0.279 | 0.279 | | |
| 4 | 174.897.570 | 2.182.895.841 | 875.617 | 875.617 | 174.897.560 | 2.182.896.110 | 875.300 | -0.010 | 0.489 | -0.317 | 0.00010 | 0.21996 | 0.10049 | 0.489 | 0.566 | 0.566 | | |
| 5 | 174.906.927 | 2.182.903.919 | 875.857 | 875.857 | 174.906.990 | 2.182.903.880 | 876.100 | 0.063 | -0.039 | 0.243 | 0.00397 | 0.00152 | 0.05905 | 0.074 | 0.254 | 0.254 | | |
| 6 | 174.907.460 | 2.182.902.590 | 876.730 | 876.730 | 174.907.415 | 2.182.902.770 | 876.552 | -0.045 | 0.180 | -0.178 | 0.00202 | 0.03240 | 0.03168 | 0.186 | 0.257 | 0.257 | | |
| 7 | 174.948.893 | 2.183.278.098 | 881.818 | 881.818 | 174.948.480 | 2.183.278.460 | 881.840 | -0.213 | 0.362 | -0.122 | 0.04520 | 0.13133 | 0.01493 | 0.420 | 0.438 | 0.438 | | |
| 8 | 174.991.121 | 2.183.361.058 | 882.650 | 882.650 | 174.990.940 | 2.183.361.030 | 882.710 | -0.181 | -0.028 | 0.060 | 0.03276 | 0.00078 | 0.00360 | 0.183 | 0.193 | 0.193 | | |
| 9 | 174.996.204 | 2.183.364.127 | 882.625 | 882.625 | 174.996.250 | 2.183.364.180 | 882.460 | 0.046 | 0.063 | -0.165 | 0.00212 | 0.00281 | 0.02722 | 0.070 | 0.179 | 0.179 | | |
| 10 | 175.006.757 | 2.183.407.170 | 882.157 | 882.157 | 175.007.040 | 2.183.406.740 | 882.110 | 0.283 | -0.430 | -0.047 | 0.08009 | 0.18490 | 0.00221 | 0.515 | 0.517 | 0.517 | | |
| 11 | 175.006.820 | 2.183.407.740 | 883.150 | 883.150 | 175.007.198 | 2.183.406.958 | 883.150 | 0.278 | -0.782 | 0.000 | 0.07728 | 0.61152 | 0.00000 | 0.830 | 0.830 | 0.830 | | |
| 12 | 175.008.503 | 2.183.405.282 | 882.345 | 882.345 | 175.009.000 | 2.183.405.300 | 882.580 | 0.497 | 0.018 | 0.235 | 0.24701 | 0.00032 | 0.05523 | 0.487 | 0.550 | 0.550 | | |
| 13 | 175.008.587 | 2.183.429.901 | 885.299 | 885.299 | 175.008.510 | 2.183.430.430 | 885.140 | -0.077 | 0.529 | -0.159 | 0.00593 | 0.27984 | 0.02528 | 0.535 | 0.558 | 0.558 | | |
| 14 | 175.011.678 | 2.183.402.691 | 884.222 | 884.222 | 175.011.460 | 2.183.402.770 | 884.010 | -0.212 | 0.078 | -0.212 | 0.04752 | 0.00624 | 0.04484 | 0.232 | 0.314 | 0.314 | | |
| 15 | 175.023.551 | 2.183.015.802 | 881.415 | 881.415 | 175.023.730 | 2.183.015.940 | 881.500 | 0.179 | 0.138 | 0.085 | 0.03204 | 0.01904 | 0.00723 | 0.226 | 0.241 | 0.241 | | |
| 16 | 175.027.745 | 2.182.978.881 | 881.052 | 881.052 | 175.027.330 | 2.182.978.950 | 881.030 | -0.415 | 0.069 | -0.022 | 0.17223 | 0.00476 | 0.00048 | 0.421 | 0.421 | 0.421 | | |
| 17 | 175.030.714 | 2.183.000.831 | 881.835 | 881.835 | 175.031.020 | 2.183.000.260 | 881.880 | 0.306 | -0.571 | 0.045 | 0.09364 | 0.32604 | 0.00202 | 0.648 | 0.649 | 0.649 | | |
| 18 | 175.032.249 | 2.183.004.878 | 882.986 | 882.986 | 175.032.910 | 2.183.004.190 | 882.800 | 0.361 | -0.688 | -0.086 | 0.13032 | 0.47334 | 0.00740 | 0.777 | 0.782 | 0.782 | | |
| 19 | 175.052.738 | 2.183.553.402 | 890.225 | 890.225 | 175.052.720 | 2.183.553.660 | 889.940 | -0.018 | -0.285 | -0.285 | 0.00031 | 0.06662 | 0.08128 | 0.259 | 0.385 | 0.385 | | |
| 20 | 175.058.889 | 2.183.344.540 | 886.094 | 886.094 | 175.058.990 | 2.183.344.720 | 886.740 | 0.301 | 0.180 | -0.354 | 0.09060 | 0.03240 | 0.12532 | 0.351 | 0.498 | 0.498 | | |
| 21 | 175.060.664 | 2.183.344.213 | 886.034 | 886.034 | 175.060.390 | 2.183.344.070 | 886.340 | -0.274 | -0.143 | 0.306 | 0.07508 | 0.02045 | 0.09364 | 0.309 | 0.435 | 0.435 | | |
| 22 | 175.070.790 | 2.183.684.929 | 889.000 | 889.000 | 175.071.140 | 2.183.684.450 | 888.900 | 0.350 | -0.479 | -0.100 | 0.12229 | 0.22954 | 0.01000 | 0.583 | 0.602 | 0.602 | | |
| 23 | 175.078.469 | 2.183.465.144 | 893.133 | 893.133 | 175.079.110 | 2.183.465.080 | 893.270 | 0.641 | -0.064 | 0.137 | 0.41088 | 0.00410 | 0.01877 | 0.644 | 0.659 | 0.659 | | |
| 24 | 175.083.885 | 2.183.701.048 | 889.000 | 889.000 | 175.084.070 | 2.183.700.980 | 889.050 | 0.385 | -0.088 | 0.050 | 0.14815 | 0.00457 | 0.00250 | 0.391 | 0.394 | 0.394 | | |
| 25 | 175.087.082 | 2.183.512.716 | 889.580 | 889.580 | 175.087.090 | 2.183.512.210 | 889.500 | 0.008 | -0.506 | -0.080 | 0.00006 | 0.25604 | 0.00640 | 0.506 | 0.512 | 0.512 | | |
| 26 | 175.087.720 | 2.183.512.151 | 890.108 | 890.108 | 175.087.990 | 2.183.512.550 | 890.220 | 0.270 | 0.399 | 0.112 | 0.07290 | 0.15920 | 0.01254 | 0.482 | 0.495 | 0.495 | | |
| 27 | 175.095.364 | 2.183.537.230 | 889.168 | 889.168 | 175.095.150 | 2.183.536.910 | 889.480 | -0.214 | -0.320 | 0.312 | 0.04580 | 0.10240 | 0.09734 | 0.385 | 0.466 | 0.466 | | |
| 28 | 175.104.544 | 2.183.459.312 | 898.229 | 898.229 | 175.104.540 | 2.183.459.080 | 897.850 | -0.004 | -0.232 | -0.379 | 0.00002 | 0.05382 | 0.14364 | 0.232 | 0.444 | 0.444 | | |
| 29 | 175.107.763 | 2.183.564.476 | 891.256 | 891.256 | 175.107.940 | 2.183.564.730 | 891.370 | 0.177 | 0.264 | 0.114 | 0.03133 | 0.06452 | 0.01300 | 0.310 | 0.330 | 0.330 | | |
| 30 | 175.133.089 | 2.183.663.008 | 891.845 | 891.845 | 175.132.800 | 2.183.663.200 | 891.960 | -0.289 | 0.298 | -0.165 | 0.03474 | 0.08904 | 0.02709 | 0.352 | 0.388 | 0.388 | | |
| 31 | 175.133.089 | 2.183.663.008 | 891.947 | 891.947 | 175.132.800 | 2.183.663.200 | 891.960 | -0.289 | 0.192 | 0.013 | 0.08323 | 0.03690 | 0.00017 | 0.347 | 0.347 | 0.347 | | |
| 32 | 175.141.007 | 2.183.493.605 | 907.135 | 907.135 | 175.141.010 | 2.183.493.550 | 907.120 | 0.003 | -0.065 | -0.015 | 0.00001 | 0.00303 | 0.00022 | 0.055 | 0.057 | 0.057 | | |
| 33 | 175.152.830 | 2.183.641.731 | 893.470 | 893.470 | 175.153.050 | 2.183.641.060 | 893.130 | 0.220 | -0.671 | -0.340 | 0.04844 | 0.45078 | 0.11540 | 0.707 | 0.784 | 0.784 | | |
| 34 | 175.161.699 | 2.183.675.258 | 892.614 | 892.614 | 175.161.670 | 2.183.675.460 | 892.500 | -0.029 | 0.202 | -0.114 | 0.00083 | 0.04080 | 0.01297 | 0.204 | 0.234 | 0.234 | | |
| 35 | 175.195.870 | 2.183.650.113 | 894.000 | 894.000 | 175.195.860 | 2.183.649.520 | 894.230 | -0.010 | -0.593 | 0.230 | 0.00010 | 0.35165 | 0.05290 | 0.593 | 0.636 | 0.636 | | |
| 36 | 175.196.854 | 2.183.669.226 | 894.761 | 894.761 | 175.196.580 | 2.183.669.200 | 894.410 | -0.074 | -0.351 | -0.074 | 0.00548 | 0.00068 | 0.02320 | 0.078 | 0.360 | 0.360 | | |
| 37 | 175.211.989 | 2.183.677.192 | 894.192 | 894.192 | 175.211.710 | 2.183.677.100 | 893.820 | -0.279 | -0.092 | -0.572 | 0.07762 | 0.00846 | 0.32718 | 0.293 | 0.643 | 0.643 | | |
| 38 | 175.282.810 | 2.183.695.890 | 895.000 | 895.000 | 175.282.750 | 2.183.695.610 | 894.980 | -0.160 | -0.280 | -0.020 | 0.02560 | 0.07823 | 0.00040 | 0.322 | 0.322 | 0.322 | | |
| 39 | 175.315.147 | 2.183.688.798 | 894.513 | 894.513 | 175.315.000 | 2.183.688.610 | 894.230 | -0.147 | -0.188 | -0.283 | 0.02164 | 0.03516 | 0.08015 | 0.238 | 0.370 | 0.370 | | |
| 40 | 175.348.029 | 2.183.785.509 | 894.638 | 894.638 | 175.348.000 | 2.183.785.370 | 894.700 | -0.029 | -0.139 | 0.062 | 0.00084 | 0.01932 | 0.00384 | 0.142 | 0.155 | 0.155 | | |

Máx
Mín
Média
DP

0,641
-0,415
0,044
0,247

Máx
Mín
Média
DP

0,830
0,065
0,369
0,198

ANEXO L - PLANILHA DAS ESTATÍSTICAS COMPUTADAS: OSBRA

| OSBRA: Diferenças entre Grades | | |
|--------------------------------|-------------|--------|
| E | H | Δh |
| 278929,640 | 7503386,580 | -0,030 |
| 278929,730 | 7503385,840 | 0,000 |
| 278929,810 | 7503386,630 | -0,010 |
| 278929,840 | 7503384,980 | 0,020 |
| 278929,840 | 7503386,910 | -0,020 |
| 278929,900 | 7503384,550 | -0,050 |
| 278930,030 | 7503383,550 | -0,110 |
| 278930,130 | 7503387,390 | -0,030 |
| 278930,190 | 7503384,030 | -0,120 |
| 278930,200 | 7503387,510 | -0,030 |
| 278930,220 | 7503382,030 | 0,000 |
| 278930,240 | 7503381,860 | 0,010 |
| 278930,240 | 7503381,900 | 0,010 |
| 278930,270 | 7503387,630 | -0,030 |
| 278930,350 | 7503381,770 | 0,020 |
| 278930,360 | 7503381,810 | 0,020 |
| 278930,400 | 7503381,930 | 0,020 |
| 278930,720 | 7503388,390 | -0,030 |
| 278930,820 | 7503383,270 | -0,020 |
| 278930,950 | 7503386,930 | 0,000 |
| 278931,110 | 7503384,170 | -0,080 |
| 278931,340 | 7503384,910 | 0,040 |
| 278931,440 | 7503380,880 | -0,030 |
| 278931,590 | 7503380,790 | -0,040 |
| 278931,600 | 7503380,870 | -0,030 |
| 278931,620 | 7503381,240 | -0,030 |
| 278931,700 | 7503382,200 | -0,050 |
| 278931,730 | 7503381,180 | -0,020 |
| 278931,740 | 7503380,630 | -0,060 |
| 278931,830 | 7503386,440 | 0,020 |
| 278931,860 | 7503384,280 | -0,140 |
| 278931,900 | 7503384,880 | -0,020 |
| 278931,970 | 7503381,870 | -0,020 |
| 278931,980 | 7503380,440 | -0,080 |
| 278932,010 | 7503386,340 | 0,000 |
| 278932,060 | 7503390,620 | 0,020 |
| 278932,080 | 7503387,230 | 0,000 |
| 278932,130 | 7503387,450 | -0,010 |
| 278932,290 | 7503388,220 | -0,010 |
| 278932,760 | 7503379,940 | -0,110 |
| 278932,770 | 7503379,990 | -0,110 |
| 278932,790 | 7503390,570 | 0,000 |
| 278932,830 | 7503379,940 | -0,110 |
| 278932,860 | 7503380,540 | -0,080 |
| 278932,880 | 7503384,440 | -0,100 |
| 278932,890 | 7503380,750 | -0,080 |
| 278933,010 | 7503387,430 | -0,010 |
| 278933,020 | 7503384,830 | -0,030 |
| 278933,130 | 7503392,150 | 0,050 |
| 278933,150 | 7503379,480 | -0,170 |
| 278933,250 | 7503392,320 | 0,060 |
| 278933,260 | 7503380,310 | -0,060 |
| 278933,300 | 7503385,620 | -0,020 |
| 278933,300 | 7503391,110 | 0,000 |
| 278933,340 | 7503392,450 | 0,060 |
| 278933,410 | 7503391,330 | 0,000 |
| 278933,430 | 7503391,220 | 0,000 |

| | | | |
|---------------|------------|-------------|--------|
| Máximo | 279188,610 | 7503505,830 | 1,050 |
| Mínimo | 278929,640 | 7503261,990 | -1,240 |
| Média | | | 0,177 |
| DP | | | 0,221 |

| | | |
|------------|-------------|--------|
| 279183,980 | 7503386,680 | -0,120 |
| 279184,010 | 7503385,070 | -0,070 |
| 279184,050 | 7503386,300 | -0,100 |
| 279184,160 | 7503385,560 | -0,080 |
| 279184,190 | 7503386,860 | -0,110 |
| 279184,210 | 7503385,280 | -0,070 |
| 279184,420 | 7503397,100 | 0,160 |
| 279184,580 | 7503394,720 | 0,060 |
| 279184,610 | 7503399,040 | 0,290 |
| 279184,710 | 7503399,280 | 0,290 |
| 279184,760 | 7503390,450 | 0,060 |
| 279184,930 | 7503399,050 | 0,300 |
| 279185,210 | 7503391,320 | -0,010 |
| 279185,220 | 7503402,110 | 0,150 |
| 279185,280 | 7503396,610 | 0,170 |
| 279185,330 | 7503392,530 | 0,040 |
| 279185,590 | 7503386,810 | 0,000 |
| 279185,930 | 7503387,340 | 0,010 |
| 279186,010 | 7503396,200 | 0,190 |
| 279186,050 | 7503400,860 | 0,160 |
| 279186,160 | 7503396,370 | 0,200 |
| 279186,300 | 7503394,560 | 0,160 |
| 279186,300 | 7503399,090 | 0,270 |
| 279186,320 | 7503401,150 | 0,150 |
| 279186,400 | 7503388,060 | 0,030 |
| 279186,440 | 7503389,340 | 0,170 |
| 279186,490 | 7503393,510 | 0,040 |
| 279186,520 | 7503400,980 | 0,110 |
| 279186,550 | 7503388,280 | 0,040 |
| 279186,550 | 7503397,350 | 0,270 |
| 279186,700 | 7503396,980 | 0,250 |
| 279186,780 | 7503391,880 | 0,030 |
| 279186,810 | 7503397,110 | 0,230 |
| 279186,910 | 7503391,130 | 0,000 |
| 279187,000 | 7503388,970 | 0,120 |
| 279187,050 | 7503396,120 | 0,240 |
| 279187,070 | 7503388,470 | -0,050 |
| 279187,120 | 7503389,960 | 0,130 |
| 279187,130 | 7503397,480 | 0,240 |
| 279187,160 | 7503388,580 | -0,050 |
| 279187,180 | 7503389,600 | 0,160 |
| 279187,230 | 7503389,320 | 0,140 |
| 279187,240 | 7503388,680 | -0,050 |
| 279187,260 | 7503388,710 | -0,050 |
| 279187,300 | 7503388,770 | -0,050 |
| 279187,320 | 7503388,790 | -0,040 |
| 279187,340 | 7503388,810 | -0,040 |
| 279187,360 | 7503397,740 | 0,260 |
| 279187,440 | 7503389,640 | 0,150 |
| 279187,450 | 7503389,690 | 0,160 |
| 279187,450 | 7503389,720 | 0,160 |
| 279187,610 | 7503391,050 | -0,010 |
| 279187,670 | 7503391,480 | 0,010 |
| 279187,960 | 7503399,140 | 0,140 |
| 279188,080 | 7503394,850 | 0,020 |
| 279188,170 | 7503395,610 | 0,090 |
| 279188,200 | 7503395,820 | 0,070 |
| 279188,230 | 7503399,490 | 0,090 |
| 279188,440 | 7503397,770 | 0,190 |
| 279188,500 | 7503398,290 | 0,250 |
| 279188,610 | 7503399,160 | 0,160 |

ANEXO M - PLANILHA DAS ESTATÍSTICAS COMPUTADAS: SC-414

| SC-414: Pontos de Topografia - Cadastro | | | | SC-414: Pontos Laser | | | | Diferenças | | | | Diferenças ao Quadrado | | | | Plano Hz | | 3D |
|---|------------|---------------|---------|----------------------|---------------|---------|---------|------------|------------|------------|--------------|------------------------|--------------|-------|-------|----------|--|----|
| Ponto | E | N | h | E | N | h | h | ΔE | ΔN | Δh | ΔE^2 | ΔN^2 | Δh^2 | Erro | Erro | Erro | | |
| 1 | 201.014860 | 2.037.721.340 | 115,820 | 201.014.360 | 2.037.721.050 | 115,700 | 115,700 | -0,300 | -0,290 | -0,120 | 0,090000 | 0,084410 | 0,01440 | 0,417 | 0,434 | 0,434 | | |
| 2 | 201.026350 | 2.037.781.890 | 113,510 | 201.026.260 | 2.037.781.240 | 113,200 | 113,200 | -0,090 | -0,460 | -0,310 | 0,008100 | 0,202500 | 0,09610 | 0,469 | 0,564 | 0,564 | | |
| 3 | 201.065150 | 2.037.831.820 | 113,550 | 201.064.850 | 2.037.831.520 | 113,500 | 113,500 | -0,300 | -0,300 | -0,050 | 0,090000 | 0,090000 | 0,00250 | 0,424 | 0,427 | 0,427 | | |
| 4 | 201.135350 | 2.037.925.910 | 114,310 | 201.135.460 | 2.037.925.870 | 114,200 | 114,200 | 0,110 | -0,040 | -0,110 | 0,012100 | 0,001600 | 0,01210 | 0,117 | 0,161 | 0,161 | | |
| 5 | 201.188110 | 2.037.932.890 | 112,870 | 201.187.760 | 2.037.932.630 | 112,700 | 112,700 | -0,350 | -0,160 | -0,170 | 0,122500 | 0,025600 | 0,02890 | 0,385 | 0,421 | 0,421 | | |
| 6 | 201.228790 | 2.037.938.800 | 112,230 | 201.228.680 | 2.037.938.840 | 112,000 | 112,000 | -0,210 | -0,180 | -0,230 | 0,044100 | 0,025600 | 0,05290 | 0,264 | 0,350 | 0,350 | | |
| 7 | 201.289760 | 2.037.948.720 | 111,300 | 201.289.810 | 2.037.948.680 | 111,100 | 111,100 | -0,150 | -0,040 | -0,200 | 0,022500 | 0,001600 | 0,04000 | 0,253 | 0,263 | 0,263 | | |
| 8 | 201.295990 | 2.037.987.040 | 108,430 | 201.296.050 | 2.037.986.700 | 108,500 | 108,500 | 0,060 | -0,340 | 0,070 | 0,003600 | 0,115600 | 0,00490 | 0,345 | 0,352 | 0,352 | | |
| 9 | 201.320300 | 2.038.147.150 | 119,520 | 201.320.680 | 2.038.146.840 | 119,300 | 119,300 | 0,280 | -0,310 | -0,220 | 0,078400 | 0,096100 | 0,04840 | 0,418 | 0,472 | 0,472 | | |
| 10 | 201.325280 | 2.038.090.310 | 114,740 | 201.325.060 | 2.038.090.660 | 114,800 | 114,800 | -0,220 | 0,350 | 0,060 | 0,048400 | 0,122500 | 0,00360 | 0,413 | 0,418 | 0,418 | | |
| 11 | 201.349090 | 2.038.196.510 | 120,960 | 201.349.250 | 2.038.196.620 | 120,700 | 120,700 | 0,160 | 0,110 | -0,260 | 0,025600 | 0,012100 | 0,06760 | 0,194 | 0,324 | 0,324 | | |
| 12 | 201.352370 | 2.038.248.450 | 116,840 | 201.352.670 | 2.038.248.750 | 116,700 | 116,700 | 0,200 | 0,300 | -0,140 | 0,040000 | 0,090000 | 0,01960 | 0,361 | 0,387 | 0,387 | | |
| 13 | 201.359450 | 2.038.308.030 | 114,300 | 201.359.610 | 2.038.308.120 | 114,300 | 114,300 | 0,160 | 0,090 | 0,000 | 0,025600 | 0,008100 | 0,00000 | 0,184 | 0,184 | 0,184 | | |
| 14 | 201.460350 | 2.038.404.540 | 111,830 | 201.460.280 | 2.038.404.630 | 111,600 | 111,600 | -0,070 | 0,090 | -0,230 | 0,004900 | 0,008100 | 0,05290 | 0,114 | 0,257 | 0,257 | | |
| 15 | 201.463890 | 2.038.323.850 | 120,150 | 201.464.210 | 2.038.323.650 | 120,000 | 120,000 | 0,320 | -0,200 | -0,150 | 0,102400 | 0,040000 | 0,02250 | 0,377 | 0,406 | 0,406 | | |
| 16 | 201.464770 | 2.038.284.500 | 133,000 | 201.464.660 | 2.038.284.230 | 132,500 | 132,500 | -0,210 | -0,270 | -0,500 | 0,044100 | 0,072900 | 0,25000 | 0,342 | 0,606 | 0,606 | | |
| 17 | 201.468620 | 2.038.473.870 | 107,630 | 201.468.660 | 2.038.474.140 | 107,400 | 107,400 | 0,040 | 0,270 | -0,230 | 0,001600 | 0,072900 | 0,05290 | 0,273 | 0,367 | 0,367 | | |
| 18 | 201.500520 | 2.038.492.880 | 106,620 | 201.500.690 | 2.038.492.640 | 106,700 | 106,700 | 0,170 | -0,340 | 0,080 | 0,028900 | 0,115600 | 0,00640 | 0,380 | 0,388 | 0,388 | | |
| 19 | 201.541470 | 2.038.561.430 | 106,050 | 201.541.620 | 2.038.561.680 | 105,900 | 105,900 | 0,150 | 0,250 | -0,150 | 0,022500 | 0,062500 | 0,02250 | 0,292 | 0,328 | 0,328 | | |
| 20 | 201.626850 | 2.038.599.580 | 106,230 | 201.627.130 | 2.038.599.640 | 106,100 | 106,100 | 0,280 | 0,060 | -0,130 | 0,078400 | 0,003600 | 0,01690 | 0,286 | 0,314 | 0,314 | | |
| 21 | 201.747400 | 2.038.720.950 | 104,760 | 201.747.400 | 2.038.720.750 | 104,800 | 104,800 | 0,000 | -0,200 | 0,040 | 0,000000 | 0,040000 | 0,00160 | 0,200 | 0,204 | 0,204 | | |
| 22 | 201.811960 | 2.038.897.930 | 97,770 | 201.812.160 | 2.038.898.210 | 97,910 | 97,910 | 0,200 | 0,280 | 0,140 | 0,040000 | 0,078400 | 0,01960 | 0,344 | 0,371 | 0,371 | | |
| 23 | 201.821010 | 2.038.899.690 | 97,390 | 201.821.040 | 2.038.899.870 | 97,290 | 97,290 | 0,030 | 0,280 | -0,100 | 0,000900 | 0,078400 | 0,01000 | 0,282 | 0,299 | 0,299 | | |
| 24 | 201.982210 | 2.039.313.560 | 93,670 | 201.982.050 | 2.039.313.310 | 93,550 | 93,550 | -0,160 | -0,250 | -0,240 | 0,025600 | 0,062500 | 0,01440 | 0,297 | 0,320 | 0,320 | | |
| 25 | 202.119550 | 2.039.407.330 | 91,870 | 202.119.300 | 2.039.407.290 | 91,630 | 91,630 | -0,250 | -0,040 | -0,240 | 0,062500 | 0,001600 | 0,05760 | 0,263 | 0,349 | 0,349 | | |
| 26 | 202.148010 | 2.039.812.840 | 88,740 | 202.148.130 | 2.039.812.640 | 88,940 | 88,940 | 0,120 | -0,200 | 0,200 | 0,014400 | 0,040000 | 0,04000 | 0,233 | 0,307 | 0,307 | | |
| 27 | 202.160520 | 2.039.620.610 | 90,110 | 202.160.330 | 2.039.620.390 | 89,990 | 89,990 | -0,190 | -0,220 | -0,220 | 0,036100 | 0,048400 | 0,04840 | 0,291 | 0,365 | 0,365 | | |
| 28 | 202.259130 | 2.039.464.180 | 101,320 | 202.258.950 | 2.039.463.880 | 101,100 | 101,100 | -0,180 | -0,300 | -0,200 | 0,032400 | 0,090000 | 0,04840 | 0,350 | 0,413 | 0,413 | | |
| 29 | 202.303340 | 2.039.892.830 | 82,250 | 202.303.370 | 2.039.893.080 | 82,190 | 82,190 | 0,030 | 0,250 | -0,060 | 0,000900 | 0,062500 | 0,00360 | 0,252 | 0,269 | 0,269 | | |
| 30 | 202.573530 | 2.040.316.280 | 80,090 | 202.573.460 | 2.040.316.490 | 79,900 | 79,900 | -0,070 | 0,210 | -0,190 | 0,004900 | 0,044100 | 0,03610 | 0,221 | 0,292 | 0,292 | | |
| 31 | 202.578160 | 2.040.308.530 | 80,290 | 202.578.030 | 2.040.308.610 | 80,230 | 80,230 | -0,130 | 0,080 | -0,060 | 0,016900 | 0,006400 | 0,00360 | 0,153 | 0,164 | 0,164 | | |
| 32 | 202.605470 | 2.040.463.190 | 80,910 | 202.605.250 | 2.040.463.080 | 80,840 | 80,840 | -0,220 | -0,110 | -0,070 | 0,048400 | 0,012100 | 0,00490 | 0,246 | 0,256 | 0,256 | | |
| 33 | 202.676270 | 2.040.423.610 | 85,090 | 202.676.420 | 2.040.423.480 | 85,200 | 85,200 | 0,150 | -0,120 | 0,110 | 0,022500 | 0,014400 | 0,01210 | 0,192 | 0,221 | 0,221 | | |
| 34 | 202.751370 | 2.040.580.400 | 86,580 | 202.751.290 | 2.040.580.630 | 86,580 | 86,580 | -0,080 | 0,230 | 0,000 | 0,006400 | 0,052900 | 0,00000 | 0,244 | 0,244 | 0,244 | | |
| 35 | 202.805870 | 2.040.681.690 | 78,850 | 202.805.630 | 2.040.681.740 | 79,140 | 79,140 | -0,040 | 0,050 | 0,290 | 0,001600 | 0,002500 | 0,08410 | 0,064 | 0,063 | 0,063 | | |
| 36 | 202.835130 | 2.040.661.340 | 82,650 | 202.835.190 | 2.040.661.360 | 82,490 | 82,490 | 0,060 | 0,020 | -0,160 | 0,003600 | 0,000400 | 0,02560 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | | |
| 37 | 202.996130 | 2.040.843.510 | 75,940 | 202.996.220 | 2.040.843.550 | 75,960 | 75,960 | 0,090 | 0,040 | 0,020 | 0,008100 | 0,001600 | 0,00040 | 0,098 | 0,100 | 0,100 | | |
| 38 | 203.033170 | 2.040.792.180 | 78,070 | 203.033.080 | 2.040.792.010 | 77,950 | 77,950 | -0,170 | -0,170 | -0,220 | 0,028900 | 0,048400 | 0,04840 | 0,240 | 0,240 | 0,240 | | |
| 39 | 203.052950 | 2.041.006.130 | 76,570 | 203.053.080 | 2.041.006.290 | 76,580 | 76,580 | 0,130 | 0,160 | 0,010 | 0,016900 | 0,025600 | 0,00010 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | | |
| 40 | 203.057460 | 2.040.927.390 | 77,270 | 203.057.220 | 2.040.927.400 | 77,160 | 77,160 | -0,240 | 0,010 | -0,110 | 0,057600 | 0,000100 | 0,01210 | 0,240 | 0,264 | 0,264 | | |

| A | | | | P | | | |
|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|
| Máx | Mín | Mé.d.a | DP | Máx | Mín | Mé.d.a | DP |
| 0,320 | -0,350 | 0,183 | 0,220 | 0,469 | -0,063 | 0,063 | 0,104 |
| -0,350 | -0,460 | -0,035 | 0,152 | | | | |
| -0,022 | -0,035 | -0,099 | | | | | |

| SC-414: Pontos Cotados - Restituição | | | | SC-414: Pontos Laser | | | | Diferenças | | | | Diferenças ao Quadrado | | | | Plano Hz | | 3D |
|--------------------------------------|-------------|---------------|---------|----------------------|---------------|---------|--------|------------|--------|---------|---------|------------------------|-------|-------|------|----------|--|----|
| Ponto | E | N | h | Ponto | E | N | h | ΔE | ΔN | Δh | ΔE² | ΔN² | Δh² | Erro | Erro | Erro | | |
| PC1 | 200.975.570 | 2.037.751.351 | 113.976 | 200.975.470 | 2.037.751.440 | 113.900 | -0.100 | 0.089 | -0.076 | 0.00994 | 0.00799 | 0.00579 | 0.134 | 0.154 | | | | |
| PC2 | 200.987.075 | 2.037.765.652 | 113.486 | 200.986.840 | 2.037.765.540 | 113.300 | -0.235 | -0.112 | -0.186 | 0.05527 | 0.01248 | 0.03463 | 0.260 | 0.320 | | | | |
| PC3 | 201.009.622 | 2.037.794.477 | 112.806 | 201.009.820 | 2.037.794.320 | 112.900 | 0.198 | -0.157 | 0.094 | 0.03950 | 0.02465 | 0.00880 | 0.252 | 0.269 | | | | |
| PC4 | 201.286.980 | 2.037.933.609 | 111.496 | 201.286.840 | 2.037.933.740 | 111.200 | -0.120 | 0.131 | -0.296 | 0.01447 | 0.01708 | 0.08779 | 0.178 | 0.345 | | | | |
| PC5 | 201.292.246 | 2.038.181.407 | 120.825 | 201.292.170 | 2.038.181.430 | 120.800 | -0.075 | 0.023 | -0.025 | 0.00560 | 0.00053 | 0.00065 | 0.078 | 0.082 | | | | |
| PC6 | 201.297.612 | 2.037.951.977 | 110.866 | 201.297.320 | 2.037.952.220 | 110.900 | -0.292 | 0.243 | 0.034 | 0.08515 | 0.05900 | 0.00113 | 0.380 | 0.381 | | | | |
| PC7 | 201.321.247 | 2.038.051.541 | 113.056 | 201.321.430 | 2.038.051.600 | 112.900 | 0.183 | 0.060 | -0.156 | 0.03349 | 0.00354 | 0.02440 | 0.192 | 0.248 | | | | |
| PC8 | 201.453.076 | 2.038.278.197 | 132.224 | 201.453.330 | 2.038.278.290 | 132.200 | 0.254 | 0.093 | -0.024 | 0.06441 | 0.00881 | 0.00059 | 0.270 | 0.271 | | | | |
| PC9 | 201.556.929 | 2.038.350.012 | 143.553 | 201.557.040 | 2.038.349.890 | 143.100 | 0.422 | -0.111 | -0.463 | 0.17842 | 0.00033 | 0.06595 | 0.485 | 0.485 | | | | |
| PC10 | 201.585.698 | 2.038.601.408 | 106.157 | 201.586.120 | 2.038.601.390 | 105.900 | 0.292 | 0.086 | 0.268 | 0.08538 | 0.00743 | 0.07156 | 0.305 | 0.405 | | | | |
| PC11 | 201.604.788 | 2.038.385.144 | 147.033 | 201.605.050 | 2.038.385.230 | 147.300 | -0.004 | 0.049 | 0.173 | 0.00002 | 0.00246 | 0.03003 | 0.050 | 0.180 | | | | |
| PC12 | 201.617.064 | 2.038.550.331 | 107.227 | 201.617.060 | 2.038.550.380 | 107.400 | -0.105 | 0.293 | -0.197 | 0.01107 | 0.08608 | 0.03869 | 0.312 | 0.389 | | | | |
| PC13 | 201.646.655 | 2.038.603.547 | 106.497 | 201.646.550 | 2.038.603.840 | 106.300 | 0.127 | -0.437 | -0.497 | 0.01608 | 0.19053 | 0.24701 | 0.455 | 0.674 | | | | |
| PC14 | 201.653.553 | 2.038.685.737 | 105.097 | 201.653.680 | 2.038.685.300 | 104.600 | 0.493 | 0.097 | -0.017 | 0.03353 | 0.00937 | 0.00029 | 0.207 | 0.208 | | | | |
| PC15 | 201.721.397 | 2.038.691.943 | 105.017 | 201.721.580 | 2.038.692.040 | 105.000 | 0.132 | 0.244 | 0.112 | 0.01756 | 0.05954 | 0.01257 | 0.278 | 0.299 | | | | |
| PC16 | 201.897.828 | 2.039.181.276 | 96.038 | 201.897.960 | 2.039.181.520 | 96.150 | 0.323 | 0.242 | -0.128 | 0.10462 | 0.05866 | 0.01641 | 0.404 | 0.424 | | | | |
| PC17 | 201.934.347 | 2.039.293.928 | 94.368 | 201.934.670 | 2.039.294.170 | 94.240 | -0.169 | 0.437 | 0.132 | 0.02863 | 0.19053 | 0.01753 | 0.468 | 0.486 | | | | |
| PC18 | 201.939.729 | 2.039.113.814 | 99.448 | 201.939.560 | 2.039.114.260 | 99.580 | 0.421 | -0.183 | 0.202 | 0.17724 | 0.03349 | 0.04076 | 0.459 | 0.501 | | | | |
| PC19 | 201.946.741 | 2.039.254.215 | 94.588 | 201.947.162 | 2.039.254.032 | 94.790 | -0.463 | -0.012 | 0.242 | 0.20512 | 0.00015 | 0.05871 | 0.514 | 0.514 | | | | |
| PC20 | 201.973.287 | 2.039.176.302 | 98.248 | 201.973.750 | 2.039.176.290 | 98.490 | -0.259 | 0.156 | -0.158 | 0.06693 | 0.02427 | 0.02496 | 0.302 | 0.341 | | | | |
| PC21 | 202.008.929 | 2.039.263.394 | 95.698 | 202.008.670 | 2.039.263.560 | 95.540 | 0.348 | -0.281 | 0.172 | 0.12090 | 0.07874 | 0.02952 | 0.447 | 0.479 | | | | |
| PC22 | 202.013.102 | 2.039.308.331 | 93.848 | 202.013.450 | 2.039.308.050 | 94.020 | 0.361 | -0.282 | -0.338 | 0.12341 | 0.07941 | 0.11418 | 0.450 | 0.563 | | | | |
| PC23 | 202.025.239 | 2.039.253.232 | 96.158 | 202.025.680 | 2.039.252.950 | 95.820 | -0.440 | 0.436 | 0.082 | 0.00398 | 0.16777 | 0.00389 | 0.414 | 0.419 | | | | |
| PC24 | 202.081.287 | 2.039.193.620 | 99.068 | 202.081.350 | 2.039.194.030 | 99.130 | -0.063 | 0.410 | -0.020 | 0.03215 | 0.04137 | 0.25837 | 0.271 | 0.276 | | | | |
| PC25 | 202.097.919 | 2.039.445.387 | 92.258 | 202.097.740 | 2.039.445.690 | 91.750 | 0.508 | -0.179 | -0.508 | 0.00042 | 0.00300 | 0.00013 | 0.060 | 0.060 | | | | |
| PC26 | 202.103.690 | 2.039.248.824 | 96.058 | 202.103.650 | 2.039.249.260 | 96.280 | -0.437 | 0.018 | 0.071 | 0.19132 | 0.00034 | 0.00508 | 0.438 | 0.444 | | | | |
| PC27 | 202.106.850 | 2.039.858.205 | 91.198 | 202.106.870 | 2.039.858.150 | 91.210 | 0.183 | 0.455 | -0.179 | 0.03356 | 0.20748 | 0.03190 | 0.522 | 0.522 | | | | |
| PC28 | 202.122.327 | 2.039.514.232 | 89.219 | 202.121.890 | 2.039.514.250 | 89.290 | -0.437 | 0.332 | -0.228 | 0.13484 | 0.11036 | 0.06217 | 0.495 | 0.545 | | | | |
| PC29 | 202.129.947 | 2.039.680.305 | 89.609 | 202.130.130 | 2.039.680.760 | 89.430 | -0.398 | 0.114 | 0.091 | 0.15884 | 0.01280 | 0.00834 | 0.414 | 0.424 | | | | |
| PC30 | 202.135.993 | 2.039.588.328 | 91.538 | 202.136.360 | 2.039.588.660 | 91.310 | 0.367 | 0.332 | -0.228 | 0.13484 | 0.11036 | 0.06217 | 0.495 | 0.545 | | | | |
| PC31 | 202.144.558 | 2.039.795.996 | 89.099 | 202.144.160 | 2.039.796.110 | 89.190 | -0.432 | 0.237 | 0.102 | 0.18636 | 0.05603 | 0.01038 | 0.492 | 0.503 | | | | |
| PC32 | 202.151.068 | 2.039.505.943 | 94.178 | 202.151.500 | 2.039.506.180 | 94.280 | -0.432 | 0.237 | 0.102 | 0.18636 | 0.05603 | 0.01038 | 0.492 | 0.503 | | | | |
| PC33 | 202.167.893 | 2.039.763.313 | 94.868 | 202.167.850 | 2.039.763.230 | 94.860 | -0.033 | -0.083 | -0.208 | 0.00106 | 0.00681 | 0.04331 | 0.089 | 0.226 | | | | |
| PC34 | 202.173.095 | 2.039.701.463 | 91.618 | 202.173.470 | 2.039.701.570 | 91.590 | 0.375 | 0.087 | 0.272 | 0.14085 | 0.00753 | 0.07377 | 0.385 | 0.471 | | | | |
| PC35 | 202.174.521 | 2.039.836.598 | 86.319 | 202.174.700 | 2.039.837.000 | 86.420 | 0.179 | 0.402 | 0.101 | 0.03218 | 0.16144 | 0.01020 | 0.440 | 0.461 | | | | |
| PC36 | 202.195.602 | 2.039.654.636 | 91.938 | 202.196.090 | 2.039.654.640 | 92.010 | -0.489 | 0.004 | 0.072 | 0.23863 | 0.00001 | 0.00513 | 0.489 | 0.494 | | | | |
| PC37 | 202.200.326 | 2.039.581.229 | 91.958 | 202.200.730 | 2.039.581.210 | 91.650 | 0.404 | -0.019 | -0.308 | 0.16354 | 0.00036 | 0.09511 | 0.405 | 0.509 | | | | |
| PC38 | 202.205.694 | 2.039.613.794 | 91.478 | 202.205.770 | 2.039.614.230 | 91.340 | 0.106 | 0.456 | -0.138 | 0.01128 | 0.20830 | 0.01915 | 0.469 | 0.469 | | | | |
| PC39 | 202.313.705 | 2.039.961.149 | 80.600 | 202.313.710 | 2.039.960.780 | 80.140 | 0.005 | -0.369 | -0.460 | 0.00002 | 0.13567 | 0.21123 | 0.369 | 0.589 | | | | |
| PC40 | 202.811.323 | 2.040.634.274 | 82.589 | 202.811.190 | 2.040.633.890 | 82.320 | -0.133 | -0.384 | -0.269 | 0.01756 | 0.14761 | 0.07258 | 0.406 | 0.488 | | | | |

| | |
|-------|-------|
| Máx | 0.495 |
| Mín | 0.050 |
| Média | 0.337 |
| DP | 0.136 |

| | |
|-------|--------|
| Máx | 0.489 |
| Mín | -0.437 |
| Média | 0.096 |
| DP | 0.251 |

| | |
|-------|--------|
| Máx | 0.272 |
| Mín | -0.508 |
| Média | -0.067 |
| DP | 0.222 |

ANEXO N - PLANILHA DAS ESTATÍSTICAS COMPUTADAS: SC-471

| SC-471: Pontos de Topografia - Cadastro | | | | SC-471: Pontos Laser | | | | Diferenças | | | | Diferenças ao Quadrado | | | | Plano Hz | | 3D |
|---|-------------|---------------|---------|----------------------|-------------|---------------|---------|------------|--------|--------|---------|------------------------|---------|-------|-------|----------|--|----|
| Ponto | E | N | h | h | E | N | h | ΔE | ΔN | Δh | ΔE² | ΔN² | Δh² | Erro | Erro | Erro | | |
| 1 | 191.682.230 | 2.049.277.550 | 519,080 | 519,210 | 191.610.980 | 2.049.383.400 | 519,210 | 0,000 | 0,420 | 0,130 | 0,00000 | 0,17640 | 0,01690 | 0,420 | 0,440 | 0,440 | | |
| 2 | 191.682.230 | 2.049.277.550 | 520,850 | 521,320 | 191.682.290 | 2.049.277.820 | 521,320 | 0,080 | 0,270 | 0,470 | 0,00380 | 0,07290 | 0,22090 | 0,277 | 0,277 | 0,545 | | |
| 3 | 191.705.410 | 2.049.308.340 | 512,550 | 512,700 | 191.705.560 | 2.049.308.620 | 512,700 | 0,150 | 0,280 | 0,150 | 0,02250 | 0,07840 | 0,02250 | 0,318 | 0,318 | 0,361 | | |
| 4 | 191.705.400 | 2.049.309.420 | 512,980 | 512,890 | 191.706.420 | 2.049.309.560 | 512,890 | 0,020 | 0,140 | -0,090 | 0,00040 | 0,01960 | 0,00810 | 0,141 | 0,141 | 0,168 | | |
| 5 | 191.723.170 | 2.049.225.960 | 521,990 | 522,090 | 191.723.070 | 2.049.226.150 | 522,090 | -0,100 | 0,190 | 0,100 | 0,01000 | 0,03610 | 0,01000 | 0,215 | 0,215 | 0,237 | | |
| 6 | 191.754.110 | 2.049.275.330 | 507,870 | 507,560 | 191.754.110 | 2.049.275.470 | 507,560 | 0,000 | 0,140 | -0,310 | 0,00000 | 0,01960 | 0,09610 | 0,140 | 0,140 | 0,340 | | |
| 7 | 191.865.600 | 2.049.147.200 | 493,100 | 493,040 | 191.865.190 | 2.049.147.200 | 493,040 | -0,060 | 0,000 | -0,060 | 0,00360 | 0,00000 | 0,00360 | 0,108 | 0,108 | 0,169 | | |
| 8 | 192.000.920 | 2.049.000.460 | 476,080 | 476,210 | 192.001.010 | 2.049.000.520 | 476,210 | 0,090 | 0,060 | 0,130 | 0,00810 | 0,00360 | 0,01690 | 0,042 | 0,042 | 0,307 | | |
| 9 | 192.129.770 | 2.048.943.400 | 486,300 | 486,760 | 192.129.800 | 2.048.943.430 | 486,760 | 0,030 | 0,030 | 0,460 | 0,00090 | 0,00090 | 0,21160 | 0,290 | 0,290 | 0,307 | | |
| 10 | 192.313.270 | 2.048.775.910 | 440,220 | 440,320 | 192.313.060 | 2.048.775.710 | 440,320 | -0,210 | -0,200 | 0,100 | 0,04410 | 0,04000 | 0,01000 | 0,318 | 0,318 | 0,337 | | |
| 11 | 192.473.740 | 2.048.203.430 | 394,660 | 394,680 | 192.474.030 | 2.048.203.300 | 394,680 | 0,290 | -0,130 | 0,020 | 0,08410 | 0,01690 | 0,00040 | 0,171 | 0,171 | 0,264 | | |
| 12 | 192.486.890 | 2.048.165.940 | 395,170 | 395,460 | 192.486.730 | 2.048.165.880 | 395,460 | -0,160 | -0,060 | 0,290 | 0,02560 | 0,00360 | 0,08410 | 0,261 | 0,261 | 0,402 | | |
| 13 | 192.488.070 | 2.048.726.760 | 416,270 | 416,310 | 192.488.330 | 2.048.726.740 | 416,310 | 0,260 | -0,020 | 0,040 | 0,06760 | 0,00040 | 0,00160 | 0,099 | 0,099 | 0,204 | | |
| 14 | 192.524.260 | 2.048.081.870 | 400,000 | 401,430 | 192.524.330 | 2.048.081.800 | 401,430 | 0,070 | -0,070 | -0,390 | 0,00490 | 0,00490 | 0,15210 | 0,100 | 0,100 | 0,598 | | |
| 15 | 192.552.090 | 2.048.223.850 | 400,840 | 401,430 | 192.551.990 | 2.048.223.850 | 401,430 | -0,100 | 0,000 | 0,590 | 0,01000 | 0,00000 | 0,34810 | 0,200 | 0,200 | 0,215 | | |
| 16 | 192.573.800 | 2.047.859.920 | 403,670 | 403,590 | 192.574.000 | 2.047.859.920 | 403,590 | 0,200 | 0,000 | -0,080 | 0,04000 | 0,00000 | 0,00640 | 0,244 | 0,244 | 0,336 | | |
| 17 | 192.606.590 | 2.048.100.900 | 417,710 | 417,810 | 192.606.360 | 2.048.100.980 | 417,810 | -0,230 | 0,080 | 0,100 | 0,05290 | 0,00640 | 0,01000 | 0,386 | 0,386 | 0,461 | | |
| 18 | 192.608.180 | 2.048.526.810 | 382,670 | 382,820 | 192.607.920 | 2.048.526.810 | 382,820 | -0,250 | -0,150 | 0,150 | 0,06250 | 0,02250 | 0,02250 | 0,461 | 0,461 | 0,598 | | |
| 19 | 192.611.610 | 2.048.582.470 | 395,950 | 395,970 | 192.612.030 | 2.048.582.660 | 395,970 | 0,420 | 0,190 | 0,020 | 0,17640 | 0,03610 | 0,00040 | 0,272 | 0,272 | 0,283 | | |
| 20 | 192.616.420 | 2.048.464.510 | 386,890 | 387,090 | 192.616.340 | 2.048.464.190 | 387,090 | -0,080 | -0,320 | 0,200 | 0,00640 | 0,10240 | 0,04000 | 0,330 | 0,330 | 0,386 | | |
| 21 | 192.617.160 | 2.047.887.590 | 409,170 | 409,220 | 192.617.130 | 2.047.887.860 | 409,220 | -0,030 | 0,270 | 0,080 | 0,00090 | 0,07290 | 0,00640 | 0,272 | 0,272 | 0,283 | | |
| 22 | 192.618.300 | 2.048.003.960 | 418,550 | 418,720 | 192.618.220 | 2.048.004.060 | 418,720 | -0,080 | 0,100 | 0,170 | 0,00640 | 0,01000 | 0,02890 | 0,128 | 0,128 | 0,213 | | |
| 23 | 192.627.100 | 2.048.698.280 | 401,860 | 401,900 | 192.627.010 | 2.048.699.090 | 401,900 | -0,090 | -0,190 | 0,040 | 0,00810 | 0,03610 | 0,00160 | 0,210 | 0,210 | 0,214 | | |
| 24 | 192.630.790 | 2.047.873.930 | 409,220 | 409,320 | 192.630.610 | 2.047.873.780 | 409,320 | -0,180 | -0,150 | 0,100 | 0,03240 | 0,02250 | 0,01000 | 0,234 | 0,234 | 0,255 | | |
| 25 | 192.641.950 | 2.047.834.810 | 407,700 | 407,700 | 192.641.940 | 2.047.834.970 | 407,700 | -0,010 | 0,160 | 0,020 | 0,00010 | 0,02560 | 0,00040 | 0,160 | 0,160 | 0,162 | | |
| 26 | 192.665.140 | 2.047.829.820 | 407,430 | 407,530 | 192.664.980 | 2.047.830.010 | 407,530 | -0,160 | 0,190 | 0,100 | 0,02560 | 0,03610 | 0,01000 | 0,248 | 0,248 | 0,268 | | |
| 27 | 192.701.440 | 2.047.817.080 | 400,900 | 401,330 | 192.701.280 | 2.047.817.180 | 401,330 | -0,160 | 0,100 | 0,430 | 0,02560 | 0,01000 | 0,18490 | 0,189 | 0,189 | 0,470 | | |
| 28 | 192.712.390 | 2.047.813.060 | 397,390 | 397,830 | 192.712.820 | 2.047.812.920 | 397,830 | 0,430 | -0,140 | 0,440 | 0,18490 | 0,01960 | 0,19360 | 0,462 | 0,462 | 0,631 | | |
| 29 | 192.727.550 | 2.048.243.980 | 393,350 | 393,680 | 192.727.530 | 2.048.244.250 | 393,680 | -0,020 | 0,270 | 0,330 | 0,00040 | 0,07290 | 0,10890 | 0,271 | 0,271 | 0,427 | | |
| 30 | 192.786.830 | 2.047.639.500 | 394,160 | 394,270 | 192.786.910 | 2.047.639.390 | 394,270 | 0,080 | -0,110 | 0,110 | 0,00640 | 0,01210 | 0,01210 | 0,136 | 0,136 | 0,175 | | |
| 31 | 192.793.250 | 2.047.504.860 | 403,600 | 403,670 | 192.793.650 | 2.047.505.080 | 403,670 | 0,400 | 0,220 | 0,070 | 0,16000 | 0,04840 | 0,00490 | 0,462 | 0,462 | 0,598 | | |
| 32 | 192.810.910 | 2.047.469.790 | 404,580 | 404,660 | 192.811.090 | 2.047.469.610 | 404,660 | 0,180 | -0,180 | 0,080 | 0,03240 | 0,03240 | 0,00640 | 0,255 | 0,255 | 0,267 | | |
| 33 | 192.851.610 | 2.047.480.550 | 408,380 | 408,350 | 192.851.570 | 2.047.480.180 | 408,350 | -0,040 | -0,370 | -0,030 | 0,00160 | 0,13690 | 0,00090 | 0,372 | 0,372 | 0,373 | | |
| 34 | 192.856.250 | 2.047.517.500 | 409,180 | 409,090 | 192.856.250 | 2.047.517.560 | 409,090 | 0,000 | 0,060 | -0,090 | 0,00000 | 0,00360 | 0,00810 | 0,060 | 0,060 | 0,108 | | |
| 35 | 192.861.340 | 2.047.429.880 | 407,860 | 408,020 | 192.861.360 | 2.047.429.840 | 408,020 | 0,020 | -0,040 | 0,160 | 0,00040 | 0,00160 | 0,02560 | 0,046 | 0,046 | 0,166 | | |
| 36 | 192.879.270 | 2.047.416.310 | 407,330 | 407,530 | 192.879.220 | 2.047.416.620 | 407,530 | -0,050 | 0,310 | 0,240 | 0,00250 | 0,09610 | 0,05760 | 0,314 | 0,314 | 0,395 | | |
| 37 | 192.898.620 | 2.047.569.710 | 411,300 | 411,530 | 192.898.700 | 2.047.569.590 | 411,530 | 0,080 | -0,120 | 0,230 | 0,00640 | 0,01440 | 0,05290 | 0,144 | 0,144 | 0,271 | | |
| 38 | 192.900.380 | 2.047.526.700 | 414,670 | 414,670 | 192.900.360 | 2.047.526.650 | 414,670 | -0,020 | -0,050 | 0,040 | 0,00040 | 0,00250 | 0,00160 | 0,064 | 0,064 | 0,067 | | |
| 39 | 192.900.900 | 2.047.586.360 | 412,020 | 411,860 | 192.900.860 | 2.047.586.170 | 411,860 | -0,040 | -0,190 | -0,160 | 0,00160 | 0,03610 | 0,02560 | 0,194 | 0,194 | 0,252 | | |
| 40 | 192.909.220 | 2.047.553.750 | 413,740 | 413,650 | 192.909.030 | 2.047.553.990 | 413,650 | -0,190 | 0,240 | -0,090 | 0,03610 | 0,05760 | 0,00810 | 0,306 | 0,306 | 0,319 | | |

| A | | | | P | | | |
|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Máx | Mín | Méda | DP | Máx | Mín | Méda | DP |
| 0,430 | 0,420 | 0,390 | 0,201 | 0,461 | 0,042 | 0,234 | 0,117 |
| -0,410 | -0,370 | 0,031 | 0,107 | 0,046 | 0,042 | 0,234 | 0,117 |
| 0,004 | 0,004 | 0,031 | 0,107 | 0,046 | 0,042 | 0,234 | 0,117 |
| 0,184 | 0,186 | 0,186 | 0,201 | 0,046 | 0,042 | 0,234 | 0,117 |

| SC-471: Pontos Cotados - Restituição | | | | SC-471: Pontos Laser | | | | Diferenças | | | | Diferenças ao Quadrado | | | | Plano Hz | | 3D |
|--------------------------------------|-------------|-----------|-----|----------------------|-----------|-----|---------|------------|--------|--------|----------|------------------------|----------|-------|-------|----------|--|----|
| Ponto | E | N | h | E | N | h | h | ΔE | ΔN | Δh | ΔE² | ΔN² | Δh² | Erro | Erro | Erro | | |
| PC1 | 191.619.950 | 2.049.371 | 630 | 191.620.250 | 2.049.371 | 360 | 519.210 | 0.300 | -0.270 | -0.449 | 0.090000 | 0.072900 | 0.201600 | 0.404 | 0.404 | 0.604 | | |
| PC2 | 191.660.230 | 2.049.340 | 400 | 191.660.090 | 2.049.340 | 450 | 517.180 | -0.140 | 0.050 | -0.078 | 0.019600 | 0.002500 | 0.006080 | 0.149 | 0.149 | 0.168 | | |
| PC3 | 191.802.090 | 2.049.239 | 130 | 191.802.030 | 2.049.238 | 910 | 501.940 | -0.060 | -0.220 | 0.195 | 0.003600 | 0.048400 | 0.034232 | 0.228 | 0.228 | 0.294 | | |
| PC4 | 191.906.530 | 2.049.092 | 830 | 191.906.150 | 2.049.092 | 920 | 487.140 | -0.380 | 0.090 | -0.113 | 0.144400 | 0.008100 | 0.012777 | 0.391 | 0.391 | 0.407 | | |
| PC5 | 191.937.510 | 2.049.057 | 220 | 191.937.330 | 2.049.056 | 800 | 482.550 | -0.180 | -0.420 | -0.002 | 0.032400 | 0.176400 | 0.000000 | 0.457 | 0.457 | 0.467 | | |
| PC6 | 191.966.050 | 2.048.912 | 750 | 191.966.210 | 2.048.912 | 980 | 508.890 | 0.160 | 0.210 | -0.117 | 0.025600 | 0.044100 | 0.013669 | 0.264 | 0.264 | 0.289 | | |
| PC7 | 192.167.840 | 2.048.913 | 550 | 192.167.840 | 2.048.913 | 550 | 462.430 | 0.250 | 0.010 | -0.275 | 0.062500 | 0.000100 | 0.075622 | 0.250 | 0.250 | 0.372 | | |
| PC8 | 192.198.700 | 2.048.882 | 720 | 192.198.510 | 2.048.882 | 660 | 458.170 | -0.190 | -0.060 | 0.066 | 0.036100 | 0.003600 | 0.004636 | 0.199 | 0.199 | 0.210 | | |
| PC9 | 192.246.790 | 2.048.757 | 760 | 192.246.960 | 2.048.757 | 700 | 466.390 | 0.170 | -0.060 | -0.515 | 0.028900 | 0.003600 | 0.265222 | 0.180 | 0.180 | 0.546 | | |
| PC10 | 192.261.500 | 2.048.722 | 590 | 192.261.780 | 2.048.722 | 740 | 462.310 | 0.280 | 0.150 | 0.406 | 0.078400 | 0.022500 | 0.164894 | 0.318 | 0.318 | 0.515 | | |
| PC11 | 192.270.980 | 2.048.973 | 560 | 192.271.060 | 2.048.973 | 210 | 426.510 | 0.100 | -0.350 | 0.368 | 0.010000 | 0.122500 | 0.135642 | 0.364 | 0.364 | 0.518 | | |
| PC12 | 192.437.460 | 2.048.844 | 070 | 192.437.220 | 2.048.844 | 170 | 406.890 | -0.230 | 0.100 | -0.022 | 0.052900 | 0.010000 | 0.000488 | 0.251 | 0.251 | 0.252 | | |
| PC13 | 192.451.310 | 2.048.207 | 420 | 192.451.070 | 2.048.207 | 090 | 391.640 | -0.240 | -0.330 | -0.261 | 0.057600 | 0.108900 | 0.068122 | 0.408 | 0.408 | 0.484 | | |
| PC14 | 192.501.020 | 2.048.132 | 820 | 192.500.880 | 2.048.133 | 000 | 397.000 | -0.140 | 0.180 | 0.298 | 0.019600 | 0.032400 | 0.088800 | 0.228 | 0.228 | 0.375 | | |
| PC15 | 192.501.020 | 2.048.132 | 820 | 192.501.160 | 2.048.132 | 450 | 397.110 | 0.140 | -0.370 | 0.308 | 0.019600 | 0.136900 | 0.094866 | 0.396 | 0.396 | 0.501 | | |
| PC16 | 192.510.900 | 2.048.279 | 730 | 192.511.320 | 2.048.279 | 770 | 397.470 | 0.420 | 0.040 | 0.268 | 0.176400 | 0.001600 | 0.071822 | 0.500 | 0.500 | 0.500 | | |
| PC17 | 192.527.150 | 2.048.199 | 820 | 192.526.920 | 2.048.199 | 990 | 401.000 | -0.230 | 0.170 | 0.198 | 0.052900 | 0.028900 | 0.039200 | 0.286 | 0.286 | 0.348 | | |
| PC18 | 192.562.220 | 2.048.123 | 420 | 192.562.520 | 2.048.123 | 340 | 407.770 | 0.300 | -0.080 | -0.132 | 0.090000 | 0.006400 | 0.017422 | 0.310 | 0.310 | 0.337 | | |
| PC19 | 192.563.840 | 2.047.708 | 920 | 192.564.180 | 2.047.708 | 860 | 397.320 | 0.340 | -0.060 | 0.018 | 0.115600 | 0.003600 | 0.000032 | 0.345 | 0.345 | 0.346 | | |
| PC20 | 192.564.270 | 2.048.656 | 790 | 192.564.650 | 2.048.656 | 830 | 406.900 | 0.380 | 0.040 | -0.002 | 0.144400 | 0.001600 | 0.000000 | 0.382 | 0.382 | 0.365 | | |
| PC21 | 192.632.720 | 2.047.823 | 530 | 192.632.580 | 2.047.823 | 680 | 407.100 | -0.140 | 0.150 | -0.302 | 0.019600 | 0.022500 | 0.091200 | 0.205 | 0.205 | 0.365 | | |
| PC22 | 192.640.010 | 2.048.508 | 970 | 192.640.410 | 2.048.508 | 160 | 392.670 | 0.400 | 0.190 | -0.031 | 0.160000 | 0.036100 | 0.000966 | 0.443 | 0.443 | 0.444 | | |
| PC23 | 192.654.980 | 2.047.764 | 430 | 192.655.350 | 2.047.764 | 150 | 401.730 | 0.370 | -0.280 | -0.372 | 0.136900 | 0.078400 | 0.138338 | 0.464 | 0.464 | 0.595 | | |
| PC24 | 192.655.580 | 2.048.625 | 100 | 192.655.870 | 2.048.624 | 720 | 396.150 | 0.290 | -0.380 | 0.148 | 0.084100 | 0.144400 | 0.021900 | 0.478 | 0.478 | 0.500 | | |
| PC25 | 192.664.830 | 2.047.874 | 920 | 192.664.920 | 2.047.874 | 460 | 426.090 | 0.090 | -0.460 | 0.187 | 0.008100 | 0.211600 | 0.034977 | 0.505 | 0.505 | 0.505 | | |
| PC26 | 192.667.340 | 2.048.675 | 390 | 192.667.310 | 2.048.675 | 420 | 397.740 | -0.030 | 0.030 | 0.338 | 0.000900 | 0.000900 | 0.114244 | 0.042 | 0.042 | 0.341 | | |
| PC27 | 192.678.190 | 2.047.907 | 950 | 192.678.150 | 2.047.907 | 560 | 412.550 | -0.040 | -0.390 | -0.052 | 0.001600 | 0.152100 | 0.002700 | 0.392 | 0.392 | 0.395 | | |
| PC28 | 192.699.450 | 2.048.317 | 820 | 192.699.500 | 2.048.317 | 820 | 386.950 | 0.050 | -0.110 | 0.549 | 0.002500 | 0.012100 | 0.301400 | 0.121 | 0.121 | 0.562 | | |
| PC29 | 192.700.220 | 2.048.370 | 990 | 192.699.910 | 2.048.370 | 670 | 385.940 | -0.310 | -0.320 | -0.161 | 0.096100 | 0.102400 | 0.025922 | 0.446 | 0.446 | 0.474 | | |
| PC30 | 192.722.500 | 2.047.897 | 460 | 192.722.170 | 2.047.897 | 200 | 410.990 | -0.330 | -0.250 | -0.112 | 0.108900 | 0.062500 | 0.012544 | 0.414 | 0.414 | 0.429 | | |
| PC31 | 192.733.520 | 2.047.431 | 130 | 192.733.180 | 2.047.431 | 020 | 398.170 | -0.340 | -0.110 | -0.032 | 0.115600 | 0.012100 | 0.001022 | 0.357 | 0.357 | 0.359 | | |
| PC32 | 192.740.410 | 2.048.367 | 820 | 192.739.990 | 2.048.367 | 560 | 389.940 | -0.420 | -0.260 | -0.361 | 0.176400 | 0.067600 | 0.130322 | 0.494 | 0.494 | 0.612 | | |
| PC33 | 192.783.230 | 2.047.495 | 750 | 192.783.620 | 2.047.495 | 920 | 402.290 | 0.390 | 0.170 | 0.288 | 0.152100 | 0.028900 | 0.082944 | 0.425 | 0.425 | 0.514 | | |
| PC34 | 192.811.420 | 2.047.581 | 130 | 192.811.590 | 2.047.581 | 260 | 402.340 | 0.170 | 0.130 | 0.338 | 0.028900 | 0.016900 | 0.114244 | 0.214 | 0.214 | 0.400 | | |
| PC35 | 192.830.570 | 2.047.537 | 900 | 192.830.310 | 2.047.538 | 050 | 406.670 | -0.260 | 0.250 | 0.268 | 0.067600 | 0.062500 | 0.071822 | 0.361 | 0.361 | 0.449 | | |
| PC36 | 192.832.340 | 2.047.750 | 980 | 192.833.960 | 2.047.750 | 920 | 397.410 | -0.380 | -0.060 | -0.092 | 0.144400 | 0.003600 | 0.008466 | 0.385 | 0.385 | 0.396 | | |
| PC37 | 192.837.780 | 2.047.357 | 410 | 192.837.670 | 2.047.357 | 110 | 401.560 | -0.110 | -0.300 | 0.458 | 0.012100 | 0.090000 | 0.209766 | 0.320 | 0.320 | 0.568 | | |
| PC38 | 192.867.630 | 2.047.484 | 670 | 192.867.270 | 2.047.484 | 460 | 408.350 | -0.360 | -0.210 | -0.548 | 0.129600 | 0.044100 | 0.300330 | 0.417 | 0.417 | 0.688 | | |
| PC39 | 192.869.650 | 2.047.595 | 310 | 192.869.890 | 2.047.595 | 600 | 407.370 | 0.240 | 0.290 | -0.032 | 0.057600 | 0.084100 | 0.001022 | 0.376 | 0.376 | 0.378 | | |
| PC40 | 192.888.730 | 2.047.681 | 060 | 192.888.490 | 2.047.681 | 220 | 407.650 | -0.240 | 0.160 | 0.248 | 0.057600 | 0.025600 | 0.061500 | 0.288 | 0.288 | 0.380 | | |

| | |
|-------|-------|
| Máx | 0.494 |
| Mín | 0.042 |
| Média | 0.334 |
| DP | 0.109 |

| | |
|-------|--------|
| Máx | 0.549 |
| Mín | -0.515 |
| Média | 0.048 |
| DP | 0.274 |

| | |
|-------|--------|
| Máx | 0.420 |
| Mín | -0.460 |
| Média | -0.073 |
| DP | 0.219 |

ANEXO O - PLANILHA DAS ESTATÍSTICAS COMPUTADAS: SP-270

| SP-270: Pontos de Topografia (GPS e Nivelamento) | | | | | | | | | | SP-270: Pontos Laser | | | | | | | | | |
|--|-------------|---------------|---------|---------|-------------|---------------|---------|---------|--|----------------------|-------------|---------------|---|---------|---------|-------------|---------------|---|---------|
| Ponto | E | N | h | h | E | N | h | h | | h | E | N | N | h | h | E | N | N | h |
| MC63 | 200.660,613 | 2.501.065,546 | 466,841 | 466,740 | 200.660,630 | 2.501.065,546 | 466,740 | 466,740 | | 466,740 | 200.660,630 | 2.501.065,546 | | 466,740 | 466,740 | 200.660,630 | 2.501.065,546 | | 466,740 |
| MC66 | 200.710,017 | 2.501.031,322 | 467,717 | 467,540 | 200.709,870 | 2.501.031,460 | 467,540 | 467,540 | | 467,540 | 200.709,870 | 2.501.031,460 | | 467,540 | 467,540 | 200.709,870 | 2.501.031,460 | | 467,540 |
| PN1 | 200.829,144 | 2.500.958,078 | 469,393 | 469,130 | 200.828,958 | 2.500.957,920 | 469,130 | 469,130 | | 469,130 | 200.828,958 | 2.500.957,920 | | 469,130 | 469,130 | 200.828,958 | 2.500.957,920 | | 469,130 |
| MC72 | 201.067,755 | 2.500.810,877 | 473,294 | 473,060 | 201.067,760 | 2.500.811,010 | 473,060 | 473,060 | | 473,060 | 201.067,760 | 2.500.811,010 | | 473,060 | 473,060 | 201.067,760 | 2.500.811,010 | | 473,060 |
| MC73 | 201.066,493 | 2.500.801,360 | 473,588 | 473,300 | 201.066,600 | 2.500.801,380 | 473,300 | 473,300 | | 473,300 | 201.066,600 | 2.500.801,380 | | 473,300 | 473,300 | 201.066,600 | 2.500.801,380 | | 473,300 |
| PN2 | 201.310,071 | 2.500.636,251 | 474,177 | 473,920 | 201.310,120 | 2.500.636,060 | 473,920 | 473,920 | | 473,920 | 201.310,120 | 2.500.636,060 | | 473,920 | 473,920 | 201.310,120 | 2.500.636,060 | | 473,920 |
| PN3 | 201.315,978 | 2.500.625,647 | 473,585 | 473,410 | 201.315,890 | 2.500.625,670 | 473,410 | 473,410 | | 473,410 | 201.315,890 | 2.500.625,670 | | 473,410 | 473,410 | 201.315,890 | 2.500.625,670 | | 473,410 |
| PN4 | 201.318,346 | 2.500.646,902 | 473,942 | 473,850 | 201.318,180 | 2.500.646,910 | 473,850 | 473,850 | | 473,850 | 201.318,180 | 2.500.646,910 | | 473,850 | 473,850 | 201.318,180 | 2.500.646,910 | | 473,850 |
| PN5 | 201.369,086 | 2.500.615,196 | 472,706 | 472,510 | 201.368,790 | 2.500.615,230 | 472,510 | 472,510 | | 472,510 | 201.368,790 | 2.500.615,230 | | 472,510 | 472,510 | 201.368,790 | 2.500.615,230 | | 472,510 |
| PN6 | 201.560,270 | 2.500.503,597 | 466,564 | 466,400 | 201.560,044 | 2.500.503,470 | 466,400 | 466,400 | | 466,400 | 201.560,044 | 2.500.503,470 | | 466,400 | 466,400 | 201.560,044 | 2.500.503,470 | | 466,400 |
| PN7 | 201.610,140 | 2.500.472,603 | 464,387 | 464,150 | 201.610,100 | 2.500.472,630 | 464,150 | 464,150 | | 464,150 | 201.610,100 | 2.500.472,630 | | 464,150 | 464,150 | 201.610,100 | 2.500.472,630 | | 464,150 |
| PN8 | 201.657,409 | 2.500.434,973 | 462,514 | 462,300 | 201.657,440 | 2.500.434,760 | 462,300 | 462,300 | | 462,300 | 201.657,440 | 2.500.434,760 | | 462,300 | 462,300 | 201.657,440 | 2.500.434,760 | | 462,300 |
| PN9 | 201.932,258 | 2.500.272,280 | 461,570 | 461,470 | 201.932,080 | 2.500.272,080 | 461,470 | 461,470 | | 461,470 | 201.932,080 | 2.500.272,080 | | 461,470 | 461,470 | 201.932,080 | 2.500.272,080 | | 461,470 |
| PN10 | 201.989,428 | 2.500.213,390 | 448,802 | 448,640 | 201.989,320 | 2.500.213,740 | 448,640 | 448,640 | | 448,640 | 201.989,320 | 2.500.213,740 | | 448,640 | 448,640 | 201.989,320 | 2.500.213,740 | | 448,640 |
| PN11 | 202.065,204 | 2.500.177,026 | 446,445 | 446,330 | 202.065,370 | 2.500.176,840 | 446,330 | 446,330 | | 446,330 | 202.065,370 | 2.500.176,840 | | 446,330 | 446,330 | 202.065,370 | 2.500.176,840 | | 446,330 |
| PN12 | 202.187,155 | 2.500.112,460 | 442,113 | 441,960 | 202.187,210 | 2.500.112,400 | 441,960 | 441,960 | | 441,960 | 202.187,210 | 2.500.112,400 | | 441,960 | 441,960 | 202.187,210 | 2.500.112,400 | | 441,960 |
| PN13 | 202.235,476 | 2.500.078,254 | 439,892 | 439,770 | 202.235,510 | 2.500.078,220 | 439,770 | 439,770 | | 439,770 | 202.235,510 | 2.500.078,220 | | 439,770 | 439,770 | 202.235,510 | 2.500.078,220 | | 439,770 |
| PN14 | 202.329,469 | 2.500.002,706 | 434,189 | 434,060 | 202.329,600 | 2.500.002,520 | 434,060 | 434,060 | | 434,060 | 202.329,600 | 2.500.002,520 | | 434,060 | 434,060 | 202.329,600 | 2.500.002,520 | | 434,060 |
| PN15 | 202.342,740 | 2.499,977,563 | 432,154 | 431,880 | 202.343,790 | 2.499,977,700 | 431,880 | 431,880 | | 431,880 | 202.343,790 | 2.499,977,700 | | 431,880 | 431,880 | 202.343,790 | 2.499,977,700 | | 431,880 |
| PN16 | 202.702,957 | 2.499,770,764 | 408,181 | 407,960 | 202.703,250 | 2.499,770,730 | 407,960 | 407,960 | | 407,960 | 202.703,250 | 2.499,770,730 | | 407,960 | 407,960 | 202.703,250 | 2.499,770,730 | | 407,960 |
| PN17 | 203.007,529 | 2.499,571,736 | 393,282 | 393,170 | 203.007,330 | 2.499,571,530 | 393,170 | 393,170 | | 393,170 | 203.007,330 | 2.499,571,530 | | 393,170 | 393,170 | 203.007,330 | 2.499,571,530 | | 393,170 |
| PN18 | 203.693,703 | 2.499,167,982 | 394,927 | 394,810 | 203.693,850 | 2.499,167,980 | 394,810 | 394,810 | | 394,810 | 203.693,850 | 2.499,167,980 | | 394,810 | 394,810 | 203.693,850 | 2.499,167,980 | | 394,810 |
| PN19 | 203.756,090 | 2.499,116,924 | 400,062 | 399,880 | 203.756,170 | 2.499,117,060 | 399,880 | 399,880 | | 399,880 | 203.756,170 | 2.499,117,060 | | 399,880 | 399,880 | 203.756,170 | 2.499,117,060 | | 399,880 |
| PN20 | 203.827,677 | 2.499,080,051 | 404,177 | 404,200 | 203.827,710 | 2.499,079,880 | 404,200 | 404,200 | | 404,200 | 203.827,710 | 2.499,079,880 | | 404,200 | 404,200 | 203.827,710 | 2.499,079,880 | | 404,200 |
| PN21 | 203.897,565 | 2.499,040,987 | 407,389 | 407,270 | 203.897,510 | 2.499,040,780 | 407,270 | 407,270 | | 407,270 | 203.897,510 | 2.499,040,780 | | 407,270 | 407,270 | 203.897,510 | 2.499,040,780 | | 407,270 |
| PN22 | 203.963,484 | 2.498,995,476 | 409,393 | 409,270 | 203.963,260 | 2.498,995,500 | 409,270 | 409,270 | | 409,270 | 203.963,260 | 2.498,995,500 | | 409,270 | 409,270 | 203.963,260 | 2.498,995,500 | | 409,270 |
| PN23 | 204.029,808 | 2.498,925,287 | 408,316 | 408,120 | 204.028,960 | 2.498,925,090 | 408,120 | 408,120 | | 408,120 | 204.028,960 | 2.498,925,090 | | 408,120 | 408,120 | 204.028,960 | 2.498,925,090 | | 408,120 |
| PN24 | 204.091,249 | 2.498,938,121 | 409,761 | 409,650 | 204.090,990 | 2.498,937,850 | 409,650 | 409,650 | | 409,650 | 204.090,990 | 2.498,937,850 | | 409,650 | 409,650 | 204.090,990 | 2.498,937,850 | | 409,650 |
| PN25 | 204.662,109 | 2.498,585,980 | 408,139 | 407,910 | 204.661,900 | 2.498,586,130 | 407,910 | 407,910 | | 407,910 | 204.661,900 | 2.498,586,130 | | 407,910 | 407,910 | 204.661,900 | 2.498,586,130 | | 407,910 |
| PN26 | 204.909,165 | 2.498,394,509 | 412,290 | 412,020 | 204.909,150 | 2.498,394,300 | 412,020 | 412,020 | | 412,020 | 204.909,150 | 2.498,394,300 | | 412,020 | 412,020 | 204.909,150 | 2.498,394,300 | | 412,020 |
| PN27 | 205.166,928 | 2.498,244,596 | 414,385 | 414,340 | 205.168,820 | 2.498,244,550 | 414,340 | 414,340 | | 414,340 | 205.168,820 | 2.498,244,550 | | 414,340 | 414,340 | 205.168,820 | 2.498,244,550 | | 414,340 |
| PN28 | 205.222,678 | 2.498,217,695 | 413,947 | 413,930 | 205.222,980 | 2.498,217,640 | 413,930 | 413,930 | | 413,930 | 205.222,980 | 2.498,217,640 | | 413,930 | 413,930 | 205.222,980 | 2.498,217,640 | | 413,930 |
| PN29 | 205.253,715 | 2.498,191,654 | 414,665 | 414,550 | 205.253,850 | 2.498,191,520 | 414,550 | 414,550 | | 414,550 | 205.253,850 | 2.498,191,520 | | 414,550 | 414,550 | 205.253,850 | 2.498,191,520 | | 414,550 |
| PN30 | 205.366,800 | 2.498,105,303 | 415,545 | 415,370 | 205.366,740 | 2.498,105,160 | 415,370 | 415,370 | | 415,370 | 205.366,740 | 2.498,105,160 | | 415,370 | 415,370 | 205.366,740 | 2.498,105,160 | | 415,370 |
| PN31 | 205.397,041 | 2.498,117,809 | 416,738 | 416,720 | 205.396,960 | 2.498,117,770 | 416,720 | 416,720 | | 416,720 | 205.396,960 | 2.498,117,770 | | 416,720 | 416,720 | 205.396,960 | 2.498,117,770 | | 416,720 |
| PN32 | 205.420,025 | 2.498,080,200 | 416,919 | 416,810 | 205.419,830 | 2.498,080,330 | 416,810 | 416,810 | | 416,810 | 205.419,830 | 2.498,080,330 | | 416,810 | 416,810 | 205.419,830 | 2.498,080,330 | | 416,810 |
| PN33 | 205.520,949 | 2.498,012,978 | 418,424 | 418,560 | 205.521,210 | 2.498,013,030 | 418,560 | 418,560 | | 418,560 | 205.521,210 | 2.498,013,030 | | 418,560 | 418,560 | 205.521,210 | 2.498,013,030 | | 418,560 |
| PN34 | 205.561,415 | 2.498,004,176 | 419,223 | 419,890 | 205.561,220 | 2.498,004,460 | 419,890 | 419,890 | | 419,890 | 205.561,220 | 2.498,004,460 | | 419,890 | 419,890 | 205.561,220 | 2.498,004,460 | | 419,890 |
| PN35 | 205.591,733 | 2.497,977,301 | 419,828 | 419,890 | 205.591,670 | 2.497,977,630 | 419,890 | 419,890 | | 419,890 | 205.591,670 | 2.497,977,630 | | 419,890 | 419,890 | 205.591,670 | 2.497,977,630 | | 419,890 |
| PN36 | 205.712,092 | 2.497,906,367 | 418,072 | 417,890 | 205.712,140 | 2.497,906,720 | 417,890 | 417,890 | | 417,890 | 205.712,140 | 2.497,906,720 | | 417,890 | 417,890 | 205.712,140 | 2.497,906,720 | | 417,890 |

| A | | | | P | | | |
|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Máx | Mín | Méda | DP | Máx | Mín | Méda | DP |
| 0,302 | 0,363 | -0,271 | 0,136 | 0,375 | 0,017 | 0,210 | 0,093 |
| -0,295 | -0,271 | -0,333 | -0,333 | 0,017 | 0,017 | 0,210 | 0,093 |
| -0,026 | -0,018 | -0,153 | -0,153 | 0,210 | 0,210 | 0,210 | 0,093 |
| 0,157 | 0,167 | 0,095 | 0,095 | 0,093 | 0,093 | 0,093 | 0,093 |

ANEXO P - TESTES DE HIPÓTESE E SIGNIFICÂNCIA E DE ASSIMETRIA

Teste de Hipóteses: t (Student) para a Diferença das Médias
Significância: 95%

| | | | |
|-----------|--|-----------------------------------|--|
| Confiança | | Bilateral (1- α) = 95% | |
| t | | ±2,024 | |

| | |
|---------------------|------------------------|
| H_0 | H_1 |
| $\Delta\bar{x} = 0$ | $\Delta\bar{x} \neq 0$ |

Para: $-t_{(n-1); \alpha/2} \leq t_n \leq +t_{(n-1); \alpha/2}$

| Projeto | Amostra | 95% H_0 |
|------------|---------|--------------|
| Água Verde | t | 0,0442 |
| BR-116 | | Acetita |
| Cametfour | | -0,0397 |
| | | Acetita |
| OSBRA | | 0,2314 |
| | | Acetita |
| SC-414 | | NV |
| | | Acetita |
| SC-471 | | -0,0275 |
| | | Acetita |
| | | -0,0199 |
| | | Acetita |
| | | 0,0114 |
| | | Acetita |
| SP-270 | | 0,0074 |
| | | Acetita |
| | | -0,0251 |
| | | Acetita |

NV: Não Verificado
Nota: t calculado presumindo variâncias diferentes

Teste de Hipóteses: z (E score) para a Diferença das Médias

| | | | |
|-----------|--|-----------------------------------|--|
| Confiança | | Bilateral (1- α) = 95% | |
| z | | ±1,960 | |

| | |
|---------------------|------------------------|
| H_0 | H_1 |
| $\Delta\bar{x} = 0$ | $\Delta\bar{x} \neq 0$ |

Para: $-z_{(\alpha/2)} \leq z_n \leq +z_{(\alpha/2)}$

| Projeto | Média das Altitudes | | DP das Altitudes | Amostra | 95% H_0 |
|------------|---------------------|---------|------------------|---------|--------------|
| | Referência | ALS | | | |
| Água Verde | 914,867 | 914,919 | 4,609 | 4,676 | 0,0446 |
| BR-116 | 887,293 | 887,228 | 7,013 | 6,992 | -0,0399 |
| Cametfour | 891,746 | 891,795 | 0,919 | 0,927 | 0,2334 |
| OSBRA | NV | NV | NV | NV | NV |
| SC-414 | 100,227 | 100,128 | 15,804 | 15,741 | -0,0275 |
| | 101,533 | 101,466 | 14,809 | 14,813 | -0,0199 |
| SC-471 | 427,681 | 427,768 | 43,305 | 43,294 | 0,0109 |
| | 423,317 | 423,367 | 39,636 | 39,558 | 0,0069 |
| SP-270 | 433,963 | 433,811 | 27,301 | 27,279 | -0,0249 |

NV: Não Verificado
Nota: z calculado presumindo variâncias diferentes

Assimetria e Curtose

| Projeto | Curva Normal | | Curtose | Curva Normal |
|------------|---------------------|----------------------|---------|--------------|
| | Assimetria a = 0 | Curtose k = 0,263 | | |
| Água Verde | -0,206 | à Esquerda | -0,081 | Achatada |
| BR-116 | -0,198 | à Esquerda | -0,349 | Achatada |
| Cametfour | 0,759 | à Direita | 3,901 | Alta |
| OSBRA | 0,416 | à Direita | 0,621 | Alta |
| SC-414 | 0,240 | à Direita | 0,645 | Alta |
| | -0,359 | à Esquerda | -0,861 | Achatada |
| SC-471 | 0,150 | à Direita | 0,688 | Alta |
| | -0,063 | à Esquerda | 0,666 | Alta |
| SP-270 | 0,933 | à Direita | 1,686 | Alta |