

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CURSO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA

ELEN MARTEN DE LIMA

THIAGO ALEXANDRE MARQUES THOMAZ

TIAGO CAVAGNOLI SEVERO

**MAPEAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO DIGITAL UTILIZANDO
FOTOGRAFIAS DE MÉDIO FORMATO**

PORTO ALEGRE

2010

ELEN MARTEN DE LIMA
THIAGO ALEXANDRE MARQUES THOMAZ
TIAGO CAVAGNOLI SEVERO

**MAPEAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO DIGITAL UTILIZANDO
FOTOGRAFIAS DE MÉDIO FORMATO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Geodésia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para obtenção do título de bacharel em Engenharia Cartográfica.

ORIENTADOR: MÁRIO LUIZ LOPES REISS

CO-ORIENTADORES: MARCELO TOMIO MATSUOKA

SERGIO FLORÊNCIO DE SOUZA

PORTO ALEGRE

2010

Lima, Elen Marten de

Mapeamento aerofotogramétrico digital utilizando fotografias de médio formato. / Elen Marten de Lima; Thiago Alexandre Marques Thomaz; Tiago Cavagnoli Severo - Porto Alegre : UFRGS, 2010.

[126 f.] il.

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Cartográfica. – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2010.

Orientação: Prof. Dr. Mário Luiz Lopes Reiss

Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Tomio Matsuoka

Co-orientador: Prof. Dr. Sérgio Florêncio de Souza

1. Geodésia. 2. Fototriangulação. 3. Restituição. 4. Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). I. Thomaz, Thiago Alexandre Marques. II. Severo, Tiago Cavagnoli. III Título.

Catálogo na Publicação

Biblioteca Geociências - UFRGS

Renata Cristina Grun CRB10/1113

ELEN MARTEN DE LIMA
THIAGO ALEXANDRE MARQUES THOMAZ
TIAGO CAVAGNOLI SEVERO

**MAPEAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO DIGITAL UTILIZANDO
FOTOGRAFIAS DE MÉDIO FORMATO**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOCIÊNCIAS

BANCA EXAMINADORA

PROFA. DRA. ANDREA LOPES IESCHECK
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

PROF. DR. DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ENG. CARTÓGRAFO IVANDRO KLEIN

PORTO ALEGRE,

2010

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho àqueles que nos apoiaram e incentivaram em todos os momentos, em especial aos nossos familiares.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pela disponibilização de equipamentos e recursos indispensáveis para a realização deste trabalho.

Ao professor Mário Luiz Lopes Reiss, por suas orientações durante o período do projeto, pela sua boa vontade, iniciativa, e também por sua disponibilidade de tempo e recursos, principalmente nas atividades de campo.

Aos professores Marcelo Tomio Matsuoka e Sérgio Florêncio de Souza por suas contribuições e discussões científicas, importantes para reflexão e amadurecimento do trabalho.

Ao Laboratório de Pesquisas em Fotogrametria (LAFOTO), cedente do espaço, assim como equipamentos para a execução dos processos.

À empresa ENGEMAP Geoinformação, pela disponibilização das fotografias utilizadas nas atividades.

Aos colegas de curso, que auxiliaram e incentivaram o desenvolvimento do projeto.

EPÍGRAFE

"Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor, mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser... mas Graças a Deus, não somos o que éramos."

Martin Luther King

RESUMO

O aumento da população e a conseqüente ocupação desordenada do solo, principalmente nos grandes centros urbanos, demandam o emprego de políticas de controle e gestão da superfície terrestre por parte da sociedade, em especial dos setores públicos. A cartografia se ocupa em representar a Terra da maneira mais próxima da realidade, utilizando ciências e tecnologias de levantamento e representação, entre elas a Fotogrametria. Esta se baseia na extração de medidas de objetos a partir de fotografias, sendo amplamente empregada no mapeamento da superfície terrestre por utilizar métodos que permitem a obtenção de informações topográficas de maneira rápida e eficiente. A partir de fotografias aéreas são gerados produtos cartográficos que representam a área sobrevoada, podendo servir de apoio aos mais diversos tipos de projeto. Para tanto, etapas inerentes ao processo fotogramétrico devem ser executadas, como apoio geodésico de campo, fototriangulação e restituição. Ainda, é importante submeter os produtos elaborados à análise de qualidade de forma a definir em quais situações podem ser empregados. Fotografias aéreas de uma região dos municípios de Novo Hamburgo, São Leopoldo e Portão, localizados no estado do Rio Grande do Sul, foram utilizadas para a execução do processo fotogramétrico resultando nos seguintes produtos cartográficos: Anaglifo, Ortofotos e Mapa Topográfico Digital. Neste último foi efetuada a análise de qualidade segundo as instruções reguladoras e normas técnicas da cartografia nacional. Os resultados alcançados no controle de qualidade, determinaram que o PEC planimétrico da carta é classe B para escala 1:1000 e classe C para curvas de nível com equidistâncias de 25 metros na altimetria.

Palavras-chave: Fototriangulação, Restituição, Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC).

ABSTRACT

The increasing population and consequent disordered occupation of the soil, especially in large urban centers, require the use of policies to control and manage the earth's surface by society, especially the public sector. The cartography is concerned to represent Earth's way closer to reality, using science and survey techniques and representation, including the Photogrammetry. This is based on the extraction of measurements of objects from photographs, being widely employed in mapping the earth's surface by using methods that allow to obtain topographical information quickly and effectively. From aerial photographs to generate cartographic products that represent the area overflowed, which may serve to support various types of project. To this end, steps inherent in the photogrammetric process must be performed in support of geodetic field phototriangulation and restitution. It is still important to examine the products made at the quality analysis in order to define in which situations can be employed. Aerial photographs of a region of the municipalities of Novo Hamburgo and Sao Leopoldo, located in Rio Grande do Sul, were used for implementation of the process resulting in the photogrammetric mapping products: anaglyph, Orthophoto and Topographic Digital Charter. In the latter it was performed quality analysis according to the instructions regulatory and technical standards of national cartography. The achievements in quality control, determined that the Accuracy Standards (PEC) planimetric of the letter is a class B to class C and 1:1000 scale for contour lines with contour interval 25 meters in altitude.

Keywords: Phototriangulation, Restitution, Accuracy Standards (PEC).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Relação geométrica entre a foto e a cena.	24
Figura 2. Relação geométrica entre a foto e a cena quando o terreno é irregular.	25
Figura 3. Exemplo de sobreposições lateral e longitudinal.	27
Figura 4. Sistema fiducial.	29
Figura 5. Sistema fotogramétrico	30
Figura 6. Sistema de coordenadas da tela.	31
Figura 7. Parâmetros da orientação exterior.	32
Figura 8. Óculos de anaglifo.	37
Figura 9. Grade retangular regular	39
Figura 10. Rede triangular irregular	40
Figura 11. Estações de referência do IGS.	47
Figura 12. Mapa de distribuição das estações da RBMC	47
Figura 13. Origem do sistema de referência WGS 84.	48
Figura 14. Conceito da determinação da altitude ortométrica com receptor GNSS.	51
Figura 15. Distribuição normal.	57
Figura 16. Mapa de situação do COREDE Vale do Rio dos Sinos.	60
Figura 17. Mapa de localização da região de interesse.	61
Figura 18. Mapa de ondulações geoidais do MAPGEO2010.	64
Figura 19. Topcon GR3 em operação.	65
Figura 20. EDF utilizada no projeto.	68
Figura 21. Esquema parcial dos pontos planejados (apoio e ligação).	72
Figura 22. Distribuição dos pontos de apoio no <i>software</i> Google Earth.	74
Figura 23. Janela para coleta de pontos para fototriangulação.	77
Figura 24. Pontos de apoio e ligação utilizados.	78
Figura 25. Exemplo de modelo de fotografias.	79
Figura 26. Representação das feições restituídas.	80
Figura 27. Realização da restituição.	81
Figura 28. Exemplo de uma <i>breakline</i> em um corpo d'água.	82
Figura 29. Distribuição dos pontos por quadrantes.	85
Figura 30. Distribuição dos pontos equidistantes.	86
Figura 31. Mosaico não-controlado.	87
Figura 32. Fotoíndice produzido.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Fontes de erro nas observáveis GPS.....	44
Tabela 2. Precisão do posicionamento relativo em função do tempo de observação, equipamento	50
Tabela 3. Resumo das classes pertencentes ao PEC.....	58
Tabela 4. Coordenadas dos pontos de apoio fotogramétrico.....	90
Tabela 5. Coordenadas dos pontos de controle da carta.....	92
Tabela 6. Coordenadas das feições restituídas, dos pontos de controle da carta e suas discrepâncias.....	93
Tabela 7. Resultado do teste <i>t-student</i> aplicado.	94
Tabela 8. Análise da precisão considerando a escala 1:1000.....	96
Tabela 9. Análise da precisão considerando a escala 1:2000.....	96
Tabela 10. Discrepâncias entre as altitudes dos pontos de controle e restituídos.	97
Tabela 11. Análise de tendência para altimetria.....	97
Tabela 12. Resultados para precisão altimétrica da carta.....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATE – *Automatic Terrain Extractor*

C/A – *Coarse Acquisition*

CGED – Coordenação de Geodésia

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

COREDE – Conselho Regional de Desenvolvimento

CTRS – *Conventional Terrestrial Reference System*

DD – Duplas Diferenças

DGPS – *Differential GPS*

DMA – *Defense Mapping Agency*

EFD – Estação Fotogramétrica Digital

EUA – Estados Unidos da América

EMQ – Erro Médio Quadrático

EP – Erro-Padrão

FCT/UNESP – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista

GLONASS – *Global Orbiting Navigation Satellite System*

GNSS – *Global Navigation Satellite Systems*

GRS – *Geodetic Reference System*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IGS – *International GNSS Service*

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

ISPRS – *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*

LAFOTO – Laboratório de Pesquisas em Fotogrametria

Loran – *Long-Range Navigation System*

LPS – *Leica Photogrammetry Suite*

MDT – Modelo Digital de Terreno

MID – Monocomparador de Imagens Digitais

MMQ – Método dos Mínimos Quadrados

MVC – Matriz Variância e Covariância

NAVSTAR-GPS – *Global Positioning System*

NNSS – *Navy Navigation Satellite System*

OE – Orientação Exterior

OI – Orientação Interior

Omega – *Global low frequency navigation system*

PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica

PPP – Posicionamento por Ponto Preciso

ppm – Partes por Milhão

PPS – *Precise Positioning Service*

PRN – *Pseudo Random Noise*

PRF – Polícia Rodoviária Federal

RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

RINEX – *Receiver Independent Exchange Format*

SCA – Sistemas de Controle Ativos

SD – Simples Diferenças

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SPS – *Standard Positioning Service*

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

TIFF – *Tagged Image File Format*

TIN - *Triangular Irregular Network*

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UTM – Universal Transversa de Mercator

WADGPS – *Wide Area Differential GPS*

LISTA DE SÍMBOLOS

- x' e y' – Coordenadas do ponto no sistema fotogramétrico
- x_0 e y_0 – Coordenadas do ponto principal
- X_{CP} , Y_{CP} e Z_{CP} – Coordenadas do centro perspectivo da câmara no referencial do objeto
- κ, φ e ω – Ângulos de rotação da câmara
- $R_{i,j}$ - Elementos da matriz de rotação referenciada aos ângulos κ, φ e ω
- Δx e Δy - Distorções causadas pelos erros sistemáticos
- δx_r e δy_r – Elementos da distorção radial simétrica
- δx_d e δy_d – Elementos da distorção descentrada
- δx_a e δy_a – Elementos da afinidade
- K_1 , K_2 e K_3 – Coeficientes da distorção radial simétrica
- P_1 e P_2 – Coeficientes da distorção descentrada
- A e B – Coeficientes da afinidade
- r – distância entre o ponto principal e o ponto de interesse no sistema fotogramétrico
- σ_0^2 - Fator de variância *a priori*
- Σ_{Lb}^{-1} - Matriz Variância e Covariância (MVC) das observações
- (σ_i^2) - Variâncias
- (σ_{ij}) - Covariâncias
- L_a - Vetor das observações ajustadas
- X_a - Vetor dos parâmetros ajustados
- Q_x – Dimensão do quadro no terreno na direção transversal à linha de vôo
- Q_y – Dimensão do quadro no terreno na direção paralela da linha de vôo
- q_x – Dimensão do quadro do sensor na direção transversal à linha de vôo
- q_y – Dimensão do quadro do sensor na direção paralela da linha de vôo
- DIM_T – Dimensão total lateral da fotografia
- DIM_{SS} – Dimensão da região onde não há sobreposição longitudinal na fotografia seguinte

S_{long} - Sobreposição longitudinal

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ - Componentes das linhas base GNSS

n - Tamanho da amostra

ε - Erro máximo permissível

μ - Média populacional

σ - Desvio padrão populacional

Z - Intervalo de confiança

N - Tamanho da população

\bar{X} - Média amostral

S - Desvio padrão amostral

S^2 - Variância amostral

ΔX_i - Discrepâncias entre coordenadas

H_0 - Hipótese nula

H_1 - Hipótese alternativa

D - Denominador da escala da carta

χ_x^2 - *Chi*-quadrado calculado

$\chi_{(n-1,\alpha)}^2$ - *Chi*-quadrado tabelado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
1.2	OBJETIVOS	20
1.3	JUSTIFICATIVA	21
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1	FOTOGRAMETRIA	23
2.1.1	Geometria da Fotografia.....	24
2.1.2	Câmaras Fotográficas	26
2.1.3	Mosaicos Fotogramétricos.....	27
2.1.4	Referenciais Adotados.....	28
2.1.5	Orientações da Câmara.....	31
2.1.6	Equações de Colinearidade.....	32
2.1.7	Fototriangulação	34
2.1.8	Restituição	35
2.1.9	Ortofoto	36
2.1.10	Anaglifo.....	37
2.2	MODELO DIGITAL DE TERRENO – MDT	37
2.3	POSICIONAMENTO GEODÉSICO POR SATÉLITES ARTIFICIAIS	40
2.3.1	NAVSTAR-GPS.....	41
2.3.1.1	Observáveis GPS	42
2.3.1.2	Erros nas observáveis GPS	43
2.3.1.3	Efemérides	44
2.3.1.4	Receptores GPS	45
2.3.2	GLONASS.....	46
2.3.3	Rede Geodésica de Referência	46
2.3.4	Sistemas Geodésicos de Referência: SIRGAS x WGS84	48
2.3.5	Processamento de Dados GNSS – Posicionamento Relativo Estático	49
2.3.6	Determinação de Altitude Ortométrica com Receptor GNSS	50
2.4	AJUSTAMENTO POR MÍNIMOS QUADRADOS.....	51
2.5	CONTROLE DE QUALIDADE DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS	56
2.5.1	Padrão de Exatidão Cartográfica	56

3	ÁREA DE ESTUDO.....	59
3.1	REGIÃO DE INTERESSE.....	60
4	DADOS E MATERIAIS	62
4.1	FOTOGRAFIAS	62
4.2	REDE GEODÉSICA DE REFERÊNCIA	62
4.3	MODELO GEOIDAL.....	63
4.4	RECEPTOR GNSS.....	64
4.5	<i>SOFTWARE</i> DE PROCESSAMENTO DE DADOS GNSS	65
4.6	ESTAÇÃO FOTOGRAMÉTRICA DIGITAL.....	66
4.7	SISTEMA COMPUTACIONAL DEDICADO ÀS OPERAÇÕES FOTOGRAMÉTRICAS	68
4.8	<i>SOFTWARE</i> DE SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS.....	69
5	METODOLOGIA.....	70
5.1	MOSAICO E FOTOÍNDICE.....	70
5.2	DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DOS PARÂMETROS DO VÔO	70
5.2.1	Altura de Vôo e Escala da Fotografia.....	70
5.2.2	Sobreposição Longitudinal e Dimensão do Pixel no Terreno	71
5.3	PLANEJAMENTO DOS PONTOS DE APOIO FOTOGRAMÉTRICO	72
5.4	PLANEJAMENTO DO POSICIONAMENTO GNSS	73
5.5	PLANEJAMENTO DA ROTA DE CAMPO.....	74
5.6	POSICIONAMENTO GNSS.....	75
5.7	PROCESSAMENTO E AJUSTAMENTO DOS DADOS GNSS	75
5.8	FOTOTRIANGULAÇÃO	76
5.9	RESTITUIÇÃO	79
5.10	GERAÇÃO E EDIÇÃO DE MDT	81
5.11	GERAÇÃO DE ORTOFOTO E ANAGLIFO	82
5.12	GERAÇÃO DO MAPA TOPOGRÁFICO	83
5.13	DETERMINAÇÃO DOS PONTOS PARA CONTROLE DE QUALIDADE DA CARTA	84
6	RESULTADOS E ANÁLISES	87
6.1	MOSAICO	87
6.2	FOTOÍNDICE	87
6.3	DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DOS PARÂMETROS DO VÔO	88
6.3.1	Altura de Vôo e Escala da Fotografia.....	88

6.3.2	Sobreposição Longitudinal e Dimensão do Pixel no Terreno	89
6.4	PROCESSAMENTO E AJUSTAMENTO GNSS DOS PONTOS DE APOIO FOTOGRAFÉTICOS	89
6.5	MDT.....	90
6.6	ORTOFOTO E ANAGLIFO	91
6.7	MAPA TOPOGRÁFICO	91
6.8	PONTOS PARA CONTROLE DE QUALIDADE DA CARTA.....	91
6.9	CLASSIFICAÇÃO DA CARTA TOPOGRÁFICA DIGITAL.....	92
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	99
	REFERÊNCIAS	102

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A Cartografia preocupa-se com a representação espacial da superfície terrestre utilizando diversas técnicas. A partir da aquisição, tratamento e análise de dados geográficos, o Engenheiro Cartógrafo extrai subsídios para a elaboração de produtos importantes para o planejamento, gestão e implantação de projetos para o desenvolvimento da sociedade.

Diversas ciências e ferramentas como a Geodésia, a Fotogrametria, o Sistema de Informações Geográficas (SIG), o Sensoriamento Remoto e a Topografia são empregadas para o desenvolvimento de projetos cartográficos. A escolha das técnicas a serem aplicadas no mapeamento dependerá da precisão requerida, dada a finalidade do uso das informações, sendo esta uma das principais atribuições do Engenheiro Cartógrafo.

Dentre as técnicas desenvolvidas, destaca-se a Fotogrametria, usualmente aplicada na realização do mapeamento básico, como o da Cartografia Sistemática adotada no Brasil. A Fotogrametria baseia-se no conceito de extração de medidas de objetos a partir de fotografias, sua aplicação no mapeamento da superfície terrestre utiliza fotografias obtidas tanto por sensores aerotransportados quanto terrestres, e se apoia em diversas outras técnicas de obtenção de informações espaciais.

Segundo Tommaselli (2004), a Fotogrametria apresenta uma série de vantagens sobre os processos diretos de medição (como por ex. Topografia e Geodésia), tanto para o mapeamento quanto para outras aplicações:

- o objeto a ser medido não é tocado;
- a aquisição dos dados é rápida;
- as fotografias armazenam grandes quantidades de informações semânticas e geométricas;
- as fotografias são documentos legais relativos à época de sua tomada;
- podem ser medidos movimentos e deformações;
- as fotografias podem ser medidas a qualquer momento que se desejar, podendo-se repetir a medida várias vezes;

- a precisão pode ser aumentada de acordo com as necessidades particulares de cada projeto;
- superfícies complicadas podem ser facilmente determinadas com a densidade desejada;

Pela praticidade e facilidade encontradas na aquisição de medidas em quaisquer tipos de superfície, a Fotogrametria é uma alternativa utilizada para a geração e atualização da cartografia no nosso país.

Considerando a atual situação do Brasil, onde há índices de crescimento significativos, obras de infraestrutura são essenciais no desenvolvimento de setores econômicos importantes como a construção civil, a indústria, a agricultura mecanizada, entre outros. Sabendo destas necessidades, o planejamento e organização dos serviços tanto públicos quanto privados devem ser elaborados de forma eficiente, exigindo modelos atualizados que representem a superfície terrestre de maneira precisa. Baseado nessa carência, este trabalho propõe-se a elaborar produtos cartográficos atualizados, através de técnicas fotogramétricas, para região do Vale do Rio dos Sinos.

1.2 OBJETIVOS

O **objetivo geral** deste trabalho é o desenvolvimento de um mapeamento apoiado em fotografias aéreas de médio formato, cujo produto final é um mapa topográfico da região do Vale do Rios dos Sinos. Para alcançar tal objetivo, diversos conceitos de Cartografia, Fotogrametria, Geodésia e Ajustamento de Observações serão revisados e empregados.

Os **objetivos específicos** são a geração de produtos cartográficos da região do Vale do Rio dos Sinos na qual houve recobrimento aerofotogramétrico. Os produtos cartográficos que devem ser elaborados são:

- mosaico;
- modelo digital de terreno;
- ortofotos;
- anaglifo.

Ainda, será realizada a avaliação da qualidade do mapa topográfico considerando padrões normativos. Para tanto, a partir das fotografias fornecidas serão desenvolvidas

diversas etapas inerentes ao processo fotogramétrico visando o mapeamento topográfico. Entre estas, pode-se citar o apoio geodésico de campo, a fototriangulação e a restituição.

1.3 JUSTIFICATIVA

Antes do advento da Fotogrametria, a representação da superfície terrestre era um processo árduo e lento, pois eram necessárias mensurações de campo a fim de determinar a posição dos acidentes geográficos que se desejava representar (ANDRADE, 1998). Desta forma, questionou-se a viabilidade do emprego de fotografias na representação da superfície terrestre.

Pelo fato de se basear em medidas remotas, a Fotogrametria se torna um método rápido para mapeamento, dadas certas precisões. Dessa forma, esse método é preferido em relação a outros que podem produzir resultados semelhantes, mas são mais demorados, acarretando também um custo monetário mais elevado e toda a dificuldade de logística que trabalhos de campo demandam. Essa rapidez mencionada se torna aliada do planejamento – tanto privado quanto público – para a gestão dos recursos de forma mais fácil, pois é possível se ter atualizações de cenários rapidamente, inclusive com a geração de produtos parciais, mostrando o desenvolvimento de atividades.

Por pesquisa de trabalhos realizados pôde-se perceber que a Fotogrametria usada ao mapeamento é eficiente, fornecendo resultados convincentes e dentro do planejado (DEMARQUI, 2007 e GUARDIA; REISS; SILVA, 1999).

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em sete capítulos: Introdução, Fundamentação Teórica, Área de Estudo, Dados e Materiais, Metodologia, Resultados e Análises, finalizando com Conclusões e Recomendações.

No capítulo primeiro, são expostas as considerações iniciais, bem como o objetivo, a justificativa e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo aborda a fundamentação teórica, apresentando os principais conceitos necessários ao desenvolvimento do projeto, dissertando sobre os temas de Fotogrametria, Geodésia, Controle de Qualidade e Ajustamento de Observações.

A área de estudo e a região de interesse são descritas no capítulo três.

No quarto capítulo serão abordados os dados e materiais utilizados no decorrer das atividades, como fotografias, rede geodésica de referência, modelo geoidal, *softwares* e equipamentos.

O quinto capítulo apresenta a metodologia aplicada para o desenvolvimento dos produtos que serão gerados. No capítulo seis são descritos os resultados, bem como suas análises. Finalmente, as conclusões e recomendações são expostas no sétimo capítulo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FOTOGRAMETRIA

Fotogrametria, conforme a *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ISPRS), é a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informações confiáveis sobre os objetos físicos e o meio ambiente através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões da energia eletromagnética radiante e outros fenômenos.

A Fotogrametria é uma técnica em constante evolução de instrumentos e processos. Segundo Abib (1982), François Arago, ao apresentar a então invenção da fotografia à Academia de Ciências da França, em 1839, colocou entre as suas eventuais aplicações o mapeamento topográfico, fato ocorrido pela primeira vez em 1858 na construção da Carta da França com o Cel. Aimée Laussedat. Desde então esta técnica se encontra na vanguarda tecnológica, evoluindo em conjunto com as novas inovações científicas.

O desenvolvimento da aviação após a Primeira Guerra Mundial alçou a Fotogrametria como destaque no mapeamento de áreas, o que gerou novas demandas por instrumentos de melhor acuidade, como conjuntos de lentes e sistemas mecânicos. Nas últimas décadas, o crescente avanço da área tecnológica, principalmente no que se refere ao desenvolvimento de métodos computacionais gerou o aparecimento de um novo paradigma, a Fotogrametria Digital.

Atualmente a técnica da aerofotogrametria é a mais utilizada para o mapeamento de áreas com grande dimensão, principalmente no mapeamento sistemático. Isso ocorre principalmente em razão de apresentar produtos precisos a custos relativamente baixos. (RIBEIRO, 1995).

Para o estudo da Fotogrametria é necessário ter dois conceitos bem definidos: estereoscopia e paralaxe. A estereoscopia diz respeito à visualização de um mesmo foco por dois mecanismos de captação de imagens. A paralaxe é o deslocamento aparente na posição de um objeto, em relação a um ponto de referência, causado por uma mudança na posição de observação (TOMMASELLI, 2004).

2.1.1 Geometria da Fotografia

Ao tomar a fotografia de um objeto qualquer, esta pode ser classificada de acordo com a sua geometria (WOLF, 1983):

- fotografia vertical: é tomada quando o eixo ótico da câmara encontra-se na vertical ou aproximadamente na vertical. Normalmente uma fotografia vertical é tomada com o eixo ótico ligeiramente inclinado; refere-se a esta foto como inclinada. Esta inclinação accidental do eixo ótico deve ser menor que três graus;
- fotografia baixo-oblíqua: é tomada com o eixo ótico inclinado, mas não o suficiente para mostrar o horizonte;
- fotografia alto-oblíqua: é uma foto tomada com o eixo ótico suficientemente inclinado para mostrar o horizonte terrestre;
- fotografia convergente: é um par de fotos baixo-obíquas em que o eixo ótico da câmara converge em direção ao outro. As duas fotos cobrem aproximadamente a mesma porção do terreno.

As fotografias oblíquas, apesar de haver uma limitação geométrica que dificulta seu uso para o mapeamento, são úteis por representarem uma área extensa e pelo realce do relevo fotografado, que são itens importantes para o reconhecimento do terreno. As fotografias convergentes, segundo Ruy (2008), tem maior utilização na Fotogrametria terrestre, dada a difícil adequação para obtenção das fotografias por sensores aerotransportados.

Quando a foto é vertical, pode-se, através de uma relação geométrica (Figura 1), determinar uma relação entre a fotografia e a cena fotografada (objeto).

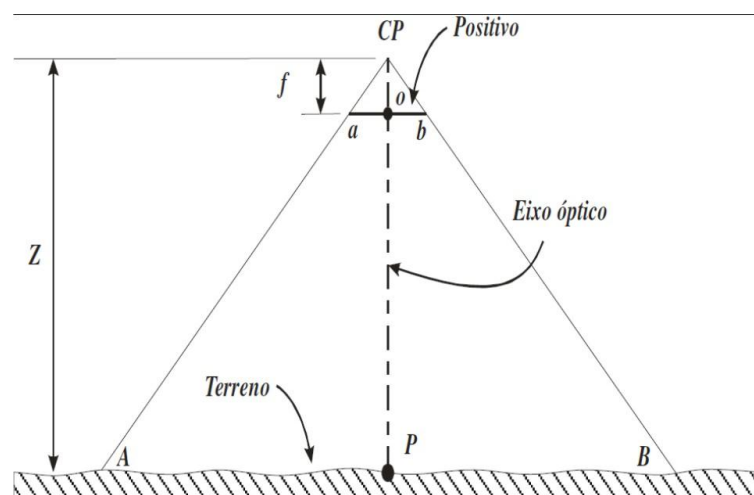


Figura 1. Relação geométrica entre a foto e a cena (REISS, 2008).

Onde os parâmetros envolvidos nessa relação são apresentados a seguir:

f é a distância focal, obtido nas propriedades da imagem;

AB é a distância conhecida no terreno;

ab é a distância medida na imagem;

Z é a distância câmara-objeto (altura de vôo).

Desta forma, por semelhança de triângulos, f está para Z assim como ab está para AB , ou seja,

$$\frac{f}{Z} = \frac{ab}{AB} \quad (1)$$

Assim, qualquer medida na fotografia pode ser relacionada com a cena. Entretanto as medidas realizadas na foto e na cena possuem diferentes sistemas de coordenada. Os parâmetros apresentados estabelecem a relação entre os dois sistemas (foto e objeto).

No exemplo anterior se considera que a superfície da cena é plana. Quando esta é irregular (Figura 2), utiliza-se a seguinte expressão:

$$\frac{f}{H-h_{AB}} = \frac{ab}{AB} \quad (2)$$

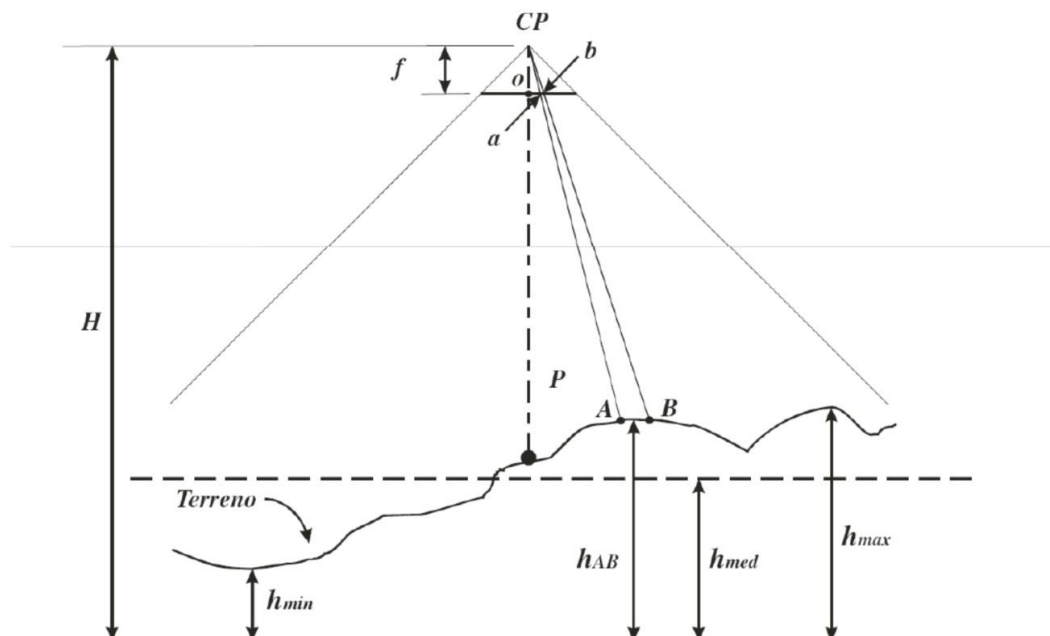


Figura 2. Relação geométrica entre a foto e a cena quando o terreno é irregular (REISS, 2008).

Onde,

H é a altitude de câmara no momento da tomada da fotografia;

h_{AB} é a média da altitude dos pontos A e B.

Os procedimentos apresentados se referem a apenas uma fotografia, no entanto, quando se tem duas ou mais fotografias de uma mesma feição ou objeto, tiradas de diferentes posições, pode-se gerar modelos tridimensionais destes, além de extrair suas medidas.

A distância focal é a distância entre o ponto nodal posterior e o plano focal imagem da objetiva. Brito e Coelho Filho (2007) define o ponto nodal posterior como sendo o ponto de saída de um raio de luz do sistema de lentes. As distâncias focais que normalmente são abordadas seguem o conceito de Wolf (1983), que menciona a *distância focal equivalente* (f), como a que é efetivamente próxima ao centro das lentes da câmara, e a *distância focal calibrada* (c), que produz uma distribuição média global da distorção radial das lentes.

2.1.2 Câmaras Fotográficas

As câmaras utilizadas em Fotogrametria são as chamadas câmaras métricas, que permitem que as informações extraídas tenham as propriedades geométricas conhecidas. Para tanto há diversas informações que caracterizam essas câmaras, por exemplo, o ângulo do campo de visada, que pode ser pequeno angular (menor de 50°), normal (entre 50° e 75°), grande angular (entre 75° e 100°) e super grande angular (maior de 100°). A determinação do ângulo de abertura da câmara acontece em função da distância focal e do tamanho do quadro da câmara.

As câmaras não-métricas também podem ser usadas para o registro de fotografias aplicadas à Fotogrametria, porém, estas devem possuir componentes com certa qualidade geométrica. Apesar destes componentes óticos e mecânicos não serem ideais como os das câmaras métricas, é possível que hajam informações extraídas das fotografias, desde que estas câmaras estejam devidamente calibradas. Há diversas vantagens de usar esse tipo de câmara, como por exemplo, seu custo reduzido, leveza do equipamento e a grande disponibilidade no mercado.

Segundo Cramer (2004 *apud* RUY, 2008) as câmaras digitais se dividem em três categorias, segundo a resolução do sensor: pequeno, médio e grande formato. As câmaras de pequeno formato têm até 6 megapixels, elas são usadas domesticamente e para captura de imagens de pequenas áreas. As câmaras de médio formato têm em torno de 15 megapixels, e em geral, são modelos profissionais que são usadas por fotógrafos em projetos ambientais e mapeamentos de pequenas áreas. As câmaras com resolução superior a 40 megapixels são as

de grande formato, que possibilitam maior rendimento em projetos de mapeamento de grandes áreas, aliando as vantagens da tecnologia digital à cobertura mais extensa do terreno.

2.1.3 Mosaicos Fotogramétricos

A montagem das fotografias gerando um mosaico é realizada muitas vezes para se formar uma vista ampla da área fotografada. Esse procedimento causa a impressão de continuidade entre as fotografias, podendo se entender como uma única fotografia formada por todas as outras.

Para compreensão da montagem dos mosaicos é necessário entender as sobreposições que acontecem em um recobrimento aéreo. Segundo Brito e Coelho Filho (2007), tal efeito permite que haja maior operacionalidade das fotografias obtidas, apesar de a quantidade de fotografias ser maior. As sobreposições podem ser de dois tipos: lateral e longitudinal. A lateral acontece entre as faixas do bloco, e seu valor na maioria dos casos é de aproximadamente 30%. A sobreposição longitudinal ocorre entre as fotografias e é normalmente superior a 60%. A Figura 3 apresenta um exemplo de fotografias com sobreposição lateral e longitudinal.



Figura 3. Exemplo de sobreposições lateral e longitudinal (BRITO; COELHO FILHO, 2007).

Segundo Wolf (1983) os mosaicos podem ser classificados de acordo com o processo de produção e com o nível de controle, sendo dessa maneira: controlados, semi-controlados e não-controlados.

Os mosaicos controlados são preparados a partir de fotografias retificadas na mesma escala. Para tanto, são usados pontos de controle, que são impressos em uma folha base sobre a qual são ajustadas as fotografias retificadas. Segundo Andrade (1998), retificar uma imagem consiste em modificar os ângulos referentes à atitude da câmara, bem como a distância focal,

resultando em projetá-la, segundo seu feixe perspectivo, para um plano horizontal. Em fotografias aéreas esse processo é interessante para transformar as imagens, tornando-as perfeitamente verticais. Segundo Meneses (2007), a diferença entre retificação e ortorretificação está no fato de que a segunda também elimina as distorções causadas pelo relevo da área fotografada, visto que há transformação da perspectiva cônica para a ortogonal.

Mosaicos não-controlados são preparados pela justaposição das fotografias, simplesmente pela observação de seus detalhes, e dessa maneira esse é um método rápido para a elaboração de mosaicos que não necessitam de grande precisão.

Já os mosaicos semi-controlados combinam características dos mosaicos controlados e não-controlados. É possível gerar esses produtos a partir de fotografias aéreas não retificadas e pontos de controle ou através de fotografias retificadas, porém sem os pontos de controle. Esse tipo de mosaico é uma alternativa quando há a necessidade de economia e precisão.

Outro tipo de mosaico bastante utilizado é o fotoíndice, que é um mosaico não-controlado especial, onde se apresentam identificações referentes a cada fotografia que compõem o bloco. É possível, para uma ilustração melhor, que seja inserida a toponímia das principais feições da área fotografada.

2.1.4 Referenciais Adotados

Para uma melhor compreensão dos processos fotogramétricos realizados é necessário o conhecimento sobre os sistemas de coordenadas utilizados nos procedimentos, que serão apresentados a seguir.

- Espaço Imagem

Hasegawa (2004) cita o uso do espaço físico de cada sistema. Assim, o espaço imagem é definido quando utiliza o espaço compreendido entre o ponto nodal posterior e o plano do negativo, associando-se assim, as informações aos sistemas de coordenadas referenciadas às imagens.

O Espaço Imagem pode ser apresentado por diferentes sistemas de coordenadas, que serão descritos a seguir.

- a) Fiducial

Geralmente durante a realização de vôos aerofotogramétricos, no instante da tomada da fotografia são inseridas marcas na mesma, que materializam um sistema próprio (o

fiducial), esses pontos são denominados de marcas fiduciais. Todas as fotografias de uma câmara possuem a mesma marcação, dessa maneira é possível determinar a geometria interna da câmara em questão.

Dessa forma no sistema fiducial, as coordenadas medidas na fotografia estão referenciadas às marcas existentes nas bordas da mesma. A origem do sistema é o centro fiducial, definido com base na posição das marcas, conforme Figura 4. O eixo x do sistema coincide com a reta definida pelas marcas fiduciais e é paralelo à direção de vôo, sendo positivo neste sentido. O eixo y é orientado com relação ao eixo x, com um ângulo anti-horário de 90°.

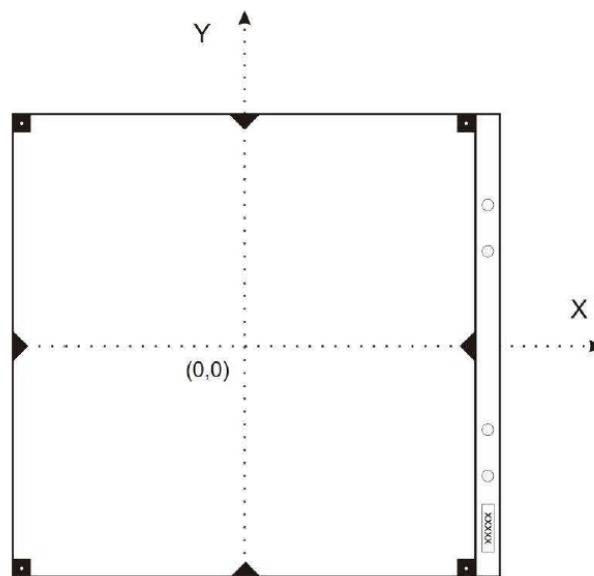


Figura 4. Sistema fiducial (DEMARQUI, 2007).

b) Fotogramétrico

Segundo Hasegawa (2004), o sistema de coordenadas fotogramétrico é um sistema que usa como origem o centro perspectivo da câmara. Seus eixos são paralelos e orientados em relação aos eixos do sistema fiducial. O centro perspectivo, que representa o ponto de vista da fotografia, é definido a partir do ponto principal, transladado da distância focal da câmara, como mostrado na Figura 5. O ponto principal é definido como o ponto no qual o eixo z do sistema de coordenadas da foto intercepta seu plano perpendicularmente.

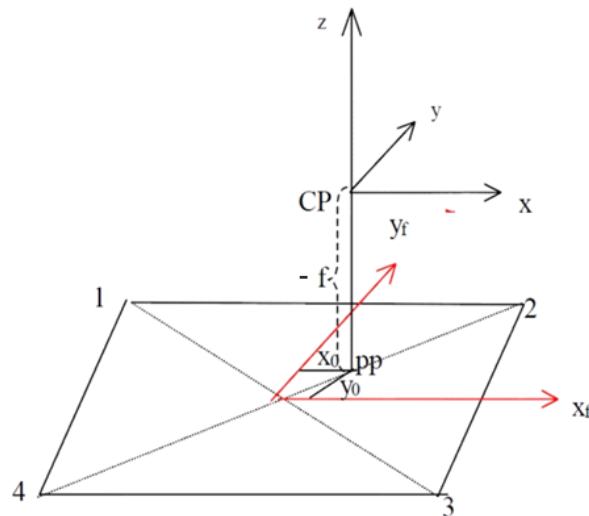


Figura 5. Sistema fotogramétrico (HASEGAWA, 2004).

- Espaço Objeto

É o espaço imageado. Costuma-se considerar como um sistema tridimensional dextrógiro, sendo sua origem variável. Quando se está trabalhando com informações da superfície topográfica obtidas por um sensor aerotransportado, o espaço objeto pode ser um referencial geodésico cartesiano ou cartesiano local.

- Sistemas Arbitrários

Esses sistemas apresentam características especiais, e são usados dependendo da aplicação desejada e dos instrumentos que são utilizados nos procedimentos fotogramétricos. Podem ser definidos tanto no Espaço Imagem, quanto no Espaço Objeto. Alguns exemplos de sistemas arbitrários são: sistema de coordenadas com origem na foto da esquerda; sistema de coordenadas com base coincidente com o eixo X; e sistema de coordenadas da tela do computador.

O sistema de coordenadas da tela tem uma origem característica, que leva em consideração o canto superior esquerdo da fotografia como origem, como mostrado na Figura 6.

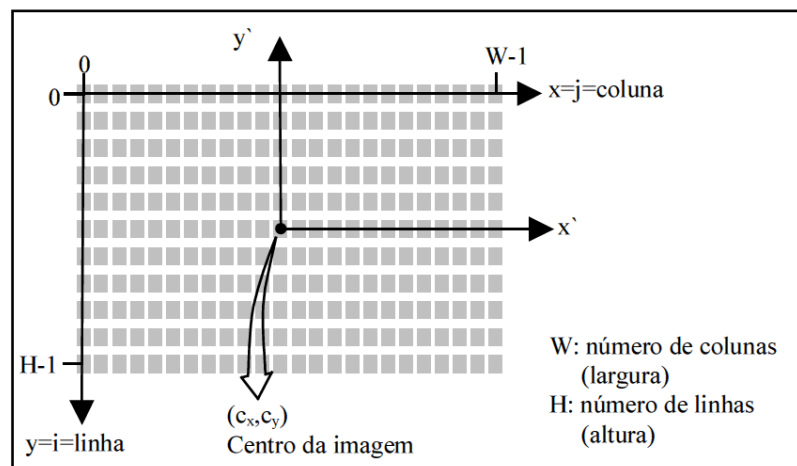


Figura 6. Sistema de coordenadas da tela (HASEGAWA, 2004).

Sendo as dimensões dos pixels conhecidas, a transformação entre esse sistema e o fiducial pode ser realizada pela Equação 3:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0 & -S_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x - (W - 1)/2 \\ y - (H - 1)/2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde: x' e y' as coordenadas no sistema fiducial;

S_x e S_y as dimensões do pixel;

x e y as coordenadas no sistema da tela.

2.1.5 Orientações da Câmara

A orientação consiste no procedimento de obtenção dos parâmetros para saber as condições em que foram registradas as fotografias, tanto na parte interior da câmara como sua localização perante o referencial do objeto.

As orientações da câmara são divididas em interior e exterior, sendo que nessa última podem ser usados os procedimentos de orientação relativa e absoluta, caso esteja-se trabalhando com fotografias analógicas.

- Orientação Interior

Segundo Andrade (1998), orientação interior é a operação de recuperação da posição da fotografia em relação à câmara, dessa maneira é possível realizar a reconstrução do feixe perspectivo que gerou as fotografias.

Hasegawa (2004) diz que os erros da orientação interior podem se dividir em três grupos: deformação do filme, distorção das lentes e refração atmosférica. Mais informações sobre os erros inerentes à orientação interior podem ser obtidas nesta mesma fonte.

Brito e Coelho Filho (2007) cita que para a reconstrução do sistema interno da câmara no instante da tomadas das fotografias usam-se as informações das coordenadas das imagens apenas em pixels, pois as fotografias obtidas não possuem informações métricas.

- Orientação Exterior

Consiste na determinação da posição e atitude da fotografia em relação ao referencial do objeto. Para tanto devem ser determinadas as coordenadas tridimensionais do centro perspectivo e os ângulos de rotação do sensor, chegando-se a um total de seis parâmetros ($\kappa, \phi, \omega, X_{CP}, Y_{CP}$ e Z_{CP}), esses parâmetros estão identificados na Figura 7, à esquerda os ângulos de rotação e à direita a representação do centro perspectivo no sistema do objeto. Para isso ser possível é necessário que se tenha pontos de apoio no sistema de coordenadas do objeto, que sejam identificáveis nas fotografias, permitindo que suas coordenadas sejam obtidas no sistema fotogramétrico.

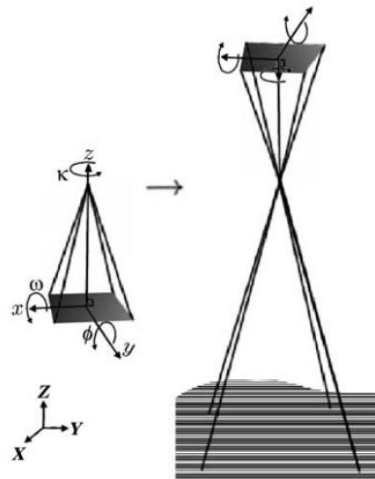


Figura 7. Parâmetros da orientação exterior. (BRITO; COELHO FILHO, 2007).

2.1.6 Equações de Colinearidade

Para se realizar certos processos fotogramétricos (como a restituição, que será apresentada adiante) é necessário que haja um modelo matemático que associe as informações das fotografias e do objeto.

O modelo de colinearidade, bastante usado nos processos fotogramétricos, consiste em um modelo que une por uma reta o ponto no espaço objeto, o ponto na imagem e o centro

perspectivo. Com esse procedimento é possível realizar a formação da imagem. Toda a formulação se baseia em semelhança de triângulos, onde os parâmetros da relação entre os eixos da imagem são proporcionais aos parâmetros do terreno. Conforme Galo (2004), as equações de colinearidade são as apresentadas a seguir:

$$\begin{aligned} x' &= x_0 \pm \Delta x - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_{CP}) + r_{12} \cdot (Y - Y_{CP}) + r_{13} \cdot (Z - Z_{CP})}{r_{31} \cdot (X - X_{CP}) + r_{32} \cdot (Y - Y_{CP}) + r_{33} \cdot (Z - Z_{CP})} \\ y' &= y_0 \pm \Delta y - c \cdot \frac{r_{21} \cdot (X - X_{CP}) + r_{22} \cdot (Y - Y_{CP}) + r_{23} \cdot (Z - Z_{CP})}{r_{31} \cdot (X - X_{CP}) + r_{32} \cdot (Y - Y_{CP}) + r_{33} \cdot (Z - Z_{CP})} \end{aligned} \quad (4)$$

Onde:

x' e y' são as coordenadas do ponto no sistema fiducial;

x_0 e y_0 são as coordenadas do ponto principal;

c é a distância focal calibrada;

X , Y e Z são as coordenadas do ponto no referencial do objeto;

X_{CP} , Y_{CP} e Z_{CP} são as coordenadas do centro perspectivo da câmara no referencial do objeto;

$R_{i,j}$ são os elementos da matriz de rotação referenciada aos ângulos κ, φ e ω , cada um referente a um eixo de rotação (ω está para x , φ está para y e κ está para z), sendo:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi \cdot \cos \kappa & \cos \varpi \cdot \sin \kappa + \sin \varpi \cdot \sin \phi \cdot \cos \kappa & \sin \varpi \cdot \sin \kappa - \cos \varpi \cdot \sin \phi \cdot \cos \kappa \\ -\cos \phi \cdot \sin \kappa & \cos \varpi \cdot \cos \kappa - \sin \varpi \cdot \sin \phi \cdot \sin \kappa & \sin \varpi \cdot \cos \kappa + \cos \varpi \cdot \sin \phi \cdot \sin \kappa \\ \sin \phi & -\sin \varpi + \cos \phi & \cos \varpi \cdot \cos \phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

E finalmente Δx e Δy representam as distorções causadas pelos erros sistemáticos, sendo negativa quando o plano está no negativo e positiva quando está no diapositivo, e são descritas pelas expressões:

$$\Delta x = \delta x_r + \delta x_d + \delta x_a \quad (6)$$

$$\Delta y = \delta y_r + \delta y_d + \delta y_a$$

Onde δx_r e δy_r são os elementos referentes à distorção radial simétrica, δx_d e δy_d os elementos da distorção descentrada e δx_a e δy_a os elementos da afinidade.

Segundo Galo (2004), detalhando as expressões (6) tem-se que:

$$\Delta x = (x' - x_0) \cdot (K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_3 \cdot r^6) + P_1 (r^2 + 2 \cdot (x' - x_0)^2) + 2 \cdot P_2 \cdot (x' - x_0) \cdot (y' - y_0) + A(x' - x_0)$$

$$\Delta y = (y' - y_0) \cdot (K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_3 \cdot r^6) + P_2 (r^2 + 2 \cdot (y' - y_0)^2) + 2 \cdot P_1 \cdot (x' - x_0) \cdot (y' - y_0) + B(x' - x_0)$$

Sendo K_1 , K_2 e K_3 os elementos representantes da distorção radial simétrica, P_1 e P_2 os parâmetros da distorção descentrada e A e B os da afinidade.

Com r representando a equação de distância entre o ponto principal e o ponto de interesse no sistema fotogramétrico. Este é dado pela seguinte equação:

$$r = \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2} \quad (7)$$

A determinação das coordenadas no referencial do objeto, utiliza as equações de colinearidade inversa, as quais permitem a execução de diversos procedimentos fotogramétricos, como a restituição.

2.1.7 Fototriangulação

O conceito de fototriangulação, de Lugnani (1987), diz que é um método de determinação de coordenadas de pontos de interesse no espaço objeto. Essa determinação é possível dada a relação geométrica entre as fotografias adjacentes, o controle de campo mediante pontos de apoio, e o conjunto de valores aproximados de parâmetros de orientação da fotografia.

Segundo Andrade (1998) o maior objetivo da fototriangulação é fornecer coordenadas precisas para os pontos necessários para a orientação de modelos fotogramétricos para a restituição ou elaboração de ortofotos.

Geralmente os pontos usados no procedimento de fototriangulação – tanto os de ligação (*tie points*) quanto os de apoio terrestre – estão localizados na região de Von Grüber em cada fotografia. No que diz respeito ao bloco de fotografias, a disposição dos pontos de apoio terrestre deve ser nas suas extremidades, bem como nas junções entre as faixas. A quantidade de pontos de apoio vai depender se o fator escolhido para a aplicação for de um ponto a cada três, quatro ou cinco modelos. Essa escolha fica a critério de cada planejamento.

O planejamento da fototriangulação deve ter início no planejamento da cobertura fotogramétrica, devido a necessidade de saber a quantidade de pontos de campo, a necessidade de se fazer um vôo apoiado, entre outros fatores que influenciam os procedimentos futuros, visto que deve-se ter confiança de que irá se ter todos os dados necessários para a realização da triangulação com qualidade.

Normalmente os pontos de apoio são obtidos usando um referencial geodésico, para que as informações resultantes desse processo sejam intercambiáveis com outras informações provenientes das mais diferentes fontes. Em um processo de fototriangulação os pontos trabalhados podem ser dos tipos: pontos de apoio terrestre e pontos fotogramétricos.

Cabe destacar o procedimento de fototriangulação por feixe de raios (*bundle method*), que segundo Brito e Coelho Filho (2007) pode ser entendido como uma resseção espacial simultaneamente à execução da interseção espacial para um conjunto de imagens digitais do terreno. Sendo a resseção espacial um método para a obtenção dos parâmetros de orientação exterior e a interseção espacial usada para determinar as coordenadas de um ponto do espaço-objeto que esteja em pelo menos duas fotografias. Lugnani (1987) cita que neste modelo uma foto é considerada como um feixe de retas, e cada uma dessas retas é definida pela condição de colinearidade de três pontos. Na fototriangulação por feixe de raios, único método totalmente analítico, os parâmetros de orientação exterior de todas as imagens trabalhadas são obtidos por meio de um único ajustamento.

Segundo conclusão de Brito e Coelho Filho (2007) os métodos de fototriangulação representam um grande avanço das técnicas fotogramétricas, por permitir a obtenção de coordenadas de vários pontos no terreno a partir da interpolação de apenas alguns pontos de campo. Observa-se a importância da realização dessa operação seja feita com qualidade, dado que os parâmetros obtidos nesse passo são essenciais na retificação, ortorretificação e restituição.

2.1.8 Restituição

Segundo Oliveira (1993) a restituição trata da elaboração de um mapa, ou parte dele, a partir de fotografias aéreas e de dados de controle geodésico, por meio de instrumentos fotogramétricos. Hasegawa (2004) complementa citando que os instrumentos de restituição – os restituidores – podem ser analógicos, analíticos ou digitais. Também que o produto gerado na restituição, primeiro esboço do mapa, é denominado de minuta de restituição. Esse produto já consta com as informações precisas dos pontos no espaço objeto.

Segundo Brito e Coelho Filho (2007), a restituição objetiva a interpretação das diversas feições naturais ou artificiais manifestas no terreno, extraíndo-as geograficamente referenciadas ao espaço-objeto. É importante salientar que a restituição fotogramétrica normalmente é baseada na estereoscopia, a partir de um esteropar. Assim, a restituição pode ser desenvolvida a partir de múltiplas fotografias do objeto. Este processo é fundamentado no Desenho Projetivo e na Perspectiva Exata, onde são determinadas as posições no espaço (restituição) dos pontos de interesse, a partir da interseção dos raios luminosos que passam através do centro óptico (centro perspectivo) e nos pontos homólogos existentes nas várias fotos.

Hasegawa (2004) ainda fala sobre o funcionamento dos restituidores, inclusive dos analíticos, onde a projeção dos feixes perspectivos na reconstrução é realizada matematicamente, eliminando assim, os erros provocados pelos componentes mecânicos ou óticos, que em sua estrutura são poucos. As informações dos produtos gerados, por serem numéricas, se tornam mais flexíveis e maleáveis na sua utilização.

2.1.9 Ortofoto

Com o crescente emprego da Fotogrametria Digital no mapeamento, observou-se a possibilidade de utilização de fotografias para geração direta de um mapa. Ou seja, a fotografia além de ser um insumo para a confecção de mapas, passa a ser um deste, quando devidamente tratada e com a adição de algumas informações que são relevantes na confecção do mapa. Este produto é denominado ortofotocarta.

Entretanto, fotografias em seu estado bruto não podem substituir, por exemplo, mapas topográficos de forma ideal. Tal fato ocorre, pois a tomada da fotografia representa uma realidade gerada a partir de uma projeção cônica central, enquanto o mapa topográfico é gerado em projeção ortogonal à superfície mapeada.

Segundo Lima e Loch (1998), para que uma fotografia aérea apresente-se análoga a uma carta topográfica, do ponto de vista quantitativo, a fotografia deveria atender às seguintes condições ideais:

- terreno perfeitamente plano e horizontal;
- perfeita verticalidade do eixo ótico da câmara fotogramétrica;
- linha de vôo perfeitamente horizontal, sem variações na altitude do vôo entre as sucessivas estações de tomadas das fotografias.

Sendo estas condições ideais bastante improváveis de se obter, procedimentos de correção das fotografias como a ortorretificação são aplicadas. A técnica de ortorretificação elimina as distorções relativas à rotação da câmara, além de remover as distorções devidas ao relevo da área fotografada, realizando-se a transformação da perspectiva cônica para a ortogonal.

Para realizar a ortorretificação utilizam-se informações de inclinação, posição e distorção da câmara aérea no instante da tomada das fotografias além de informações referentes ao terreno que são obtidas através de um modelo digital de terreno.

2.1.10 Anaglifo

É uma imagem elaborada a partir de um par de fotografias com uma área de sobreposição que permite fornecer o efeito tridimensional quando vista com óculos de duas cores. O efeito de profundidade é produzido através da distância entre estas duas fotografias e de duas camadas de cor sobrepostas. O córtex visual do cérebro humano funde as imagens sobrepostas na percepção de uma cena tridimensional.

O anaglifo consiste no uso de filtros de cores complementares, usualmente vermelho e azul ou verde, no par de fotografias estereoscópicas para separar as projeções da esquerda e direita. Usualmente, o filtro azul ou verde é colocado sobre a fonte de luz do projetor esquerdo simultaneamente ao uso do filtro vermelho no projetor direito, o que permite que o operador, utilizando os óculos com lentes vermelha e azul ou verde, observe a imagem projetada em terceira dimensão (SCHULER; ARAUJO, 2005). A Figura 8 mostra os óculos utilizados para a visualização tridimensional do anaglifo.



Figura 8. Óculos de anaglifo (PEOPLEWARE No Comments, 2010).

2.2 MODELO DIGITAL DE TERRENO – MDT

A representação de uma superfície exige uma grande quantidade de pontos no terreno de forma que esta representação seja a mais próxima da verdadeira. Sabe-se que é inviável o

levantamento deste elevado número de pontos em campo, assim a utilização de um modelo matemático que represente a superfície de forma contínua, como um modelo digital de terreno pode ser gerado. Há duas estruturas que são comumente utilizadas para geração de MDT, a malha retangular e a rede triangular irregular (TIN - *Triangular Irregular Network*):

- Malha retangular

Uma malha regular retangular (Figura 9) é um poliedro de faces retangulares. A geração da grade regular é feita através da estimativa de valores de cota de cada ponto através de um conjunto de valores de entrada. Esses vértices dos poliedros podem ser os pontos amostrados, caso tenham sido adquiridos nas mesmas localizações (x;y) que definem a grade desejada. É a estrutura mais utilizada para a representação digital do relevo, com cada célula contendo o valor médio da elevação, armazenado em uma matriz bidimensional. De maneira geral, os modelos digitais de terreno baseados em grades são amplamente disponíveis e utilizados devido à sua simplicidade, facilidade de processamento e eficiência computacional. O modelo retangular possui otimiza o armazenamento de dados, porém a uniformidade do tamanho dos pixels traz certas limitações na representação do modelo digital de elevação, não permitindo que as características fisiográficas do relevo sejam levantadas com níveis de detalhes diferenciados. Nos modelos matriciais, em que todas as células têm, necessariamente, o mesmo tamanho, a correta representação de regiões com alta variabilidade do fenômeno estudado conduz à superamostragem de áreas que possuem variações pouco significativas, resultando no aumento do volume de dados armazenado. Como principais desvantagens dos modelos digitais de terreno baseados neste modelo, está a redundância de dados em áreas de superfície uniforme, que eleva a necessidade de armazenamento, e a dificuldade de adaptação desse modelo para representar relevos complexos sem que se promova uma redução no tamanho das células (BENDA, 2006).

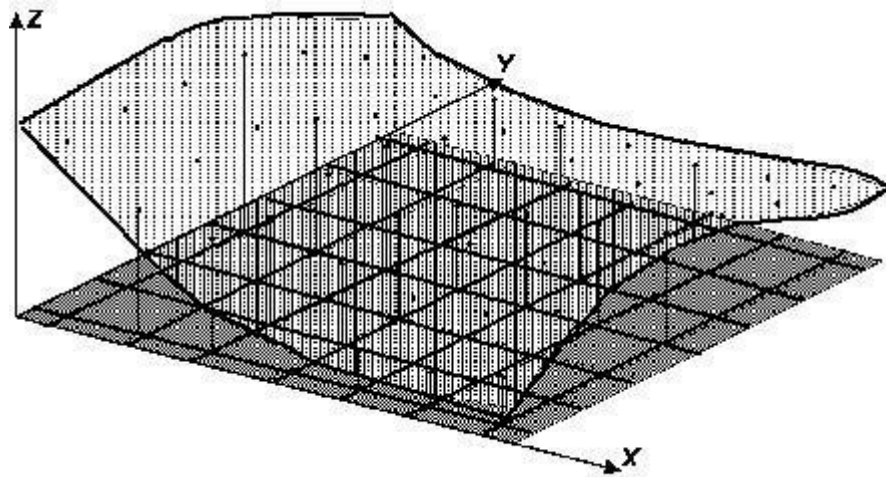


Figura 9. Grade retangular regular (INPE, 2010).

- Rede Triangular Irregular

Na modelagem de terreno utilizando a TIN, cada polígono que forma uma face do poliedro é um triângulo, conforme Figura 10, onde os vértices do triângulo são os pontos amostrados da superfície. Os valores planimétricos e altimétricos destes pontos são mantidos sem nenhuma transformação para uma estrutura intermediária de dados. Um modelo preciso mantém consistência com o grau de variação das altitudes obtidas no terreno. Quando o terreno torna-se mais irregular a resolução do modelo deve aumentar, sendo necessária a inclusão de mais pontos nas áreas de alta complexidade (WEIBEL; HELLER, 1991 *apud* MATOS, 2005). Com este tipo de estrutura pode-se criar linhas de descontinuidade de acidentes geográficos (*breaklines*) aumentando a informação do MDT. Estas linhas representam importantes descontinuidades naturais (divisores de água, lagos, canais, falhas geológicas, etc.) e artificiais (reservatórios, prédios, etc.) na inclinação do terreno (MATOS, 2005).

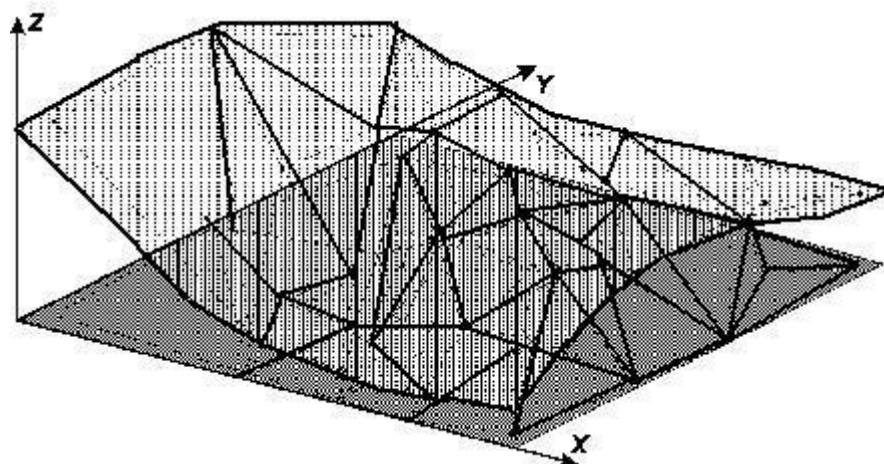


Figura 10. Rede triangular irregular (INPE, 2010).

Uma grande vantagem da TIN é a utilização dos próprios pontos amostrados para modelar a superfície, sem a necessidade de qualquer tipo de interpolação sobre os mesmos. A desvantagem da grade irregular é que para obter os dados derivados das grades triangulares há mais complexidade e, portanto, mais demorados que os dados da grade retangular.

2.3 POSICIONAMENTO GEODÉSICO POR SATÉLITES ARTIFICIAIS

Saber sua exata localização e como se deslocar de um lugar ao outro sem errar o caminho de volta sempre foi um dos desafios do ser humano. Antigamente os astros eram muito usados como referenciais de navegação, entretanto as posições obtidas eram sempre aproximadas. Com o advento da eletrônica alguns sistemas de posicionamento foram desenvolvidos como o *Long-Range Navigation System* (Loran), o *Low frequency continuous wave phase comparison navigation* (Decca) e o *Global low frequency navigation system* (Omega). Esses sistemas utilizam ondas de rádio, entretanto possuem algumas limitações de operação, como a não cobertura global.

De forma a melhorar a navegação e o posicionamento global, surgiram os sistemas baseados no uso de satélites artificiais, o primeiro dele foi o *Navy Navigation Satellite System* (NNSS), mais conhecido como Transit, cujas medidas eram baseadas no efeito Doppler (Seeber,1993). Nesse sistema, as órbitas dos satélites eram muito baixas e não havia quantidade elevada destes equipamentos. Como consequência, não se tinha como obter posições com muita frequência. Mesmo assim, o NNSS foi muito utilizado em posicionamento geodésico. Entretanto, faltava uma solução que oferecesse boa precisão, facilidade de uso e custos acessíveis para os usuários (MONICO, 2008).

Assim, na década de 1970 nos Estados Unidos da América (EUA), surgiu uma solução para este problema: o *Global Positioning System* (NAVSTAR-GPS). Paralelamente, a antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) apresentava um sistema similar, o *Global Orbiting Navigation Satellite System* (GLONASS). No fim da década de 1990 a Agência Espacial Européia propôs o desenvolvimento do Galileo, que atualmente encontra-se em fase de testes. Outros países também estão desenvolvendo seus próprios sistemas de navegação por satélites artificiais, é o caso da China e Índia. Dessa forma, adotou-se um termo genérico para se referir a todos sistemas de navegação por satélite, denominado *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS).

2.3.1 NAVSTAR-GPS

O GPS é um sistema de radionavegação desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos EUA visando ser o principal sistema de navegação das Forças Armadas norte-americanas. Esse sistema resultou da fusão de dois programas financiados pelo governo norte-americano para desenvolver um sistema de navegação de abrangência global (LEICK, 1994). Devido a alta acurácia obtida por este sistema surgiu uma grande comunidade usuária dos mais variados segmentos da comunidade civil.

O GPS é dividido em 3 segmentos (MONICO, 2008):

- espacial – segmento que está associado à constelação dos satélites e seus sinais;
- de controle – monitora e faz a manutenção do sistema e;
- de usuários – é o segmento destinado aos usuários em geral e está em constante ampliação.

O sistema proporciona dois tipos de serviços de posicionamento: *Standard Positioning Service* (SPS – Serviço de Posicionamento Padrão) o qual é disponível a todos os usuários, fornecendo uma precisão horizontal de aproximadamente 100m e; *Precise Positioning Service* (PPS – Serviço de Posicionamento Preciso) cujo acesso é somente para pessoas autorizadas pelo governo norte-americano. Este serviço proporciona precisão horizontal 15 metros.

O princípio básico de navegação pelo GPS consiste na medida de distâncias entre o usuário e, no mínimo, quatro satélites. Sabendo as coordenadas dos satélites em um sistema de referência adequado é possível calcular as coordenadas da antena do usuário no mesmo sistema de referência dos satélites (MONICO, 2008).

Considerando apenas geometria do sistema somente três distâncias (não pertencentes ao mesmo plano) seriam suficientes para determinar a posição do receptor, entretanto uma quarta medida é necessária devido ao não sincronismo entre o relógio do usuário e o dos satélites. Cada satélite GPS transmite duas ondas portadoras que estão na banda L do espectro eletromagnético, são elas:

- L1: 1575,42 Megahertz, $\lambda = 19$ cm
- L2: 1227,60 Megahertz $\lambda = 24$ cm, onde λ é o comprimento de onda.

Nestas ondas portadoras são modulados, em fase, os códigos que formam o *Pseudo Random Noise* (PRN – Códigos pseudo aleatórios) os quais permitem a realização das medidas de distância a partir da medida de tempo de propagação da modulação.

Dois diferentes códigos PRN são transmitidos por cada satélite: o código C/A (*Coarse Acquisition* – fácil aquisição) e o código P (código preciso). O código C/A é gerado com base no produto de duas seqüências pseudo-aleatórias. Esse código é transmitido apenas na L1, sendo que cada satélite transmite um código C/A único. Já o código P é gerado por meio do produto de dois outros códigos, e é transmitido tanto na L1 (P1) quanto na L2 (P2). Outra diferença em relação ao código C/A é que o código P é mais preciso que o anterior e pode ser criptografado, tornando-se o código Y. Por razões de segurança, usuários civis não podem acessá-lo.

2.3.1.1 Observáveis GPS

As observáveis básicas do GPS que possibilitam a determinação de posição, velocidade e tempo, segundo Seeber,1993 e Langley, 1996a podem ser classificadas em Pseudodistância e Fase da onda portadora que serão descritos a seguir:

a) Pseudodistância

Os códigos PRN transmitidos pelos satélites são usados para determinar a pseudodistância que é distância entre a antena do satélite e a antena do receptor. Esta distância é chamada de *pseudo* devido ao não-sincronismo entre o relógio do usuário e o dos satélites. O receptor gera uma réplica do código produzido no satélite e o atraso entre a chegada de uma transição particular do código gerado no satélite e sua réplica gerada no receptor é o tempo de propagação do sinal no trajeto satélite-receptor. A pseudodistância é esse tempo de propagação multiplicada pela velocidade da luz. Além do não-sincronismo entre o relógio do

usuário e o dos satélites, a pseudodistância também é afetada por outros efeitos como o atraso troposférico e ionosférico, multicaminho e ruído no receptor.

Dependendo do tipo do receptor, pode-se obter uma, duas ou três pseudodistâncias, através dos códigos C/A e P1 modulados em L1 e do código P2 modulado em L2 (MONICO, 2008).

b) Fase da onda portadora

As ondas portadoras L1 e L2 também podem determinar distâncias, sendo que esta é uma observável muito mais precisa e é dada em ciclos de onda. A diferença de fase do sinal recebido pelo satélite e sua réplica gerada pelo receptor é a medida de fase da portadora. Na primeira medida obtém-se apenas a parte fracional do ciclo e por isso não se sabe na primeira época de observação a quantidade de ciclos entre o satélite e o receptor, essa incógnita é denominada Ambigüidade e é solucionada no processo de ajustamento. A partir da primeira época o receptor passa a contar o número de ciclos inteiros que entra.

Assim como a pseudodistância, a solução da Ambigüidade é afetada pelos efeitos ionosféricos, pela refração troposférica, pelo multicaminho e por outros erros que não são modelados. A geometria dos satélites também afeta a solução da Ambigüidade. No ajustamento a Ambigüidade é representada como um vetor de números reais, associado a uma Matriz Variância-Covariância, denominando esta solução como flutuante. Quando o vetor das Ambigüidades é composto por números inteiros, chama-se de solução fixa. É importante ressaltar que quando há uma solução fixa incorreta prefere-se a solução flutuante, mesmo que esta tenha sua qualidade degradada devido à introdução de erros sistemáticos no valor das coordenadas. A solução da Ambigüidade e também o controle de qualidade desta solução são assuntos muito discutidos e pesquisados na área de posicionamento GPS. (TEUNISSEN, 1998).

A fase da onda portadora é a diferença entre a fase do sinal do satélite, recebido no receptor, e a fase do sinal gerado no receptor no instante da recepção (MONICO, 2008).

2.3.1.2 Erros nas observáveis GPS

Assim como qualquer medida, as observáveis GPS estão contaminadas por erros. Estes podem ser grosseiros, sistemáticos e aleatórios. Os erros grosseiros provêm de falhas humanas e/ou de equipamentos. Os erros sistemáticos geralmente podem ser parametrizados (modelados como novas incógnitas) no processo de ajustamento ou reduzidos por técnicas

especiais de observação (no momento da coleta). Além disso, os erros sistemáticos podem ser determinados por modelos apropriados e retirados (minimizados) das observações antes da realização do ajustamento para a obtenção das coordenadas. Os erros aleatórios são inevitáveis e, portanto, são considerados como sendo uma propriedade inerente da observação (MONICO, 2008). A Tabela 1 apresenta os diversos tipos de erros que contaminam as observáveis GPS.

Tabela 1. Fontes de erro nas observáveis GPS (MONICO, 2008).

Fontes	Efeitos
Satélite	Erros orbitais
	Erros no relógio do satélite
	Atraso instrumental do satélite
	Centro de fase da antena do satélite
Propagação do sinal	Refração troposférica
	Refração ionosférica
	Multicaminho ou sinais refletidos
	Perdas de ciclo
Receptor e Antena	Erro do relógio do receptor
	Centro de fase da antena
	Atraso instrumental do receptor
	Ruído do receptor

2.3.1.3 Efemérides

A determinação da posição e do vetor velocidade dos satélites no referencial terrestre são necessários três conjuntos de dados: dados de almanaque, efemérides transmitidas e efemérides precisas. Estes dados diferem quando se trata da acurácia e da disponibilidade, se em tempo real ou com algum atraso (HOFMANN-WELLENHOF *et al*, 2008).

- Efemérides Transmitidas

As efemérides transmitidas contêm informações sobre as órbitas dos satélites calculadas previamente, ou seja, são produzidas efemérides de referência baseadas em modelos que consideram as forças que atuam nos satélites através do uso de programas computacionais. Com base nestas efemérides e nas observações coletadas nas estações monitoras, calculam-se as discrepâncias determinando as efemérides transmitidas (MONICO,

2008). Este tipo de informação é utilizada quando o objetivo é obter a posição instantânea do receptor. A acurácia é da ordem de um metro (HOFMANN-WELLENHOF *et al*, 2008).

- Efemérides Precisas

São as efemérides pós-processadas, ou seja, corrigidas dos efeitos de perturbação da órbita após a passagem dos satélites. Estas informações são disponibilizadas para os usuários no site do *International GNSS Service* (IGS) e se destinam a usuários que pretendem obter melhor precisão no posicionamento. Segundo Hofmann-Wellenhof (2008), a acurácia deste tipo de efeméride é de aproximadamente 0,05 a 0,20 metros.

Mais informações podem ser encontradas em Monico (2008), Hofmann-Wellenhof (2008), Leick (1994) e Teunissen (1998).

2.3.1.4 Receptores GPS

Geralmente os receptores GPS são classificados segundo o tipo de observação que pode realizar:

- código C/A;
- código C/A e portadora L1;
- código C/A e portadoras L1 e L2;
- códigos C/A e P2 e portadoras L1 e L2;
- códigos C/A, P1 e P2 e portadoras L1 e L2; e
- códigos C/A, L2C, P2 e portadoras L1 e L2.

Outra classificação comumente utilizada é a seguinte:

- navegação: código C/A e portadora L1;
- topográfico: código C/A e portadora L1;
- geodésico: códigos C/A e P e portadoras L1 e L2.

Os receptores GPS podem fornecer as seguintes precisões:

- navegação: métrica;
- topográfico: decimétrica;
- geodésico: centimétrica.

2.3.2 GLONASS

Os princípios de funcionamento do sistema GNSS russo são similares ao do sistema norte-americano, ou seja, baseia-se na medida de distâncias entre o usuário e os satélites para determinar a posição do receptor. Assim como o GPS, o GLONASS transmite dois tipos de sinais, conhecidos como *Standard Precision* (SP) e *High Precision* (HP), sendo que este último sofre degradação similar à técnica utilizada no código C/A do GPS para dificultar sua interpretação e conseqüentemente inibir o uso de maneira inapropriada.

Enquanto que os satélites GPS transmitem os dados utilizando a mesma frequência, mas códigos diferentes, os satélites GLONASS enviam o mesmo código no sinal SP, porém em frequências distintas. A técnica utilizada para transmissão dos sinais é a *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), assim, há 15 canais de transmissão com frequências variando de 1602,5625 a 1615,5 MHz. Essa faixa de frequências é conhecida como banda L1. O sinal HP transmite na banda L2 que compreende as frequências de 1240 a 1260 MHz utilizando a mesma técnica de transmissão FDMA. A precisão obtida através do GLONASS é de 5-10 metros na componente horizontal e de aproximadamente 15 metros na componente vertical.

Desde 2008, está em pesquisa e desenvolvimento a técnica de transmissão *Code Division Multiple Access* (CDMA) a ser empregada nos satélites GLONASS, de modo a compatibilizá-lo com o sistema GPS, que utiliza esta tecnologia.

2.3.3 Rede Geodésica de Referência

Com o advento dos sistemas globais de navegação foi possível criar redes que disponibilizam informações sobre a posição terrestre a nível mundial, ou seja, toda a superfície terrestre está no mesmo sistema de referência. Internacionalmente o IGS é o responsável pela manutenção desta rede contando com uma série de estações que rastreiam 24 horas por dia obtendo-se coordenadas confiáveis que são utilizadas em levantamentos precisos. A

Figura 11 mostra a distribuição das estações do IGS no mundo. No Brasil, existe a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), implementada e mantida pelo IBGE, a qual disponibiliza as coordenadas das estações de referência (Figura 12) possibilitando a integração de qualquer levantamento GNSS a esta rede. Dessa forma, quando se faz um trabalho de campo utilizando receptor GNSS, utilizam-se os dados da RBMC para processar e determinar as coordenadas dos pontos levantados em campo (BLITZKOW; MATOS, 2007).

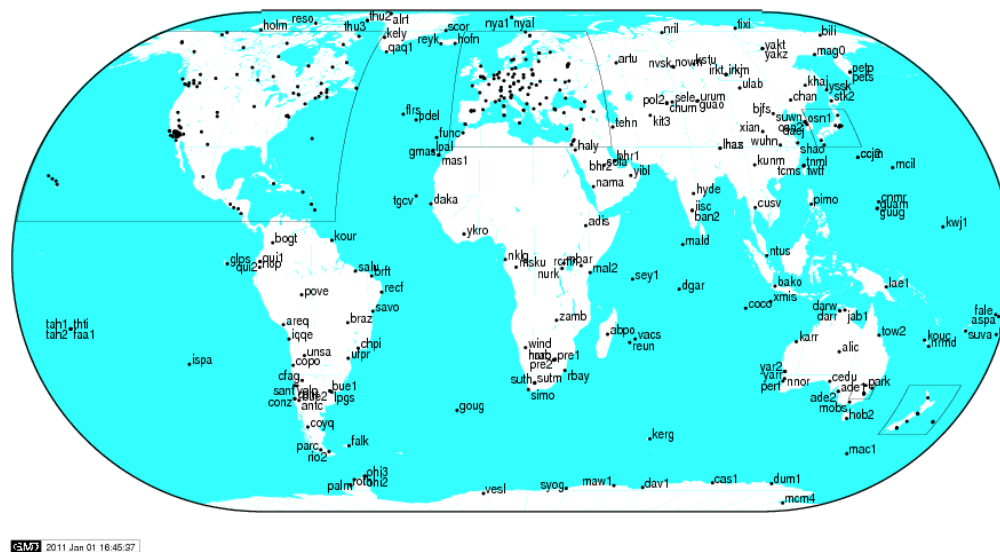


Figura 11. Estações de referência do IGS (IGS, 2010).



Figura 12. Mapa de distribuição das estações da RBMC (IBGE, 2010).

2.3.4 Sistemas Geodésicos de Referência: SIRGAS x WGS84

Em qualquer atividade de posicionamento geodésico é importante que a definição e a realização dos sistemas de referência celeste e terrestre sejam apropriadas, precisas e consistentes (Bock, 1996).

O sistema de referência associado ao GPS é o WGS 84 que possui origem no centro de massa da Terra (Figura 13) com os eixos cartesianos X, Y e Z definidos de forma idêntica aos do *Conventional Terrestrial Reference System* (CTRS), na época de referência 1984,0. O elipsóide de referência é o WGS 84, o qual é um elipsóide de revolução geocêntrico que coincide com o elipsóide GRS 80 (MONICO, 2008).

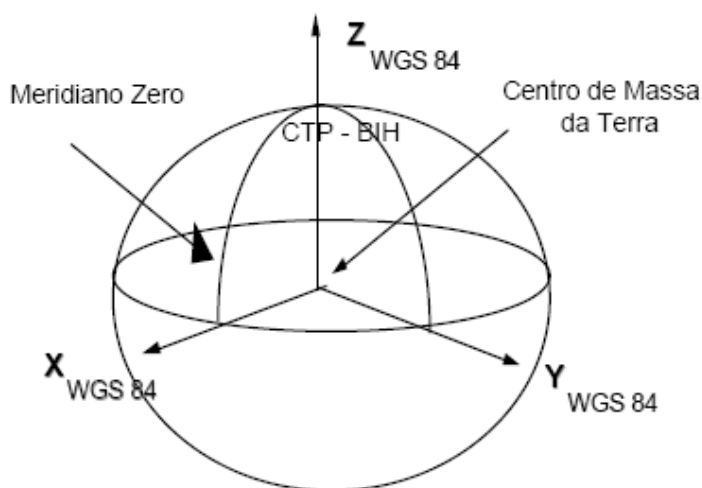


Figura 13. Origem do sistema de referência WGS 84 (KLEIN; GÖTZ; ROCHA, 2009).

A primeira realização do WGS 84 ocorreu com a utilização de 1591 estações determinadas pelo *Defense Mapping Agency* (DMA) com o uso das observações Doppler do sistema Transit atingindo precisão de um a dois metros (DMA, 1987 *apud* MONICO, 2008). Outras duas atualizações foram feitas, sendo que as coordenadas determinadas na última atualização passaram a serem usadas no dia 20 de janeiro de 2002. Esta última atualização é a G1150, onde G indica que o método empregado foi o GPS e 1150 é a semana GPS do período de observação.

O sistema WGS 84 sofre atualizações periódicas, através de levantamentos GPS, os quais atualizam os parâmetros que determinam o elipsóide de referência. No Brasil, o sistema de referência adotado é o SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) que em princípio seria adotado para toda a América do Sul, entretanto, somente o Brasil o adotou.

O elipsóide associado ao SIRGAS2000 é o GRS 80 que, em termos práticos, permite afirmar que o WGS 84 e o SIRGAS2000 são compatíveis, não necessitando de parâmetros para conversão de coordenadas entre estes dois sistemas de referência. Informações adicionais sobre sistemas de referência podem ser obtidas em MONICO (2008), IBGE (2005).

2.3.5 Processamento de Dados GNSS – Posicionamento Relativo Estático

Existem diversos métodos de posicionamento GNSS, a saber: Posicionamento por Ponto Simples, Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), *Differential* GPS (DGPS), *Wide Area Differential* GPS (WADGPS), Posicionamento Relativo, entre outros. O Posicionamento Relativo Estático é frequentemente utilizado quando se requer maior rigor geodésico, obtendo-se coordenadas de maior confiabilidade e precisão. As modalidades Estático Rápido, Semicinemático, Cinemático pós-processado e Cinemático em tempo real, também compõem a gama de estratégias de Posicionamento Relativo.

O posicionamento relativo envolve o uso de dois ou mais receptores. Pelo menos um receptor ocupa um ponto com coordenadas conhecidas (estação base), e o outro(s) ocupa(m) simultaneamente os pontos de interesse (estação móvel). No processamento dos dados as coordenadas dos pontos de interesse são determinadas a partir da obtenção das componentes da linha-base formada com o ponto conhecido.

Há alguns anos, para a execução do posicionamento relativo exigia-se que o usuário possuísse dois ou mais receptores, mas essa realidade mudou com o advento dos Sistemas de Controle Ativos (SCA): estações ativas que rastreiam continuamente os satélites visíveis e o acesso aos dados é permitido e gratuito. No Brasil, a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) é um dos casos de SCA.

O posicionamento relativo utiliza as duplas diferenças (DD) como observáveis fundamentais. Uma DD é a simples diferença entre duas Simples Diferenças (SD). A SD é uma combinação linear das observáveis GPS formada ou por dois receptores ou por dois satélites ou por duas épocas distintas. Tomando como exemplo uma SD entre dois receptores (r_1 e r_2), supõe-se que estes rastreiam simultaneamente o mesmo satélite (s^i). A diferença entre as pseudodistâncias (ou entre as fases) observadas ao mesmo tempo em duas estações é a simples diferença da pseudodistância. As observáveis GPS originais utilizadas neste tipo de posicionamento podem ser:

- pseudodistância;

- fase da onda portadora e;
- fase da onda portadora e pseudodistância.

Geralmente a dupla diferença de fase de batimento da onda portadora é a observável adotada muito embora seja possível usar a dupla diferença da pseudodistância, ou ambas. Assim, são necessários dois ou mais receptores rastreando simultaneamente os satélites visíveis por um período de tempo que pode variar de minutos (no mínimo 20) até algumas horas, principalmente para solucionar o vetor das ambiguidades. Porém, cabe citar que existem técnicas de solução rápida da ambigüidade, que pode diminuir o tempo de ocupação. A qualidade do posicionamento relativo está também diretamente ligada ao comprimento das linhas de base entre os receptores.

Segundo Monico (2008) após certo período de ocupação, a precisão tanto das coordenadas quanto das ambigüidades se estabiliza. A partir daí, as observações adicionais proporcionam maior confiabilidade na solução. Este método de posicionamento proporciona precisão da ordem de 0,1 a 1 ppm.

O IBGE apresenta em suas normas recomendações para levantamentos utilizando a técnica de posicionamento relativo estático, conforme a Tabela 2. A mesma baseia-se em estudos do Instituto Geográfico Nacional da Espanha.

Tabela 2. Precisão do posicionamento relativo em função do tempo de observação, equipamento (IBGE, 2008).

Linha de Base	Tempo de Observação	Equipamento Utilizado	Precisão
00 – 05 km	05 a 10 min	L1 ou L1/L2	05 a 10 mm + 1 ppm
05 – 10 km	10 a 15 min	L1 ou L1/L2	05 a 10 mm + 1 ppm
10 – 20 km	10 a 30 min	L1 ou L1/L2	05 a 10 mm + 1 ppm
20 – 50 km	02 a 03 hr	L1/L2	05 mm + 1 ppm
50 – 100 km	mínimo de 03 hr	L1/L2	05 mm + 1 ppm
> 100 km	mínimo de 04 hr	L1/L2	05 mm + 1 ppm

2.3.6 Determinação de Altitude Ortométrica com Receptor GNSS

A técnica de posicionamento GPS vem substituindo os métodos clássicos aplicados em Geodésia nas ultimas décadas. Atualmente, é possível substituir os métodos tradicionais de determinação da altitude ortométrica pelo uso do GNSS combinado com alturas geoidais obtidas a partir de modelos de alta resolução.

A conversão das altitudes geométricas (h) (referidas ao elipsóide), obtidas no rastreamento GNSS, em altitudes ortométricas (H) (referidas ao geóide) requer o conhecimento da ondulação geoidal (N) na região do levantamento. Essa determinação é realizada conforme a Equação (8).

$$H = h - N \quad (8)$$

Dessa maneira as altitudes são reportadas ao nível médio do mar, possuindo assim, significado físico (Figura 14).

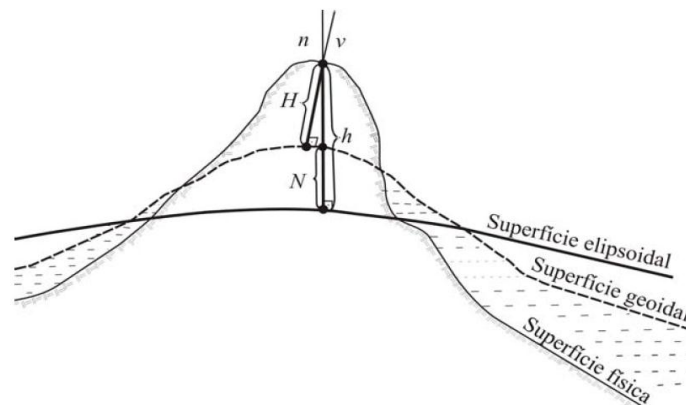


Figura 14. Conceito da determinação da altitude ortométrica com receptor GNSS.

2.4 AJUSTAMENTO POR MÍNIMOS QUADRADOS

Para a obtenção de uma solução única para um determinado modelo em um conjunto de n observações, o princípio do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) estabelece que a soma do quadrado dos resíduos ponderados seja mínima:

$$\varphi = V^T P V = \min \quad (9)$$

onde V o vetor dos resíduos das observações de ordem $(n \times 1)$ e P a matriz do peso das observações de ordem $(n \times n)$ dada por:

$$P = \sigma_o^2 \Sigma_{Lb}^{-1} \quad (10)$$

sendo σ_o^2 um escalar conhecido como fator de variância *a priori*, escolhido arbitrariamente, e Σ_{Lb}^{-1} é a Matriz Variância e Covariância (MVC) das observações, expressa por:

$$\Sigma_{Lb} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & \sigma_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \cdots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

formada pelas variâncias (σ_i^2) e covariâncias (σ_{ij}).

O ajustamento só faz sentido nos casos em que o número de observações é maior que o número de incógnitas, ou seja, quando há redundância de informações. As observações são sujeitas às flutuações probabilísticas, de forma que os dados redundantes são geralmente inconsistentes com o modelo funcional e, assim cada amostra fornecerá resultados diferentes. Para obter uma solução única, um critério adicional, como o MMQ, é aplicado. O ajustamento pelo método do MMQ produz estimativas ajustadas de todos os parâmetros do modelo, bem como de suas respectivas matrizes variância-covariância.

Para a realização do ajustamento, utiliza-se algum modelo matemático. Este é definido como sendo um sistema teórico que relaciona as quantidades observadas e os parâmetros. Tendo em vista que o modelo serve para um propósito particular, ele pode apresentar-se de formas diferentes para uma mesma situação física, dependendo do propósito em questão (GEMAEL, 1994).

O modelo matemático é composto pelo modelo funcional e pelo modelo estocástico. O modelo funcional descreve as propriedades determinísticas da realidade física. Por outro lado, o modelo estocástico descreve as propriedades não-determinísticas (probabilísticas) das variáveis envolvidas, particularmente aquelas que representam as observações (MIKHAIL, 1976).

Grande parte das aplicações em Geodésia e Fotogrametria, utilizam observações e parâmetros relacionados por um modelo matemático não linear da forma,

$$F(L_a, X_a) = 0 \quad (12)$$

que constitui o modelo geral de ajustamento, onde o índice “a” indica que a quantidade considerada é ajustada. Usualmente o número de observações é indicado por “n” e o número de parâmetros por “u”, sendo as variáveis da Equação (12) assim definidas:

- L_a = vetor das “n” observações ajustadas;
- X_a = vetor dos “u” parâmetros ajustados;
- F = “r” funções matemáticas não-lineares.

Usa-se uma modificação do modelo apresentado na Equação (12) sempre que as observações puderem ser explicitadas em função dos parâmetros:

$$L_a = F(X_a) \quad (13)$$

conhecido como o modelo paramétrico, ou modelo das equações de observações.

Outra modificação ocorre quando se recai no problema das observações diretas, implicando em que o ajustamento indica sobre as próprias observações, eliminando os parâmetros, tornando a Equação (12) em:

$$F(L_a) = 0 \quad (14)$$

conhecido como modelo condicionado ou modelo das equações de condição.

O ajustamento paramétrico com injunções será explicitado neste trabalho, pois é o método empregado no ajustamento da aerotriangulação e da rede GNSS.

Conforme Matsuoka (2003), neste tipo de ajustamento cada observação proporciona uma equação. Denominando-se por n o número total de observações, têm-se, então, n equações. As equações serão de tal forma, que se pode explicitá-las em função dos u parâmetros envolvidos.

Admitindo-se s injunções, o número de observações adicionais corresponderá ao número de injunções.

O modelo matemático do método paramétrico com injunção é composto por:

$$L_a = F(X_a) \quad (15)$$

$$L'_a = G(X_a) \quad (16)$$

onde:

L'_a – é o vetor ($s \times 1$) dos parâmetros injuncionados ajustados;

G – é a função que relaciona L'_a com X_a , podendo ser linear ou não.

No processo de linearização, utilizam-se valores aproximados X_0 para os parâmetros incógnitos X_a , como ponto de expansão das funções $F(L_a)$ e $G(L_a)$ na série de Taylor.

Seja, então:

$$(L_a) = Lb + V \quad (17)$$

onde:

Lb – é o vetor ($n \times 1$) dos valores observados e

V – vetor ($n \times 1$) dos resíduos.

Dessa forma pode-se escrever a equação (15) como sendo:

$$(L_b) + V = F(X_a) \quad (18)$$

Linearizando a segunda parcela da equação (18) com série de Taylor, tem-se que:

$$L_b + V = F(X_o) + \left. \frac{\partial F}{\partial X} \right|_{X_o} X \quad (19)$$

Designando a função dos parâmetros aproximados por L_0 :

$$L_0 = F(X_o), \quad (20)$$

e a matriz das derivadas parciais das equações em relação aos parâmetros, por A:

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X} \right|_{X_o} \quad (21)$$

tem-se que:

$$L_b + V = L_0 + AX, \quad (22)$$

ou

$$V = AX + L_0 - L_b. \quad (23)$$

Denotando L como sendo a diferença entre L_0 e L_b :

$$L = L_o - L_b \quad (24)$$

Obtém-se o modelo matemático linearizado do método paramétrico:

$$V = AX - L \quad (25)$$

O segundo modelo L'_a é obtido da linearização da equação de injunção:

$$L'_a = G(X_a), \quad (26)$$

Similarmente ao modelo principal, tem-se:

$$L'_a + V' = G(X_a), \quad (27)$$

Que na forma linearizada, é dada por:

$$L'_b + V' = G(X_o) + \left. \frac{\partial G}{\partial X} \right|_{X_o} X, \quad (28)$$

Adotando-se:

$$G(X_o) = L'_o, \quad (29)$$

$$\left. \frac{\partial G}{\partial X_a} \right|_{X_o} = C, \quad (30)$$

$$L'_o - L'_b = L', \quad (31)$$

Tem-se que a equação (28) pode ser reescrita como sendo:

$$V' = CX + L'. \quad (32)$$

Em resumo, os modelos linearizados são compostos de n equações de observações e s equações de injunções, dadas por:

$$V_{nx1} = A_{nxu} X_{nxu} + L_{nxu} \quad (33)$$

$$V'_{nx1} = C_{nxu} X_{nxu} + L'_{nxu} \quad (34)$$

Aplicando-se o princípio do MMQ:

$$\phi = V^T P V + V'^T P_{inj} V' = \min \quad (35)$$

obtem-se que:

$$X = -(A^T P A + C^T P_{inj} C)^{-1} (A^T P L + C^T P_{inj} L'), \quad (36)$$

ou

$$X = -(N + N')^{-1} (U + U'), \quad (37)$$

sendo:

N e N' – matrizes ($u \times u$) dos coeficientes das equações normais;

U e U' – matrizes ($u \times 1$) dos termos independentes e

P_{inj} – matriz peso ($s \times s$) das injunções ($P_{inj} = \sigma_0^2 \Sigma_{Lb}^{-1}$)

Sendo a matriz ($N + N'$) não singular, as componentes do vetor X convertem os parâmetros aproximados em ajustados:

$$X_a = X_o + X. \quad (38)$$

As injunções são de extrema importância na solução de sistemas de equações lineares que apresentam deficiência de posto (característica), ou seja, quando a matriz das equações normais é singular.

Como já foi referido anteriormente, qualquer estimativa de um valor ou de um conjunto de valores (parâmetros) não terá valor científico se não estiver acompanhada de um indicador de qualidade. Assim a MVC dos parâmetros ajustados é obtida aplicando a lei de propagação de covariâncias na equação (37)

$$\Sigma_{xa} = (N + N')^{-1}. \quad (39)$$

Sendo, o fator de variância *a posteriori* ($\hat{\sigma}_0^2$) calculado à partir da seguinte expressão:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V + V'^T P_{inj} V'}{n - u + s}. \quad (40)$$

2.5 CONTROLE DE QUALIDADE DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS

Um produto qualquer poderá ser identificado como satisfatório ou não para o fim a que se destina quando submetido a um teste de controle de qualidade. Porém, a inspeção completa não eliminará o risco de existirem itens defeituosos, nem mesmo permitirá uma avaliação dos riscos de ambas as partes, tanto do usuário como do produtor. É natural que tanto consumidor como o produtor desejem fixar, com base em sua experiência anterior e razões econômicas, os riscos a que estarão expostos ao adotarem um critério de decisão; isso é alcançado na inspeção por amostragem. Portanto, a qualidade de uma carta pode ser abordada considerando dois pontos distintos: o do usuário e do produtor. Segundo Leal e Dalmolin (1999), na literatura estrangeira observa-se que os procedimentos adotados para auferir a qualidade de uma carta consideram estas duas posições e analisam o risco do usuário e do produtor.

O risco do usuário é a probabilidade de aceitação de um produto cartográfico com qualidade abaixo de suas necessidades, a partir da execução de testes de controle de qualidade no qual se utilizou uma amostra de boa qualidade.

O risco do produtor é dado pela existência da possibilidade de se rejeitar uma carta qualificada, a partir da execução do teste de controle de qualidade com uma amostra de qualidade ruim.

Existem diversas técnicas de avaliação de produtos cartográficos, os quais possuem riscos já apresentados anteriormente. No Brasil há normas estabelecendo o procedimento a ser aplicado na classificação de mapas, levando a uma padronização no controle de cartas.

2.5.1 Padrão de Exatidão Cartográfica

Assim como qualquer outro tipo de produção técnica, o processo de mapeamento deve possuir leis e normas específicas que garantam a qualidade do produto cartográfico ao usuário. Em nosso país, o decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984 estabelece as instruções reguladoras e normas técnicas da cartografia nacional, em BRASIL (1984), se destinando a tratar temas como: o controle do processo e do produto final, a classificação das cartas, os

elementos obrigatórios de uma carta, especificações gerais das normas cartográficas brasileiras, entre outros.

O capítulo II do decreto nº 89.817 de junho de 1984, trata do controle de qualidade do produto cartográfico final. Este capítulo é apresentado nos dois próximos tópicos conforme a norma:

Classificação de uma carta quanto à exatidão: os documentos cartográficos devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), que se refere a um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, ou seja, $PEC = 1,6449 * EP$, onde o EP corresponde ao Erro-Padrão (equivalente aos termos desvio padrão (σ) e erro médio quadrático, segundo afirmação da própria norma). A norma estabelece que 90% dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC planimétrico estabelecido. Em termos altimétricos, 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 (Figura 15).

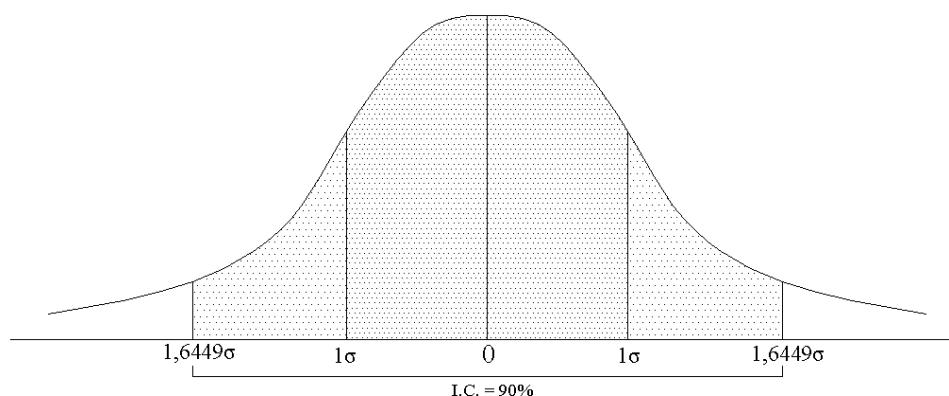


Figura 15. Distribuição normal.

As cartas, segundo sua exatidão, são classificadas nas Classes A, B e C, seguindo os parâmetros estabelecidos pela norma de qualidade geométrica de documentos cartográficos. O resumo dos parâmetros do PEC e seus respectivos EP para planimetria e altimetria são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resumo das classes pertencentes ao PEC.

CLASSE	PLANIMETRIA		ALTIMETRIA	
	PEC	EP	PEC	EP
A	0,5 mm	0,3 mm	1/2 Equid	1/3 Equid
B	0,8 mm	0,5 mm	3/5 Equid	2/5 Equid
C	1,0 mm	0,6 mm	3/4 Equid	1/2 Equid

A tabela, apresenta na primeira coluna, com as letras A, B e C, as possíveis classes segundo o decreto nº 89.817 de junho de 1984, enquanto as demais colunas mostram os parâmetros quantitativos de PEC e EP estabelecidos para planimetria e altimetria. Para o cálculo do valor planimétrico do PEC no terreno, deve-se multiplicar o valor da tabela pela escala da carta, já no caso da altimetria pela eqüidistância das curvas de nível.

O decreto ainda menciona a obrigatoriedade da indicação da classe da carta no rodapé. No caso do produto não atingir o valor mínimo das classes, o valor do PEC obtido ainda deve ser indicado na folha.

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do presente trabalho é o Conselho Regional de Desenvolvimento (COREDE) Vale do Rio dos Sinos, representado na Figura 16. Os municípios que compõem essa região são Nova Santa Rita, Canoas, Esteio, Sapucaia do Sul, Portão, São Leopoldo, Novo Hamburgo, Estância Velha, Campo Bom, Ivoti, Dois Irmãos, Sapiranga, Nova Hartz e Araricá.

Os 28 COREDEs são unidades de planejamento do Estado do Rio Grande do Sul criados em 1994. Estes são formados por municípios que contemplam mesmos interesses, tanto culturais, como comerciais, para que sejam realizadas discussões a respeito de políticas e ações que visam o desenvolvimento regional. Segundo a lei de criação dos COREDEs – Lei 10.283 de 17/10/94 – seus principais objetivos são o incentivo ao desenvolvimento regional harmônico e sustentável, integração dos recursos e ações do governo na região, a melhoria da qualidade de vida da população, a distribuição equitativa da riqueza produzida, o estímulo à permanência do homem na sua região, e a preservação e a recuperação do meio ambiente (RIO GRANDE DO SUL, 1994).

No COREDE Vale do Rio dos Sinos as atividades que são a base da economia da região são a indústria, serviços e agronegócios baseados em pequenas propriedades. No setor industrial destacam-se os ramos calçadista, metal-mecânico, químico, vestuário, alimentos e bebidas, papel e gráfico e madeira e móveis.

Cabe-se destacar que nessa região há uma forte influência alemã, tanto nos costumes quanto nas construções, devido a forte colonização que ocorreu a partir da primeira metade do século XIX. Alguns dados da área de estudo são apresentados a seguir (FUNDAÇÃO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA, 2010):

- População Total (2009): 1.306.880 habitantes (12,1% do estado);
- Área (2009): 1.398,5 km² (0,5% do estado);
- Densidade Demográfica (2006): 934,5 hab/km²;
- PIB per capita (2007): R\$ 19.922.

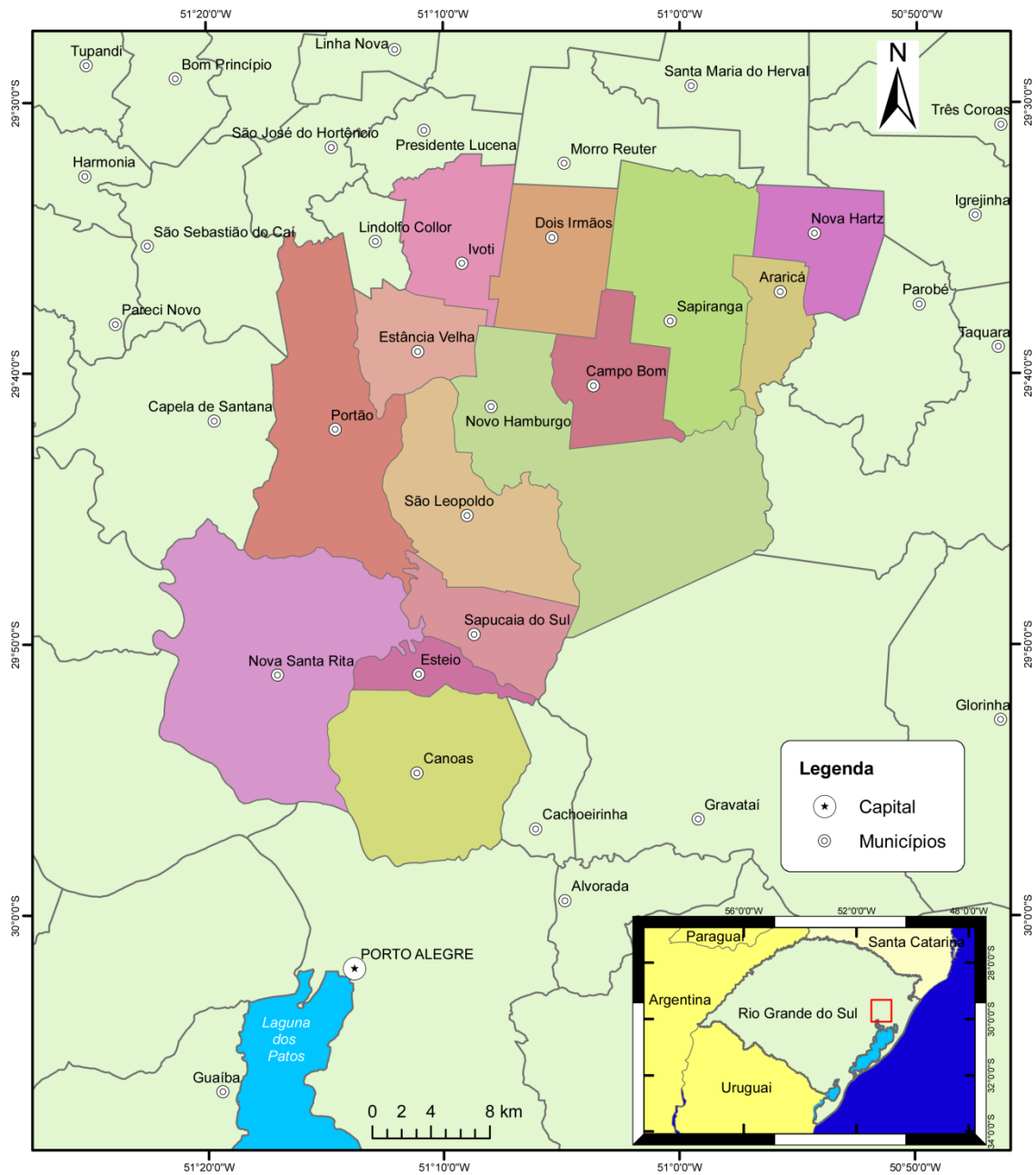


Figura 16. Mapa de situação do COREDE Vale do Rio dos Sinos.

3.1 REGIÃO DE INTERESSE

A região de interesse, apresentada na Figura 17, é compreendida pela área de abrangência de fotografias aéreas fornecidas à UFRGS para fins acadêmicos. Esta região está inserida nos municípios de Novo Hamburgo, São Leopoldo e Portão, com área de aproximadamente 55 km², distribuída proporcionalmente em zonas urbana e rural. Sua distância em relação ao centro de Porto Alegre é de aproximadamente 32 km, e em relação ao Campus do Vale da UFRGS, por volta de 45 km. A topografia local possui baixas altitudes

(média de 57 m) e relevo levemente ondulado, destacando-se a presença de áreas com densa vegetação. O centro de Novo Hamburgo, área de grande densidade populacional, está contemplado nessa região. Pode-se verificar ainda, que existem áreas de expansão urbana e industrial, principalmente no município de São Leopoldo.

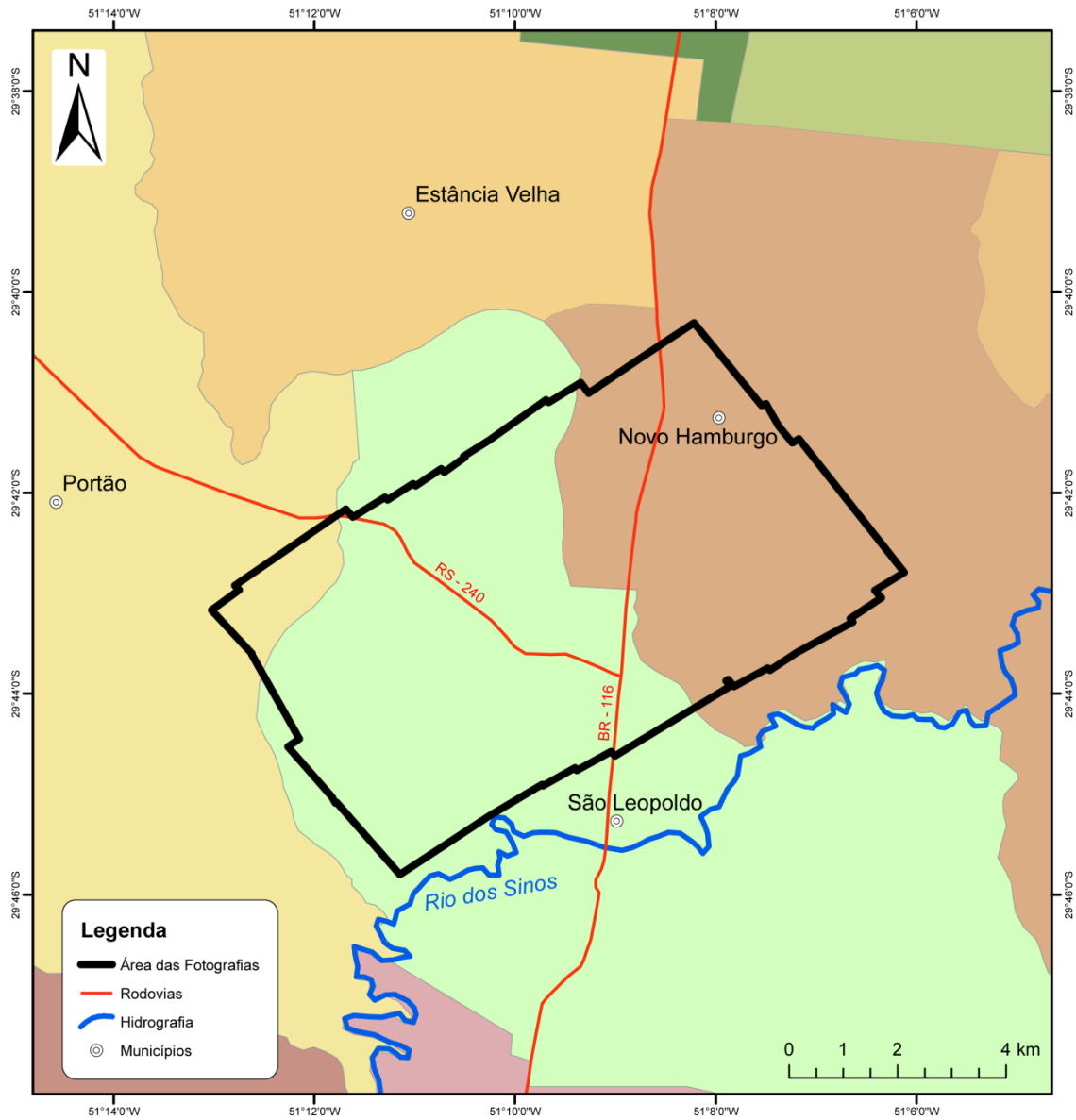


Figura 17. Mapa de localização da região de interesse.

4 DADOS E MATERIAIS

4.1 FOTOGRAFIAS

A empresa ENGEMAP Geoinformação gentilmente disponibilizou um total de 43 fotografias aéreas digitais de médio formato que formam a região de interesse. As fotografias obtidas em 2008, a partir da câmara Hasselblad H3D-39 (39 megapixels), estão dispostas em três faixas de voo no sentido SO-NE, sendo 14 fotografias nas faixas externas do bloco e 15 fotografias na faixa central. Todas as fotografias foram entregues no formato *Tagged Image File Format* (TIFF) e apresentam as seguintes características:

- dimensões da imagem: 7216 X 5412 pixels;
- dimensões do pixel: 6,8 x 6,8 μm ;
- dimensões do quadro da imagem: 49 x 36,9 mm;
- distância focal da câmara: 50 mm.

As informações sobre os parâmetros de distorção da câmara foram disponibilizados por meio do Certificado de Calibração (Anexo A), documento gerado após o procedimento de calibração da câmara, realizado por Msc. Roberto da Silva Ruy, no Campo de Calibração da FCT/UNESP.

4.2 REDE GEODÉSICA DE REFERÊNCIA

A RBMC representa o segmento ativo da estrutura geodésica no Brasil, dando suporte a trabalhos geodésicos que envolvam posicionamento GNSS, principalmente no que se refere à técnica do posicionamento relativo (SEVERO; SOUZA; MATSUOKA, 2010). Dessa forma, esta será adotada como a Rede Geodésica de Referência.

A RBMC conta com mais de 70 estações em todo o Brasil (conforme Figura 12) equipadas com receptores geodésicos, coletando dados GNSS de maneira contínua. O IBGE, mantenedor do projeto RBMC, disponibiliza em seu site os arquivos de cada dia de ocupação de todas as estações, com taxa de coleta de 15 segundos no formato universal *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX). Os seguintes arquivos são disponibilizados:

- arquivo de observação no formato RINEX (extensão .o);
- arquivo de navegação no formato RINEX (extensão .N).

Relatório de informação da estação, que contém as informações referentes àquela estação, como sua identificação, localização, coordenadas oficiais referidas ao SIRGAS2000, época 2000,4 e as informações referentes ao receptor e à antena.

4.3 MODELO GEOIDAL

O modelo geoidal MAPGEO2010, atual modelo oficial do Brasil, será utilizado com a finalidade de transformação das altitudes geométricas em ortométricas. Este modelo foi concebido e produzido conjuntamente pelo IBGE, através da Coordenação de Geodésia (CGED), e pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). As ondulações geoidais fornecidas pelo MAPGEO2010 possuem erro médio padrão de 32 centímetros nas áreas mais desenvolvidas do país (IBGE, 2010), resultando uma melhora significativa em relação aos modelos anteriores.

O cálculo do geóide MAPGEO2010, que possui resolução de 5' de arco, foi efetuado utilizando mais de 928.000 pontos de gravimetria terrestre para a América do Sul. O Modelo Digital de Terreno (MDT) escolhido foi o SAM3s_v2, o qual baseia-se no *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). O modelo geoidal determinado foi baseado nos coeficientes de geopotencial do EGM2008 truncado no grau e ordem 150. A metodologia aplicada para o cálculo do geóide é Integração de Stokes utilizando a técnica da transformada rápida de Fourier (FFT). A Figura 18 representa o mapa de ondulações geoidais para o Brasil, referidas ao SIRGAS2000.

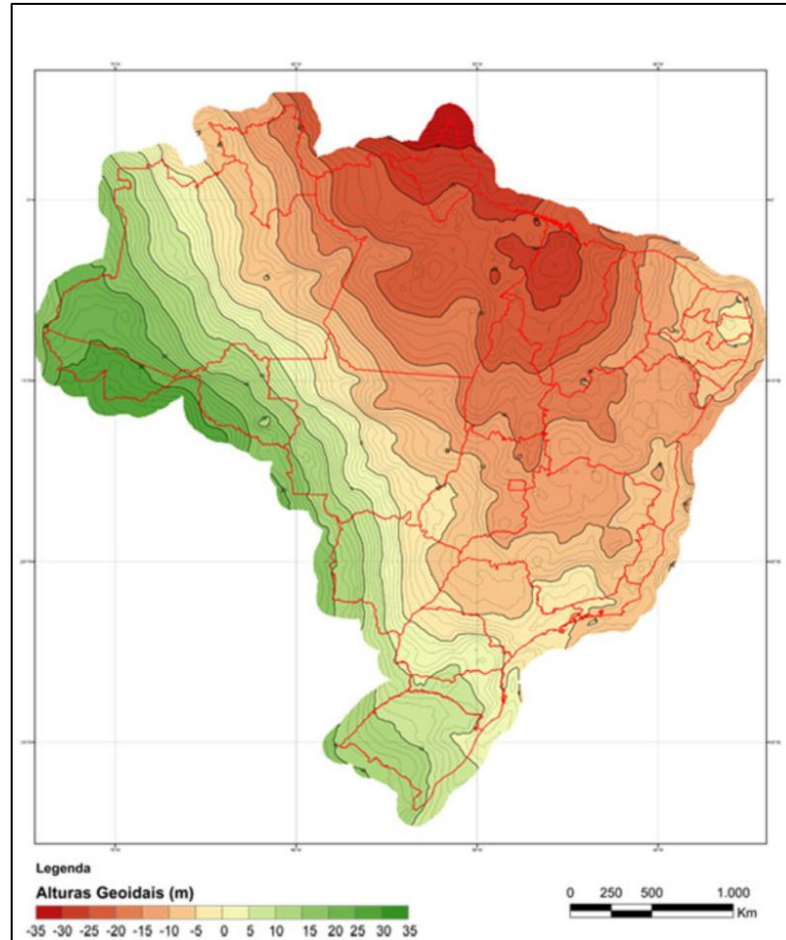


Figura 18. Mapa de ondulações geoidais do MAPGEO2010 (IBGE, 2010).

4.4 RECEPTOR GNSS

O receptor GNSS utilizado no trabalho foi do fabricante Topcon, modelo GR3 (Figura 19). Esse equipamento é um receptor de dupla frequência, com possibilidade de realizar transmissão de correções das efemérides via rádio. Os dados coletados são gravados em cartão de memória SD, e para transferência destes para um computador pode ser usada a tecnologia *Bluetooth* ou via cabo. A seguir, algumas de suas principais características, segundo o sítio eletrônico do fabricante:

- recebe todos os sinais GPS, Glonass e Galileo;
- coletora associada: Topcon FC-2500;
- bateria interna: duas, de Li-Ion, 3900mAh, 7.2V;
- tempo de operação: 14 horas;
- comunicação: Bluetooth e USB;

- memória interna: cartão de memória SD, com capacidade de 1024MB, e localizando-se em compartimento protegido, mas com possibilidade de remoção;
- grau de proteção contra água: IP66;
- resistência à queda: até 2 metros.



Figura 19. Topcon GR3 em operação.

Dado o tipo de levantamento que seria realizado, a precisão requerida e os recursos disponíveis, viu-se que este era o equipamento adequado a ser utilizado.

4.5 SOFTWARE DE PROCESSAMENTO DE DADOS GNSS

Para o processamento dos dados GNSS foi utilizado o *software* Topcon Tools, que acompanha o receptor GR3. Esse *software* é usado para pós-processamento de dados, bem como ajustamento e análise de redes GNSS. Sua estrutura de organização divide-se em módulos, permitindo ao usuário desenvolver diferentes tarefas. Os módulos são: Estação Total, Pós-processamento, RTK e Desenho além de um módulo de opções avançadas e de gráficos. Há diversos recursos que tem suporte no Topcon Tools, como os descritos a seguir:

- configuração da obra: define configurações para visualização de dados e processamento;

- importação de dados de dispositivos: permite que sejam importados dados de receptores GNSS, controladoras, estações totais e níveis da marca Topcon;
- importação de arquivos de diversos formatos, entre eles RINEX, ASCII, DXF e XML;
- pós-processamento de dados: pode-se trabalhar com dados obtidos nas diversas formas de posicionamento, bem como com correções das efemérides precisas;
- ajustamento: pode-se realizar o ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados dos dados GNSS e de estação total juntos ou separados;
- controle de qualidade: esta opção permite que sejam configuradas a precisão horizontal e vertical para os dados de posicionamento pós-processado e RTK;
- conversão entre sistemas de referência e sistemas de coordenadas;
- projeto: criação de um Modelo Digital do Terreno e visualização desse modelo no CAD, e em 3D. Criação e edição de estradas;
- relatórios: é permitido gerar um relatório padrão para os pontos, ajustamento, controle de qualidade, observações GNSS e observações de estação total.

4.6 ESTAÇÃO FOTOGRAMÉTRICA DIGITAL

No contexto da Fotogrametria Digital, o equipamento capaz de executar o conjunto de tarefas fotogramétricas denomina-se Estação Fotogramétrica Digital (EFD), (BRITO; COELHO FILHO, 2007). EFDs são soluções de *software*, que a partir dos anos 90, vieram a substituir as tarefas realizadas através de aparatos fotogramétricos óptico-mecânicos e que cumpriram um papel revolucionário para esta área do conhecimento (PHEM; GRABMAIER, 2004). Além disto, o desenvolvimento da eletrônica e da computação tem aberto novas oportunidades nas áreas de instrumentalização, metodologia e integração.

Segundo Schenk (1999), as EFDs são compostas por três diferentes módulos: a entrada de dados, o processamento (estação de trabalho) e a saída dos dados. A entrada de dados baseia-se na entrada de fotografias, geradas por câmaras digitais ou pela digitalização de filmes obtidos a partir de câmaras analógicas. A estação de trabalho, onde ocorre a etapa de processamento fotogramétrico, é constituída pelo computador, dotado de placas de vídeo especiais e seus periféricos como o monitores de vídeo, dispositivos de visão estereoscópica (óculos polarizador, anaglifo, planar), dispositivo de medição estereoscópica (topomouse,

trackball), além de sistemas computacionais dedicados às operações fotogramétricas. A saída dos dados é formada pelos equipamentos de desenho vetorial ou de imagens (*plotters*).

A visualização e análise tridimensional, formada pela sobreposição de imagens, podem ocorrer a partir das mais variadas soluções. Conforme Brito e Coelho Filho (2007) existem quatro principais formas de obtenção da visão estereoscópica nos monitores das Estações Fotogramétricas:

- separação espacial – a tela do monitor exibe o par lado a lado e utiliza-se um estereoscópio de espelhos para visualizá-las estereoscopicamente;
- anaglifo – ambas as imagens são exibidas uma sobre a outra, porém em cores diferentes, necessitando de um óculos especial com uma lente de cada cor;
- separação radiométrica – semelhantes aos de anaglifo, apresentam diferentes polarizações da luz;
- separação temporal – exibem alternadamente as imagens do modelo, a altas frequências.

Os sistemas mais modernos utilizam uma combinação do princípio da separação temporal e da polarização (passiva, se a tela de polarização é montada no monitor e ativa, se a tela de polarização é montada nos óculos).

No presente trabalho utilizou-se a EFD constituída pelos seguintes componentes: Computador (dotado de dois discos rígidos de 500 Gb, processador Intel i7, memória RAM de 6 Gb e duas placas de vídeo especiais); Planar ; Topomouse da marca Leica e *software* Leica Photogrammetry Suite (LPS).

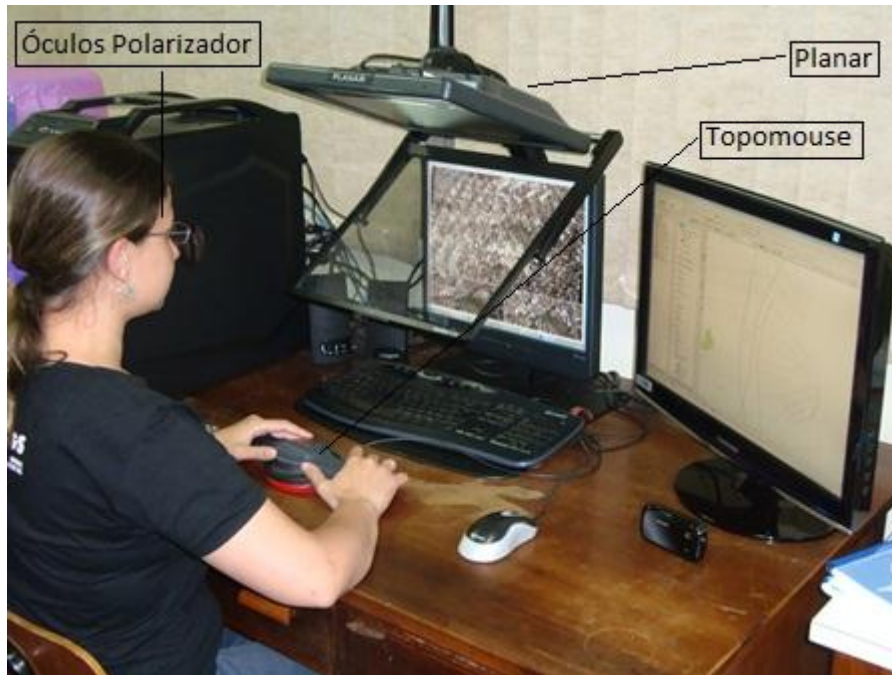


Figura 20. EDF utilizada no projeto.

4.7 SISTEMA COMPUTACIONAL DEDICADO ÀS OPERAÇÕES FOTOGRAMÉTRICAS

O *software* Leica Photogrammetry Suite (versão 2010), é um módulo do programa ERDAS IMAGINE produzido pela empresa ERDAS que permite o tratamento de imagens obtidas através de levantamentos fotogramétricos ou de sensores a bordo de satélites artificiais. Neste programa podem-se executar procedimentos fotogramétricos (como OI e OE, entre outros). Para isto a versão básica do programa conta com as seguintes funcionalidades:

- configuração e gerenciamento de projetos fotogramétricos;
- suporte para diversos modelos de sensores;
- orientação interior automática;
- medição automática e manual de pontos;
- fototriangulação;
- ortorretificação;
- módulo para produção automática de mosaicos;
- importação e exportação de imagens;
- geração de ortofotos e mosaicos;

- extração de feições e edição do terreno;
- processamento simultâneo de grande volume de imagens;
- extração automática do terreno;
- elaboração de mapas.

O LPS processa imagens brutas obtendo-se dados confiáveis para todo o processo de mapeamento digital, análise GIS e visualização 3D. O módulo adicional *LPS Automatic Terrain Extractor* (ATE) possibilita a extração automática do terreno usando múltiplas imagens através de técnicas sofisticadas. Além disso, o LPS possui o módulo *Stereo Analyst* para ArcGIS permitindo a integração com o ambiente ArcGIS, que proporciona a coleta e edição de feições tridimensionais.

Relatórios que viabilizam a análise e controle de qualidade dos produtos gerados, como por exemplo, o relatório emitido na realização do procedimento de fototriangulação podem ser emitidos pelo LPS, permitindo o acompanhamento dos processos executados.

4.8 SOFTWARE DE SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

O ArcGIS é um *software* desenvolvido pela ESRI para desenvolvimento e implementação de Sistema de Informações Geográficas. Assim como o ERDAS LPS, o ArcGIS é dividido por módulos, os quais são:

- ArcView – ferramenta que proporciona a visualização de dados espaciais, criação de mapas e análise espacial;
- ArcEditor – ferramenta que inclui além da funcionalidade do ArcView, possui ferramentas avançadas para manipulação de shapefiles e base de dados geoespaciais;
- ArcInfo – versão mais avançada do ArcGIS, que inclui mais ferramentas para manipulação, edição e análise de dados geoespaciais;
- ArcReader – ferramenta que permite a visualização de mapas criados com outros produtos Arc.

No ArcGIS é possível criar e editar mapas, processar imagens, criar banco de dados espaciais, realizar cálculo de áreas e volumes, efetuar a modelagem de numérica do terreno, gerar ortofotos, entre outras aplicações de geoprocessamento.

5 METODOLOGIA

5.1 MOSAICO E FOTOÍNDICE

a) Mosaico

Para realização do mosaico não-controlado, as fotografias fornecidas em formato TIFF, foram convertidas no *software* livre de manipulação de imagens IrfanView, para JPG, exigindo menos recurso computacional. Então foi efetuado o processo de mosaicagem das imagens, por meio do ajuste de detalhes das áreas de sobreposição das fotografias adjacentes. Para essa operação foi utilizado o programa de edição de imagens CorelDRAW.

b) Fotoíndice

No fotoíndice foram demarcadas as bordas das fotografias, bem como a nomenclatura de cada uma delas. As fotografias foram classificadas conforme as faixas (“A”, “B” e “C”), e as fotografias de cada uma das faixas foram numeradas seqüencialmente.

5.2 DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DOS PARÂMETROS DO VÔO

5.2.1 Altura de Vôo e Escala da Fotografia

Para determinação da escala e altura de vôo, é necessário o conhecimento de uma mesma medida nos referenciais da fotografia (espaço imagem), na qual se deseja determinar os parâmetros, e do terreno (espaço objeto). Informando as dimensões do pixel no sensor, obtidas no relatório de calibração da câmara, foi possível efetuar medidas de distâncias lineares entre duas feições no *software* Monocomparador de Imagens Digitais (MID), obtendo o resultado no sistema do sensor. Então foram efetuadas medidas sobre as mesmas feições em imagens do *Google Earth* com escala conhecida, sendo estas referenciadas ao terreno. A partir destas medidas e acrescentados da focal, foram determinadas a escala e altura de vôo utilizando semelhança de triângulos, conforme a Equação (41).

$$E = \frac{d}{D} = \frac{c}{Z} \quad (41)$$

Onde:

E é a escala da fotografia;

d é a distância medida sobre a fotografia;

D é a distância equivalente no referencial do terreno;

c é a focal calibrada da câmara;

Z é a altura de vôo.

5.2.2 Sobreposição Longitudinal e Dimensão do Pixel no Terreno

Ainda, devem ser determinados de forma indireta a sobreposições longitudinal. Para isso deve-se determinar anteriormente o tamanho do quadro no terreno em seus dois eixos. Os cálculos que descrevem esses procedimentos são apresentados a seguir:

$$Q_x = q_x \cdot D \quad (42)$$

$$Q_y = q_y \cdot D \quad (43)$$

Onde:

Q_x é dimensão do quadro no terreno na direção transversal à linha de vôo;

Q_y é dimensão do quadro no terreno na direção paralela da linha de vôo;

q_x é dimensão do quadro do sensor na direção transversal à linha de vôo;

q_y é dimensão do quadro do sensor na direção paralela da linha de vôo;

D é o denominador da escala da fotografia.

A mesma metodologia é aplicada para o cálculo das dimensões do pixel correspondente no terreno, apenas devendo-se conhecer o tamanho do pixel no sensor.

Finalmente, o cálculo da sobreposição longitudinal é efetuado medindo a dimensão lateral de uma fotografia e a região onde não há sobreposição longitudinal na fotografia seguinte. Determinou-se o valor da sobreposição longitudinal, através da equação (44).

$$DIM_T - DIM_{SS} = S_{long} \quad (44)$$

Sendo:

DIM_T é dimensão total lateral da fotografia;

DIM_{SS} é dimensão da região onde não há sobreposição longitudinal na fotografia seguinte;

S_{long} é a sobreposição longitudinal.

5.3 PLANEJAMENTO DOS PONTOS DE APOIO FOTOGRAMÉTRICO

Dentro do contexto das fotografias disponíveis, determinou-se que deveria haver um ponto de apoio no terreno, a cada três modelos fotogramétricos formados pelas fotografias. Para efetuar uma densificação desses pontos de apoio, optou-se por realizar a mesma configuração das extremidades externas das fotografias também nas junções entre as faixas. Assim, viu-se que o número total de pontos de apoio deveria ser de 24 no bloco formado pelas 43 fotografias. A Figura 21 exemplifica a disposição planejada para os pontos de apoio em um trecho intermediário da primeira e segunda faixa. No Anexo B encontra-se a distribuição completa dos pontos planejados.

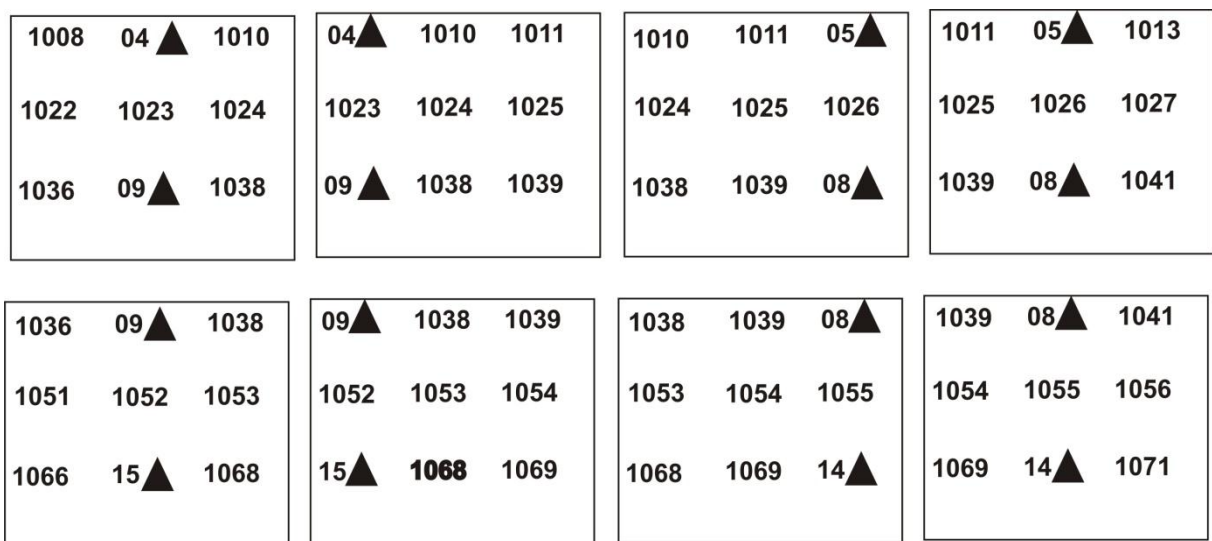


Figura 21. Esquema parcial dos pontos planejados (apoio e ligação).

Na Figura 21 estão representados os pontos de ligação em formato numérico, enquanto os pontos de apoio são demonstrados por triângulos. Os pontos de ligação foram determinados conforme REISS (2009), o qual menciona que deve haver nove pontos em cada fotografia que compõem o meio das faixas, e seis nas fotografias situadas nas extremidades. Nota-se que quando há pontos de apoio, estes também fazem a função de pontos de ligação.

Com o auxílio do fotoíndice (que proporciona a disposição geral das fotos), das fotografias originais (que mostram os detalhes da área representada) e tendo como parâmetro a distribuição apresentada na Figura 21, foram selecionadas as feições mais adequadas a serem ocupadas no terreno para obtenção precisa da posição. Dessa forma feições como: quinas de muro, telhados e canteiros estão entre as escolhidas, pois sua identificação nas fotografias é facilitada, visto a diferença de textura e principalmente contraste apresentada entre essas feições.

5.4 PLANEJAMENTO DO POSICIONAMENTO GNSS

Com base na resolução das fotografias e nos produtos a serem gerados, deve-se determinar o maior desvio padrão permitido no levantamento GNSS. O cálculo para precisão planimétrica das coordenadas obtidas no rastreamento, leva em conta a dimensão do pixel no terreno (30 cm). Dessa forma determinou-se que um terço do tamanho do pixel (10 cm) é o valor máximo admissível para a precisão destas coordenadas, pois é o possível a ser identificado nas fotografias. A precisão a ser alcançada na altimetria é referenciada ao PEC, portanto, esta foi estimada como um desvio-padrão, ou seja, um terço do valor da curva de nível da maior escala a ser mapeada. Sendo arbitrada a escala 1:1000 (curva de nível de 1 metro), a precisão mínima necessária na coordenada altimétrica é de 33,3 cm.

De maneira a obter a precisão requerida, foi necessário realizar o levantamento dos pontos de apoio planejados usando o método do posicionamento relativo estático, com um par de receptores de dupla frequência. Para o uso deste método é preciso eleger um ponto aproximadamente no centro da região de interesse, posicionando neste local a base do levantamento. Tal ponto foi definido a ser instalado nas dependências externas do posto da Polícia Rodoviária Federal (PRF), no km 243 da Rodovia BR-116, local esse que apresenta segurança e boas condições de recepção do sinal GNSS, evitando o multicaminho.

Os demais pontos a serem coletados, com o outro receptor, foram os planejados na seção 5.3. O tempo de rastreamento em cada um destes pontos, de forma a se obter a precisão requerida, observando a Tabela 2, foi estimado como devendo ser superior a 20 minutos, pois as linhas de bases que seriam formadas entre os pontos de apoio e a base da PRF não excederiam 20 km.

Para o auxílio ao levantamento de campo foram elaborados memoriais descritivos de modo que não seja esquecida a anotação de nenhum tipo de informação referente ao levantamento. Os memoriais descritivos trazem dados referentes à localização dos pontos a serem rastreados, como o mapa de localização geral, o detalhamento da feição a ser levantada e suas coordenadas aproximadas. Ainda, neste documento devem ser preenchidas as seguintes informações referentes ao levantamento de campo: altura da antena, altura da feição posicionada, horário do rastreamento, croqui, entre outras. Um exemplo de memorial consta no Anexo C.

5.5 PLANEJAMENTO DA ROTA DE CAMPO

No planejamento do levantamento de campo foram elaboradas duas rotas para percorrer e ocupar todos os pontos de apoio planejados. Em cada uma delas estava prevista a ocupação de 12 pontos, finalizando os 24 pontos previstos em duas campanhas de rastreo. Para a criação e otimização de cada rota foi utilizado o *software* Google Earth, onde, analisando a disposição dos pontos a serem ocupados, foram elaborados os itinerários.

Para cada ponto a ser rastreado foi escolhido um ponto alternativo, caso o primeiro estivesse inacessível ou mal localizado. A Figura 22 mostra a distribuição dos pontos de apoio, bem como seus alternativos na interface utilizada para planejamento das rotas.

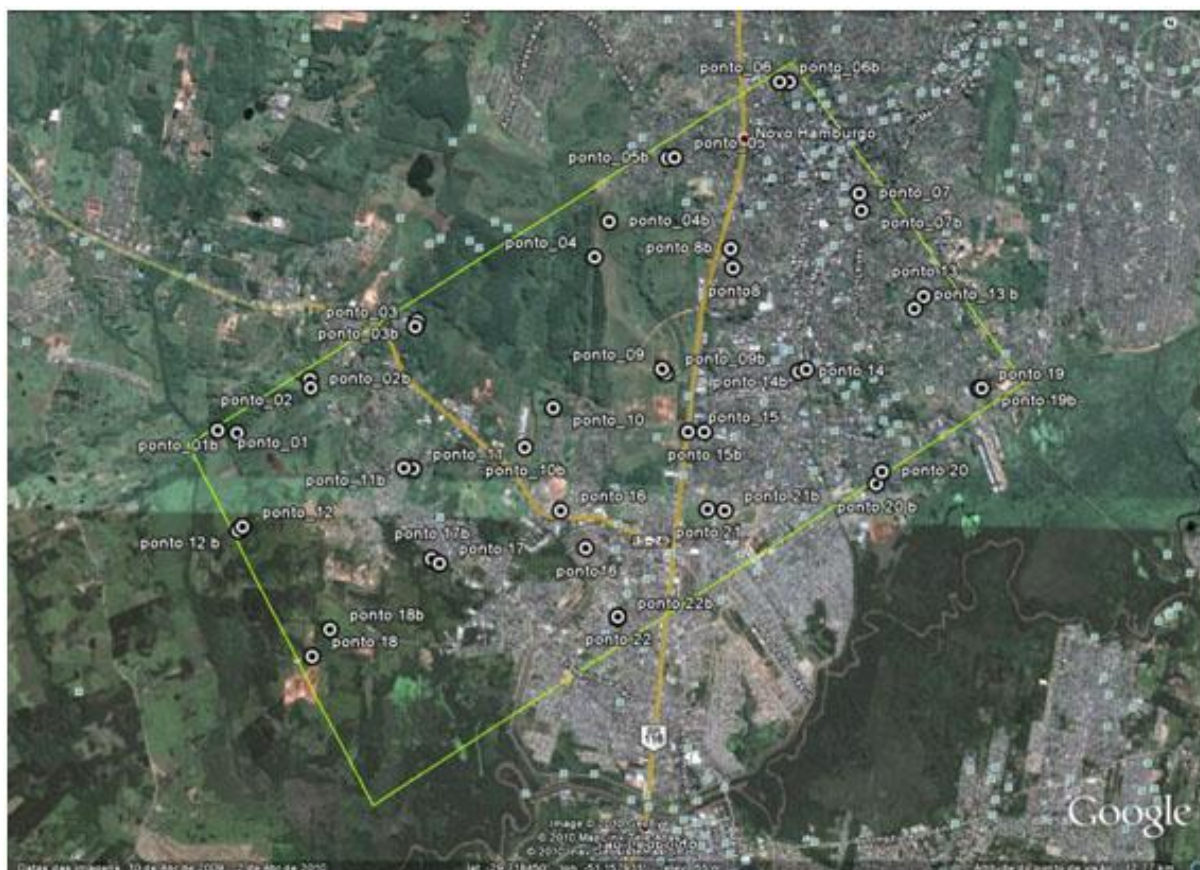


Figura 22. Distribuição dos pontos de apoio no *software* Google Earth.

Em algumas situações os pontos alternativos foram utilizados, em outras, foi necessária a escolha do ponto no local, visto que tanto o ponto escolhido quanto o ponto alternativo não eram possíveis de serem ocupados, seja pela má localização ou pela feição não existir mais.

5.6 POSICIONAMENTO GNSS

A campanha de levantamento GNSS, com finalidade de posicionar os pontos de apoio fotogramétrico, realizou-se nas datas de 31 de agosto e 21 de setembro de 2010. Nesta etapa efetuou-se o rastreamento sobre 22 feições identificáveis nas fotografias, utilizando uma unidade do receptor geodésico Topcon GR3. O tempo médio de rastreamento em cada ponto foi de 25 minutos. Ainda, posicionou-se outro ponto nas intermediações da PRF de São Leopoldo com a segunda unidade do receptor Topcon GR3. Coletando de forma contínua e simultânea aos pontos de apoio, este foi rastreado cerca de 10 horas no 1º dia do levantamento e cerca de 8 horas no segundo dia, tornando-se a base local do levantamento. É válido salientar que dos 24 pontos programados dois não foram ocupados devido ao término da carga da bateria do receptor instalado na PRF, impossibilitando o rastreamento simultâneo (*base/rover*).

Com o auxílio dos memoriais descritivos, confeccionados para cada um dos possíveis pontos de apoio, foi localizada a área e posteriormente a feição a ser posicionada. Dessa forma, efetuou-se o rastreamento GNSS, além da realização da coleta de informações essenciais para o posterior processamento dos dados. A coleta dos dados foi realizada no período das 9:00 às 19:00. Este horário foi escolhido por dois motivos: limitação de autonomia da bateria dos receptores, em especial o que se encontrava na base da PRF, e segurança nas operações de campo.

5.7 PROCESSAMENTO E AJUSTAMENTO DOS DADOS GNSS

Após a realização da campanha de posicionamento fez-se o processamento das observáveis GNSS utilizando o método de posicionamento relativo estático. Esta estratégia de posicionamento é frequentemente utilizada quando requer-se maior rigor geodésico, obtendo-se coordenadas de maior confiabilidade e precisão.

Dessa forma, o processamento relativo foi efetuado utilizando-se o receptor *rover*, o qual foi posicionado sobre cada um dos 22 pontos escolhidos previamente, e o receptor *base*, cujas as coordenadas são determinadas *a priori*. Assim, primeiramente deve-se determinar as coordenadas fixas da PRF. Esse procedimento é feito processando linhas de base entre esta estação e estações fixas de controle da RBMC. Para este trabalho utilizou-se dados das estações POAL, SMAR e SCLA localizadas respectivamente nos municípios de Porto Alegre, Santa Maria e Lages. A escolha destas referências levou em consideração as suas distâncias em relação à base do levantamento, sendo estas as estações mais próximas ao ponto PRF.

No processamento das observáveis GNSS para a determinação das linhas de base foi utilizado o *software* TopconTools. As informações básicas necessárias que o usuário deve fornecer ao *software* para o processamento são: coordenadas e relativas precisões das estações de referência; altura da antena de cada estação; escolha dos arquivos RINEX a serem combinados no processamento e estratégia básica para o processo dos dados.

O próximo passo foi realizar o ajustamento da base PRF. De maneira a homogeneizar e vincular a alguma rede geodésica ativa, o ponto a ser fixado foi ajustado utilizando o princípio do MMQ, conforme já explicado no capítulo 2.

As observações que compõem o ajustamento são os componentes das linhas base (ΔX , ΔY , ΔZ), e suas respectivas matrizes variância-covariância resultantes do processamento individual dos dados GNSS (posicionamento relativo). Os parâmetros a serem ajustados são as coordenadas (X , Y , Z) das estações que constituem a rede. Para isso as equações de observação utilizadas, para cada linha de base a ser ajustada, para aplicação do modelo paramétrico são (MONICO, 2007):

$$\begin{aligned}\Delta X &= X_i - X_j \\ \Delta Y &= Y_i - Y_j \\ \Delta Z &= Z_i - Z_j\end{aligned}\tag{45}$$

Com as coordenadas da base PRF determinadas pode-se realizar o processamento dos pontos de apoio fotogramétrico com relação a esta referência. As coordenadas processadas estão referidas ao sistema SIRGAS2000, e são apresentadas nos relatórios do TopconTools na forma de coordenadas geodésicas. Estas então foram convertidas para o sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), utilizando o *software* TCGeo, implementado pelo IBGE. As altitudes ortométricas de cada ponto de apoio fotogramétrico também foram determinadas. Para isto o *software* MAPGEO2010 foi utilizado.

5.8 FOTOTRIANGULAÇÃO

Na Fotogrametria Digital é bastante usual no processo de fototriangulação a execução do ajustamento de feixes perspectivos (*bundle adjustment*). Assim, são determinados conjuntamente os parâmetros de orientação exterior e as coordenadas no sistema objeto de pontos coletados previamente no sistema fotogramétrico. Os *softwares* comerciais dedicados

ao processamento fotogramétrico utilizam-se deste método para a realização da fototriangulação. A execução desta etapa utilizou a plataforma ERDAS LPS.

Para a realização da fototriangulação faz-se necessário a inserção prévia de alguns parâmetros para a execução do ajustamento. Assim, devem ser informados a altura média de voo, as dimensões do pixel, além dos dados de orientação interior, como distância focal calibrada, deslocamento do ponto principal (x_0 , y_0) e coeficientes de distorção radial simétrica (k_1 , k_2 e k_3), obtidos no relatório de calibração da câmara. O sistema de referência e o sistema de projeção empregados no projeto também devem ser configurados no *software*, dessa forma, os mesmos foram definidos no referencial das coordenadas processadas anteriormente, apresentadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Posteriormente fez-se a identificação nas fotografias dos pontos de apoio ocupados em campo. Para tanto, no *software* LPS, estes pontos foram coletados nas fotografias (sistema fotogramétrico) e então suas coordenadas tridimensionais (sistema objeto) foram injuncionadas. Na Figura 23 é mostrada a janela “*Point Measurement Tool*”, contendo nesta, duas fotografias com área de sobreposição e as listas de pontos com as coordenadas nos sistemas objeto (à esquerda) e fotogramétrico (à direita).

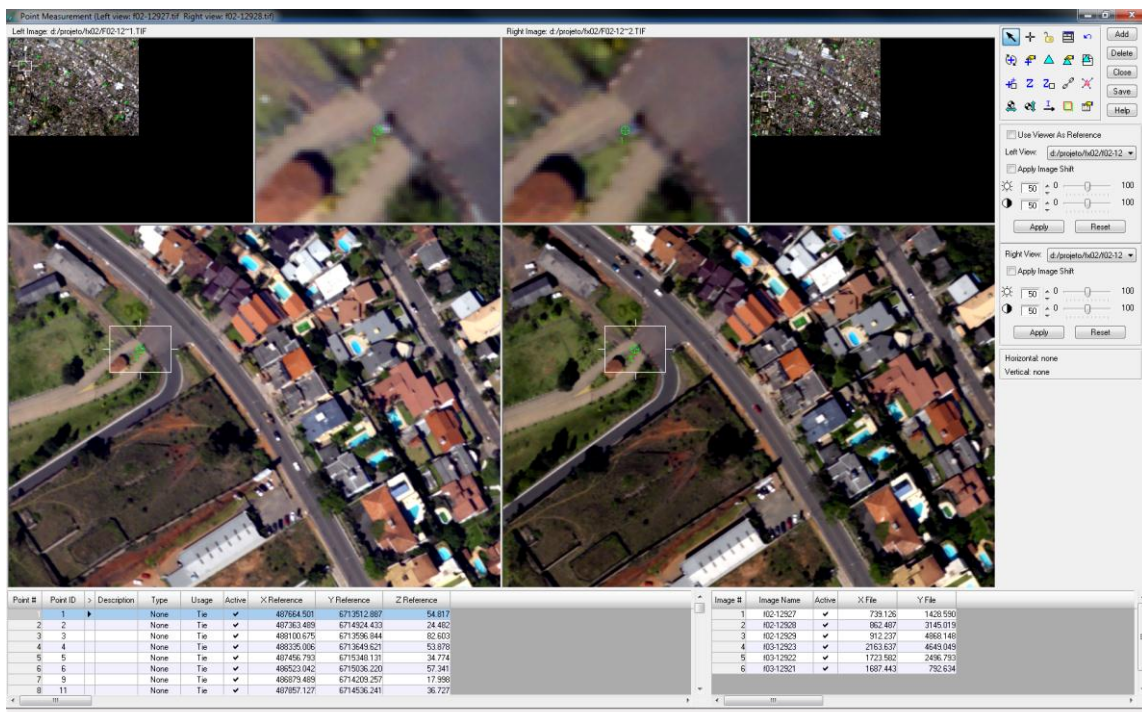


Figura 23. Janela para coleta de pontos para fototriangulação.

Nesta etapa percebeu-se que os pontos coletados em campo não estavam dispostos conforme os planejados teoricamente (Figura 21). Tal fato ocorreu por falha operacional e por

não haver feições facilmente coletáveis nos locais onde deveria haver pontos. A falha ocorreu por ter-se planejado a coleta de pontos em áreas onde não havia sobreposição entre fotografias nas extremidades das faixas, fato que resultou no descarte de dois pontos coletados em campo.

Assim, foi realizado um novo planejamento para os pontos de ligação, conforme a nova realidade dos pontos de apoio, como segue o detalhe na Figura 24. A disposição completa dos pontos encontra-se no Anexo D.

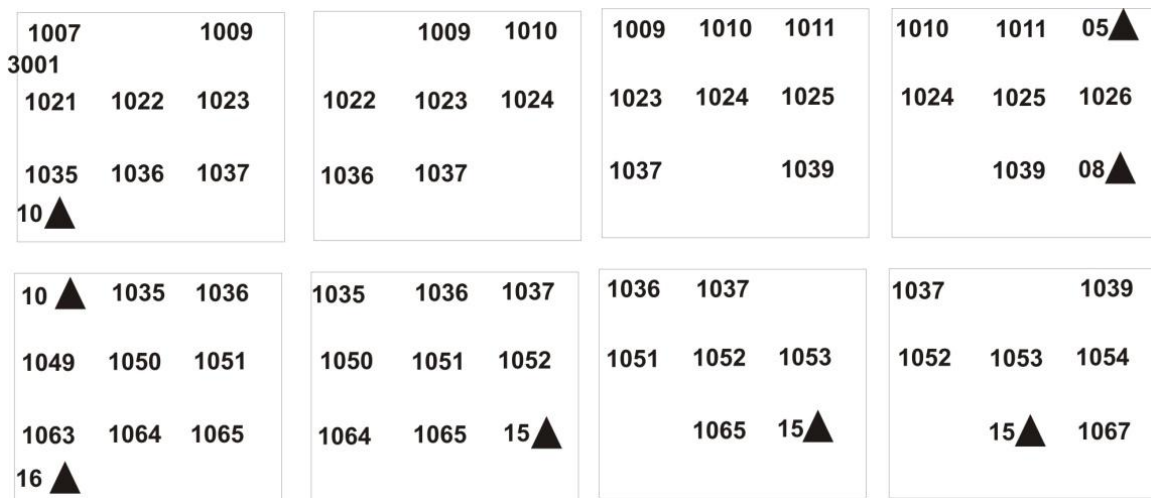


Figura 24. Pontos de apoio e ligação utilizados.

Os pontos de ligação são medidos apenas nas fotografias, e terão suas coordenadas no sistema objeto determinadas pelo processo de fototriangulação. Estes pontos são necessários para a amarração entre fotografias e faixas. Na aplicação percebeu-se que esses apoiaram a densificação dos pontos tridimensionais, gerando uma melhor qualidade dos modelos fotogramétricos. Os pontos de ligação coletados foram os planejados conforme a disposição dos pontos de apoio coletados.

Percebeu-se que somente estes pontos de ligação não seriam suficientes para um processo de fototriangulação satisfatório, então usando a função de geração automática de pontos de ligação do LPS os mesmos foram densificados. Tal função do *software* utiliza os princípios de correlação de imagens para a geração desses novos pontos. Esse procedimento foi realizado visando minimizar o erro médio quadrático (EMQ) que, em um primeiro momento, ficou acima do esperado. Mesmo com essa solução o erro encontrado estava além do admitido, em torno de 15 pixels.

Em Klein, Götz e Rocha (2009) foi realizado o mesmo procedimento, usando as mesmas fotografias, e resultando em um EMQ de 1,12 pixels para a fototriangulação. Dessa

forma, optou-se por empregar os pontos de ligação do trabalho citado, em conjunto com os gerados neste trabalho, a fim de verificar se havia melhora no EMQ. Os resultados obtidos neste procedimento geraram um EMQ de 1,21 pixels, valor ainda não ideal, porém aceitável para a proposta do projeto. O valor ideal, que estava objetivando se conseguir, era menor que um, para que o erro ficasse inferior a um pixel.

5.9 RESTITUIÇÃO

Com base na fototriangulação foram gerados modelos estereoscópicos formados por duas imagens com área de sobreposição, apresentado na Figura 25. Assim, com a extensão *Stereo Analyst* para ArcGIS habilitada fez-se a importação do arquivo gerado na fototriangulação, de maneira que este pudesse ser visualizado tridimensionalmente possibilitando o processo de restituição. Dessa forma, obtiveram-se coordenadas tridimensionais das feições no sistema objeto. As informações vetoriais geradas pela restituição foram gravadas na plataforma gráfica do ArcGIS, como mostra a Figura 26.

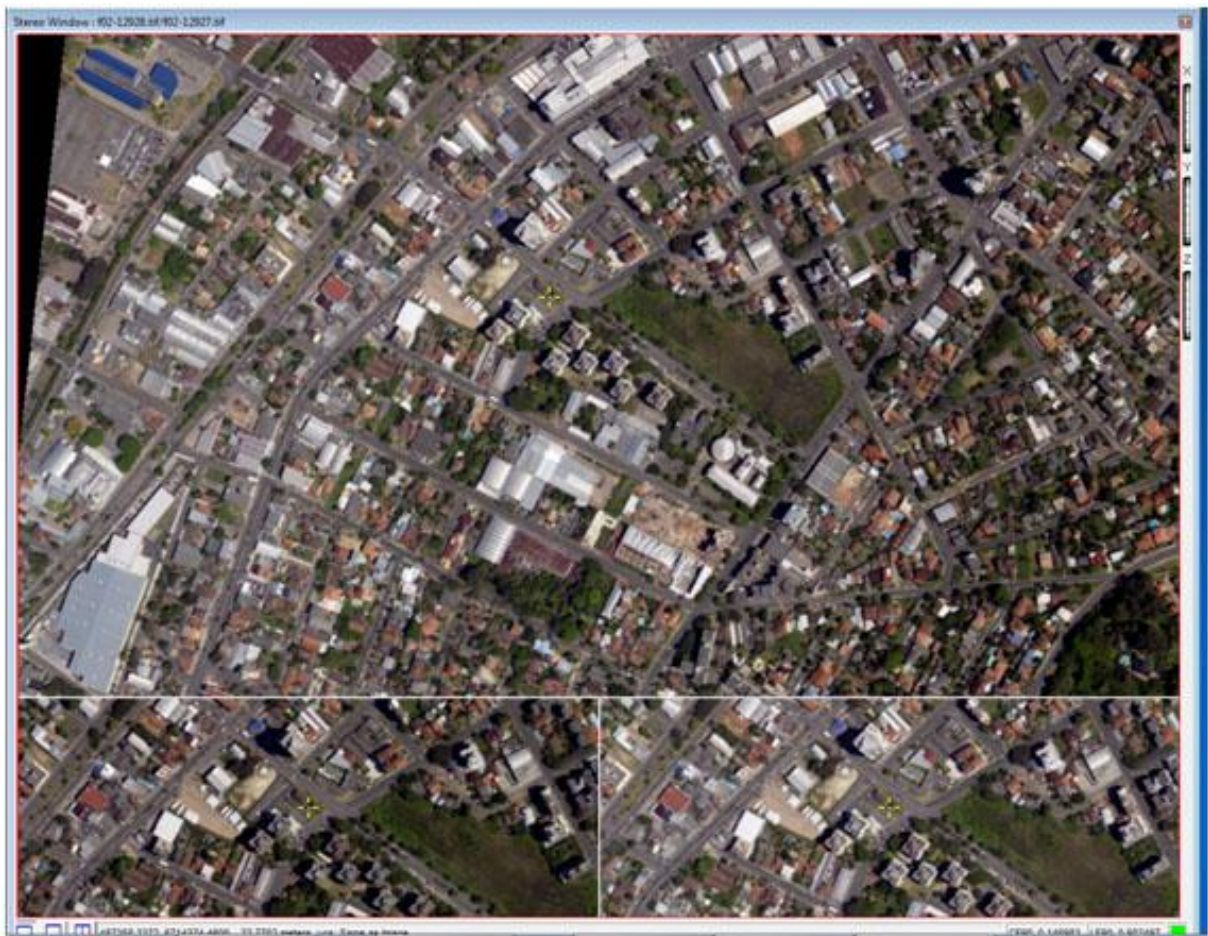


Figura 25. Exemplo de modelo de fotografias.

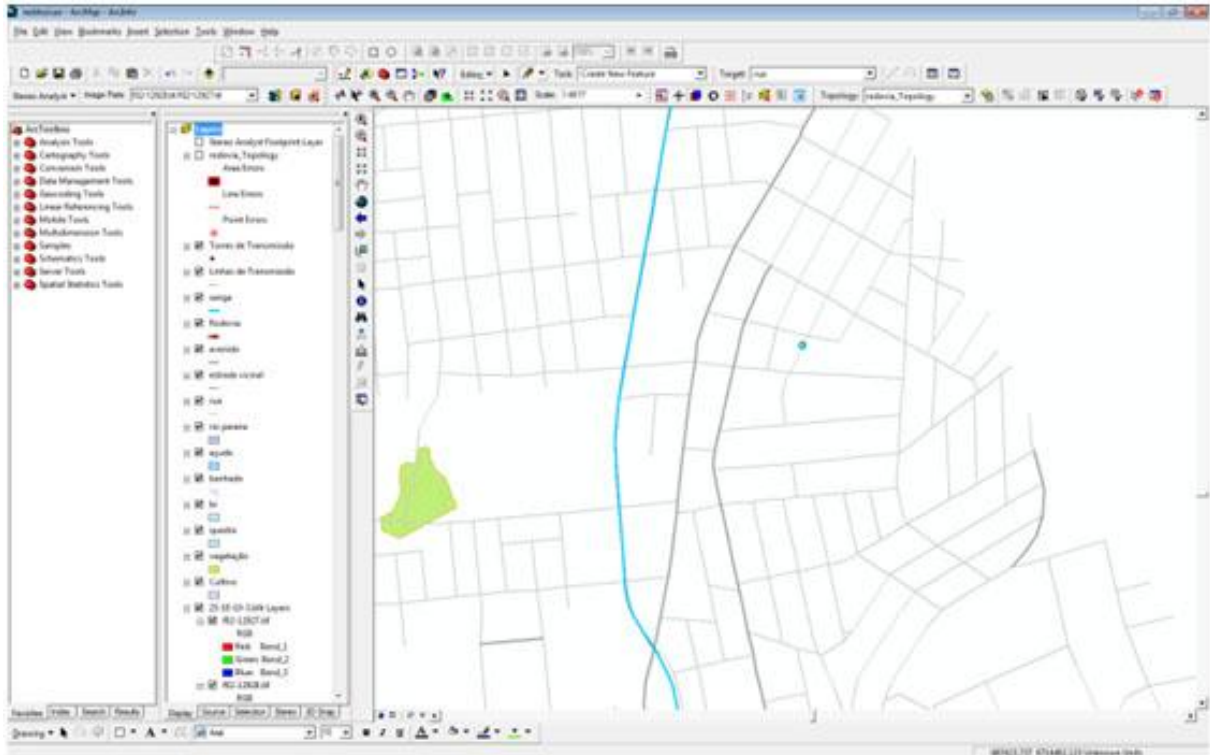


Figura 26. Representação das feições restituídas.

Foram restituídos os eixos de vias (estradas, avenidas, ruas e estradas vicinais), vegetação densa e hidrografia (corpos d'água, canais, sangas e banhados). Ainda, restituíram-se as feições ocupadas no rastreo GNSS, visando a análise da qualidade da carta.

Este procedimento foi realizado utilizando a Estação Fotogramétrica Digital do Laboratório de Fotogrametria da UFRGS (Figura 27). Na operação de restituição usou-se o TopoMouse, o qual possui funções específicas para a otimização do processo. Cada botão deste equipamento possui uma função própria, sendo as principais, a de minimizar a paralaxe e a de desenhar as linhas das feições. Isso era necessário pois durante o procedimento de restituição as fotografias eram visualizadas em pares estereoscópicos.

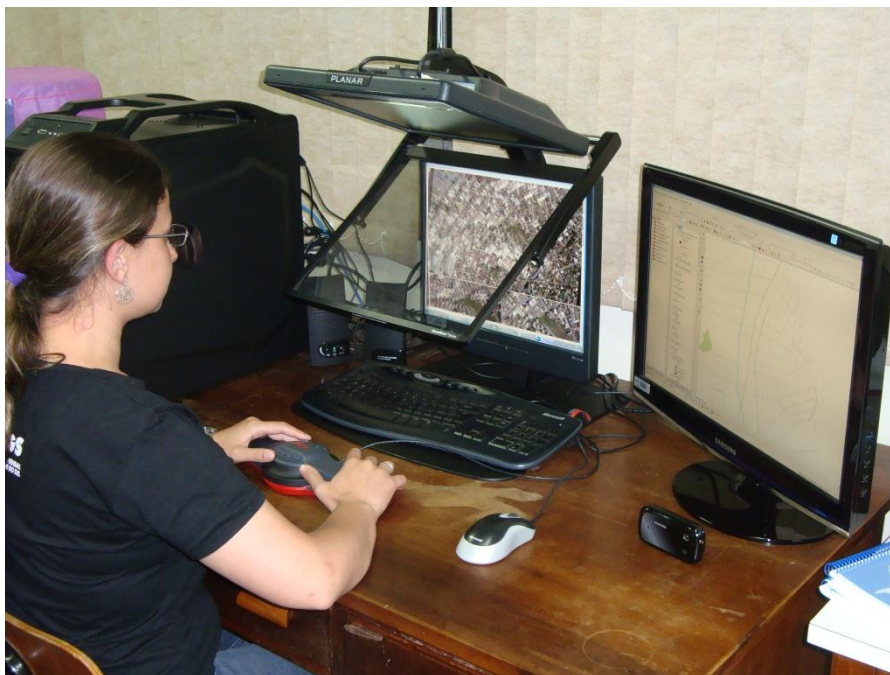


Figura 27. Realização da restituição.

Recomenda-se que a restituição seja realizada por um mesmo operador (TOMMASELLI, 2004) de maneira que os erros causados pela acuidade visual sejam semelhantes. Porém, neste trabalho, por não haver tempo hábil para tanto, três operadores foram responsáveis pela restituição.

5.10 GERAÇÃO E EDIÇÃO DE MDT

A geração do modelo digital de terreno foi feita no módulo *DTM Extraction* do LPS utilizando o arquivo resultante da fototriangulação, com configurações adicionais, tais como a definição do valor da distância entre as curvas de nível a serem geradas e o uso dos pontos de apoio e de controle. A edição do MDT foi feita no módulo *DTM Editing* do LPS. Em cada estereopar feições que prejudicam a determinação correta da elevação do terreno como copas de árvores, telhados de construções e elementos de sombra foram removidas, de maneira que apenas a superfície topográfica fosse considerada. Além disso, foram criadas linhas de descontinuidade para elementos de descontinuidade, como açudes (Figura 28) e campos de futebol.

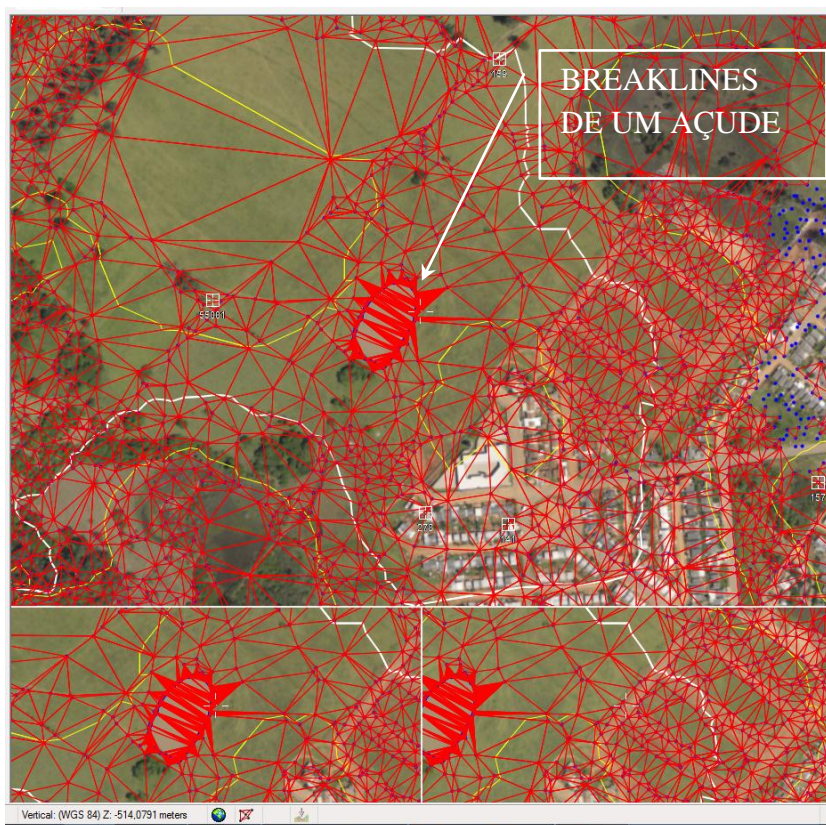


Figura 28. Exemplo de uma *breakline* em um corpo d'água.

5.11 GERAÇÃO DE ORTOFOTO E ANAGLIFO

- Ortofoto

A ortofoto foi gerada no *software* LPS, utilizando-se o MDT gerado a partir da fototriangulação realizada e das informações contidas no projeto de fototriangulação. Para cada fotografia do projeto foi elaborada uma ortofoto, totalizando 43 fotografias ortorretificadas.

- Anaglifo

Neste trabalho, foi gerado o anaglifo de apenas um par de fotografias (B13-B12). A escolha deste par baseou-se na maior diferença de elevação entre as feições, evidenciando o modelo tridimensional. Para a execução de todas as operações necessárias à produção do anaglifo utilizou-se o *software* LPS. Deve-se salientar que o resultado da qualidade do anaglifo está diretamente relacionado à qualidade da fototriangulação executada, a qual influenciará o resultado da visão estereoscópica obtida.

5.12 GERAÇÃO DO MAPA TOPOGRÁFICO

Partindo das feições restituídas nas fotografias, das curvas de nível geradas a partir do MDT e de pesquisa realizada para a inserção de toponímias das principais feições contidas na área mapeada, foi confeccionada uma carta topográfica digital, na qual os níveis de informação apresentados são:

- Classes de Feições
 - Sistemas de Transportes;
 - Hidrografia;
 - Vegetação;
 - Curvas de nível;
 - Limites Municipais.
- Toponímias

Dessa forma pode-se realizar a plotagem da base cartografada. A confecção de um mapa analógico foi obtida a partir da carta digital. Isto foi efetuado sobre uma folha A1, com dimensões de 594 x 841 milímetros, resultado em uma escala de plotagem de 1:15000 para toda a região mapeada.

A projeção escolhida para a impressão da carta foi a UTM, pois se trata de uma projeção com sistema de coordenadas métrico e de grade regular, facilitando os cálculos de área e distâncias sobre o papel. Outra vantagem que se pode citar no uso deste sistema é a facilidade de encontrar *softwares* de transformação entre coordenadas UTM, geodésicas e cartesianas globais, os quais se baseiam em fórmulas disseminadas no contexto da cartografia.

Deve-se salientar que a área mapeada se apresenta próxima ao meridiano central (-51°) do Fuso 22, ocasionando redução da escala da carta. Diversas projeções poderiam ser usadas a fim de minimizar este efeito, porém a vasta utilização da projeção UTM no Brasil torna outros sistemas incompatíveis com grande parte da base cartográfica já existente. Dessa forma, a projeção UTM torna-se a mais atrativa para o uso na carta confeccionada.

Após a fase de definição de escala e projeção da carta analógica, resta ainda adicionar convenções cartográficas e legenda à carta. Para isto, ferramentas automáticas de geração de escala gráfica e legenda do *software* ArcGIS foram utilizadas, além da inserção de outras informações textuais e gráficas essenciais à interpretação do mapa.

5.13 DETERMINAÇÃO DOS PONTOS PARA CONTROLE DE QUALIDADE DA CARTA

A verificação da exatidão posicional de um mapa digital pode utilizar a técnica de comparação entre posições de feições registradas no mapa com a posição "real" da feição no modelo da superfície terrestre. Assim, o processo de classificação da carta gerada foi baseado na coleta de coordenadas a partir de rastreamento GNSS (posição "real") sobre feições restituídas (registradas no mapa).

O processo de classificação de carta requer a definição do tamanho da amostra (n) a ser coletada em campo. Para isto, é necessário definir o erro máximo permissível (ε), a média amostral (\bar{X}), o desvio padrão amostral (S), o intervalo de confiança (Z) e o tamanho da população (N). Conforme Nogueira (2003) a população pode ser determinada com a utilização do *software DXF2XYZ*, disponível gratuitamente na internet no endereço www.guthcad.com.au por *Guthrie CAD/GIS Software 1999-2000*. Este *software* fornece uma listagem de coordenadas por níveis de informações específicos escolhidos, ou o total de coordenadas (população) existentes em todos os níveis que compõem uma base cartográfica digital, que possa ser utilizadas para a classificação de cartas (pontos e interseções), sendo que, para isso, a mesma deve estar em formato DXF. A população encontrada a partir da entrada do arquivo DXF da carta gerada foi de 6539 pontos ($N = 6539$).

Então, o tamanho da amostra pode ser calculado a partir da fórmula apresentada por Pereira (1978 *apud* ROCHA, 2002).

$$n = \frac{Z^2 \left(\frac{S}{\bar{X}}\right)^2 N}{(N-1) \left(\frac{\varepsilon}{\bar{X}}\right)^2 + Z^2 \left(\frac{S}{\bar{X}}\right)^2} \quad (46)$$

O intervalo de confiança e o erro máximo permissível foram atribuídos em função da disponibilidade de tempo e custos. Segundo Rocha (2002) o valor do erro máximo permissível apresenta o erro máximo a ser aceito quando se utiliza uma média amostral ao invés da média populacional. Assim foram adotados:

$$Z = 95\% = 1,96 \sigma$$

$$\varepsilon = 0,20 \text{ m}$$

Os valores de média amostral e desvio padrão amostral, foram obtidos de Francisco (2001 *apud* ROCHA, 2002), que apresentou em sua dissertação de mestrado a avaliação de uma carta utilizando 15 pontos como teste ($n = 15$).

$$\bar{X} = 0,613\text{m}$$

$$S = 0,393\text{ m}$$

Dessa maneira, aplicaram-se na Equação (46) os valores descritos anteriormente, determinando uma amostra a ser coletada em campo de 15 pontos.

A escolha do local do rastreio de cada ponto da amostra levou em conta critérios estabelecidos na Legislação Cartográfica Americana, pois no Brasil não existe um padrão ou norma vigentes. Esta cita que em regiões mapeadas com forma aproximadamente retangular, uma distribuição ideal de pontos teste deve privilegiar pelo menos 20% dos pontos por quadrante, conforme Figura 29. A legislação Americana ainda menciona que os pontos teste devem ser espaçados a intervalos de 10% da distância da diagonal do retângulo definido pela área de abrangência (Figura 30). Assim, obedecendo aos critérios de distribuição e espaçamento dos pontos da amostra, 15 feições bem identificadas nas fotografias foram selecionadas para o rastreio GNSS, determinando os pontos de controle de carta.

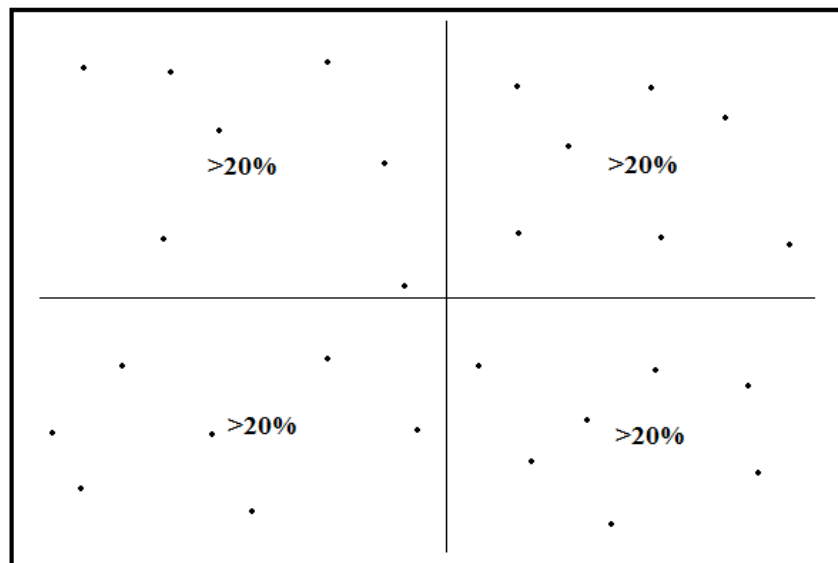


Figura 29. Distribuição dos pontos por quadrantes.

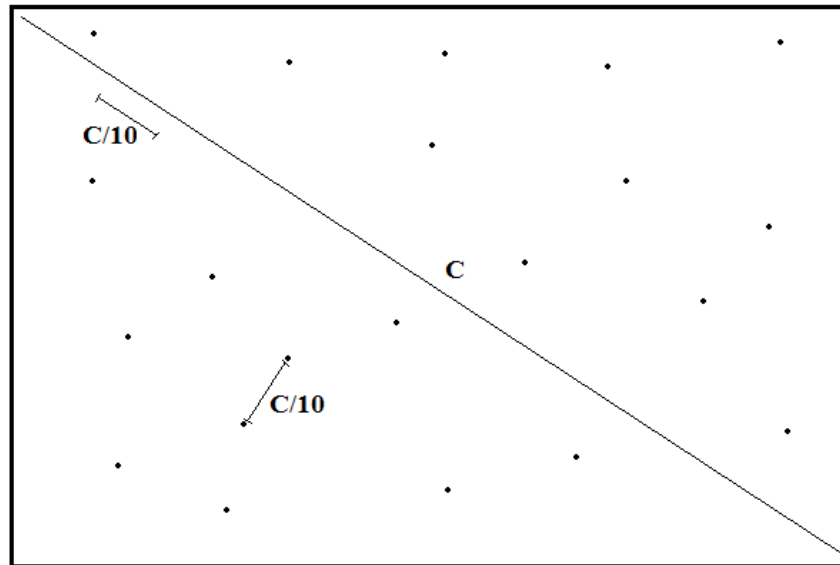


Figura 30. Distribuição dos pontos equidistantes.

As metodologias aplicadas no planejamento da rota de campo e posicionamento GNSS foram as mesmas realizadas no processo de coleta dos pontos de apoio fotogramétricos, conforme as seções 5.5 e 5.6 deste texto. Apenas o tempo de rastreamento das estações *rover* foi alterado, pois as distâncias destes pontos *rover* até a base PRF não excedeu 5 km, o que implica no tempo de observação de 10 minutos para cada ponto, conforme as normas do IBGE (Tabela 2).

Com as coordenadas da estação base PRF já materializadas, a partir do ajustamento dos dados coletados nas campanhas realizadas em 31 de agosto e 21 de setembro, conforme seção 5.7, foi posicionada de forma contínua um receptor sobre a estação PRF. Dessa forma, as coordenadas fixas desta base foram injuncionadas na realização do processamento relativo das estações *rover*, as quais formam a amostra dos pontos de controle de carta.

6 RESULTADOS E ANÁLISES

6.1 MOSAICO

O mosaico não-controlado confeccionado está representado na Figura 31. Percebe-se que as fotografias que formam o mosaico possuem um padrão radiométrico não-homogêneo, os quais não foram alterados.



Figura 31. Mosaico não-controlado.

6.2 FOTOÍNDICE

A partir da mosaicagem das fotografias foi montado o fotoíndice, auxiliando a organização dos demais processos fotogramétricos. Este está apresentado a seguir, na Figura 32.



Figura 32. Fotoíndice produzido.

6.3 DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DOS PARÂMETROS DO VÔO

6.3.1 Altura de Vôo e Escala da Fotografia

Com base na Equação (41) foram determinadas a escala e altura de vôo para cada uma das fotografias que compõem o mosaico. Com base nos valores calculados foram adotados

valores aproximados, que serão utilizados como base para a continuidade dos procedimentos. O cálculo destes parâmetros é essencial para que se tenha uma noção das condições as quais o vôo foi tomado.

Esses valores são:

$$Z = 2250 \text{ m}$$

$$E = 1/45000$$

6.3.2 Sobreposição Longitudinal e Dimensão do Pixel no Terreno

O tamanho do quadro no terreno em seus dois eixos é calculado pelas Equações (42) e (43).

Os valores encontrados para Q_x e Q_y são apresentados abaixo.

$$Q_x = 2205 \text{ m}$$

$$Q_y = 1660,5\text{m}$$

Aplicando a mesma metodologia para o cálculo das dimensões do pixel correspondente no terreno, apenas devendo-se conhecer o tamanho do pixel no sensor, obtivemos as dimensões de 30 por 30 centímetros de pixel no terreno.

Finalmente, utilizando a Equação (44) calculamos a sobreposição longitudinal média para as fotografias, sendo essa de 65%.

6.4 PROCESSAMENTO E AJUSTAMENTO GNSS DOS PONTOS DE APOIO FOTOGRAMÉTRICOS

O resultado das coordenadas UTM ajustadas da base PRF, realizada a partir de bases da RBMC, bem como as coordenadas dos pontos de apoio fotogramétrico determinadas no processamento com relação à base PRF são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Esta tabela ainda traz as informações de ondulação geoidal do modelo MAPGEO2010 para cada ponto, além de suas respectivas altitudes ortométricas.

Tabela 4. Coordenadas dos pontos de apoio fotogramétrico.

Coordenadas UTM - Fuso 22 - SIRGAS2000					
Ponto	Coord. Norte (m)	Coord. Este (m)	Alt. Geométrica (m)	Ond. Geoidal (m)	Alt Ortométrica (m)
PRF	6710427,389	485419,912	10,510	4,71	5,80
1	6712440,931	479934,600	15,699	4,78	10,91
2	6713136,442	481018,873	27,401	4,77	22,63
3	6713754,767	482186,047	83,933	4,76	79,17
5	6715894,534	485340,135	60,166	4,72	55,45
6	6716878,000	486822,077	32,696	4,72	27,98
7	6715334,816	487744,940	36,803	4,69	32,11
8	6714561,153	486195,998	60,098	4,69	55,41
10	6712818,079	484037,098	31,09	4,72	26,37
11	6712040,229	482236,713	32,199	4,75	27,45
12	6711223,490	480149,189	15,148	4,77	10,38
13	6714149,277	488421,416	74,572	4,67	69,90
14	6713375,000	487184,475	15,812	4,67	11,14
15	6712580,727	485896,666	21,245	4,69	16,56
16	6711575,862	484159,601	19,184	4,72	14,46
17	6710940,546	482595,620	24,129	4,72	19,41
18	6710050,084	481378,415	61,38	4,76	56,62
19	6713091,022	489255,240	18,852	4,66	14,19
20	6712003,332	488023,762	18,523	4,66	13,86
21	6711643,080	485959,837	16,643	4,66	11,98
22	6710296,578	484898,254	9,835	4,71	5,13
23	6710213,962	483126,643	13,952	4,74	9,21
24	6709566,141	482077,310	17,488	4,75	12,74

Os relatórios fornecidos pelo *software* apresentaram solução fixa das ambigüidades para todos os pontos processados, desta forma pode-se considerar que a solução encontrada para cada ponto foi a melhor dentre as possíveis. Isso pode ser atribuído ao fato da utilização de linhas de base curtas – até 20 quilômetros – no processamento dos pontos de apoio fotogramétricos.

6.5 MDT

O modelo digital de terreno foi produzido conforme descrito no item 5.10 da metodologia. O resultado obtido no MDT foi insatisfatório, pois a edição deste foi realizada parcialmente devido ao pouco tempo disponível para execução. Viu-se que sua edição é um processo lento porque envolve a análise dos triângulos da TIN, se o vértice representa corretamente a elevação do terreno, se a localização dos vértices está em local adequado. Por

exemplo, os vértices que estavam em áreas de sombra ou sobre as copas das árvores e no topo dos prédios.

6.6 ORTOFOTO E ANAGLIFO

No Anexo F são apresentadas duas das 43 ortofotos geradas conforme descrito no item 5.11 da metodologia. Cabe ressaltar que as ortofotos geradas não apresentaram o resultado esperado. Isto pode ser explicado pois este é dependente do resultado do MDT, o qual não foi satisfatório. Observa-se que grandes distorções estão presentes nas ortofotos. O anaglifo do par de fotografias escolhido é apresentado no Anexo G. O processo para geração deste produto também foi descrito na metodologia.

6.7 MAPA TOPOGRÁFICO

O Anexo E apresenta o mapa topográfico impresso na escala 1:15000 conforme o estabelecido na seção 5.12. Este segue as normas técnicas para dobramento de folhas de desenho e apresenta as convenções cartográficas essenciais para a interpretação e utilização do mapa.

6.8 PONTOS PARA CONTROLE DE QUALIDADE DA CARTA

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as coordenadas dos 15 pontos selecionados e posicionados em campo, que serão usados para o controle de qualidade da carta topográfica digital gerada. Estes pontos foram processados a partir da base PRF, já fixados anteriormente.

Tabela 5. Coordenadas dos pontos de controle da carta.

Coordenadas UTM - Fuso 22 - SIRGAS2000					
Ponto	Coord. Norte (m)	Coord. Este (m)	Alt. Geométrica (m)	Ond. Geoidal (m)	Alt Ortométrica (m)
P1	6710390,398	485456,681	12,273	4,71	7,563
P2	6710003,862	484261,137	9,705	4,72	4,985
P3	6710041,037	481908,042	21,796	4,75	17,046
P4	6711650,966	481959,315	26,009	4,75	21,259
P5	6712928,640	482182,017	62,021	4,76	57,261
P6	6712631,910	483933,973	22,697	4,72	17,977
P7	6711237,671	484520,530	12,881	4,71	8,171
P8	6711488,314	486765,780	12,477	4,68	7,797
P9	6712093,336	488251,542	46,284	4,66	41,624
P10	6713800,212	487720,536	62,561	4,67	57,891
P11	6714789,787	487288,157	24,027	4,68	19,347
P12	6715649,794	486417,027	35,046	4,70	30,346
P13	6715322,781	485999,929	51,436	4,70	46,736
P14	6714251,362	485965,856	79,340	4,69	74,650
P15	6712744,897	486267,624	24,825	4,68	20,145

A precisão destas coordenadas é sub-centimétrica, conforme o relatório fornecido pelo Software de processamento de dados GNSS, assim estes pontos podem ser utilizados como parâmetros de classificação da carta.

6.9 CLASSIFICAÇÃO DA CARTA TOPOGRÁFICA DIGITAL

A carta topográfica digital foi classificada conforme normas do PEC, utilizando os pontos de controle de qualidade da carta, coletados no terreno, e suas respectivas feições restituídas, coletadas na carta digital. Dessa forma, são analisadas estatisticamente suas discrepâncias quanto à exatidão cartográfica.

Diversos critérios podem ser utilizados para a classificação da carta, sendo a metodologia aplicada por Galo e Camargo (1994) a utilizada neste trabalho. Esta faz análises da existência de tendência e precisão do produto, os quais são os critérios utilizados na avaliação da carta.

A Tabela 6 mostra as coordenadas de mesmas feições extraídas na carta e determinadas pelo rastreamento GNSS (pontos de controle de qualidade), assim como suas discrepâncias nas coordenadas Norte e Este.

Tabela 6. Coordenadas das feições restituídas, dos pontos de controle da carta e suas discrepâncias.

Coordenadas UTM - Fuso 22 - SIRGAS2000						
Ponto	Coordenadas Restituição		Coordenadas Pontos de Controle		Discrepâncias	
	Coord. Norte (m)	Coord. Este (m)	Coord. Norte (m)	Coord. Este (m)	ΔN (m)	ΔE (m)
P1	6710391,102	485456,504	6710390,398	485456,681	0,704	-0,177
P2	6710004,774	484260,399	6710003,862	484261,137	0,912	-0,738
P3	6710040,952	481908,329	6710041,037	481908,042	-0,085	0,287
P4	6711650,660	481960,150	6711650,966	481959,315	-0,306	0,835
P5	6712929,285	482181,951	6712928,640	482182,017	0,645	-0,066
P6	6712630,762	483933,896	6712631,910	483933,973	-1,148	-0,077
P7	6711237,861	484520,513	6711237,671	484520,530	0,190	-0,017
P8	6711489,066	486763,687	6711488,314	486765,780	0,752	-2,093
P9	6712089,246	488253,827	6712093,336	488251,542	-4,090	2,285
P10	6713799,042	487721,386	6713800,212	487720,536	-1,170	0,850
P11	6714788,901	487288,157	6714789,787	487288,157	-0,886	0,000
P12	6715648,679	486416,425	6715649,794	486417,027	-1,115	-0,602
P13	6715322,270	486000,302	6715322,781	485999,929	-0,511	0,373
P14	6714250,374	485966,675	6714251,362	485965,856	-0,988	0,819
P15	6712744,871	486267,719	6712744,897	486267,624	-0,026	0,095

Conforme a norma, a avaliação da carta pode ser realizada sobre 90% dos pontos teste, assim um ponto (P9), que apresentou a maior diferença nas componentes, não foi considerado nos cálculos posteriores.

Um dos testes aplicados utiliza a média (Equação 47) e o desvio padrão (Equação 48) das discrepâncias amostrais:

$$\overline{\Delta X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X_i \quad (47)$$

$$S^2_{\Delta X} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta X_i - \overline{\Delta X})^2 \quad (48)$$

Os resultados do cálculo destes parâmetros estatísticos para a Tabela 6, sem a consideração de P9 são apresentados a seguir:

Discrepância na coordenada Norte:

- Média: -0,217 m

- Desvio Padrão: 0,772 m

Discrepância na coordenada Este:

- Média: -0,037 m
- Desvio Padrão: 0,766 m

Assim pode-se realizar o teste de tendência, analisando as seguintes hipóteses:

$$H_0 : \overline{\Delta\mu} = 0 \quad \text{contra} \quad H_1 : \overline{\Delta\mu} \neq 0$$

Para este teste, deve-se calcular a estatística amostral (t_x),

$$t_x = \frac{\overline{\Delta X}}{S_{\Delta X}} \cdot \sqrt{n} \quad (49)$$

e verificar se o valor t_x amostral está no intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula.

$$|t_x| < t_{(n-1, \alpha/2)}$$

onde: $t_{(n-1, \alpha/2)}$ é obtido da tabela *t de student*, com nível de significância de α e $n-1$ graus de liberdade.

Uma vez que a desigualdade não seja satisfeita, rejeita-se a hipótese nula, ou seja, a carta não pode ser considerada como livre de tendências significativas na coordenada testada, para um determinado nível de significância.

A existência de tendências em certa direção significa a ocorrência de algum problema, cuja causa pode ser a mais variada possível. Uma vez quantificada esta tendência, seu efeito pode ser minimizado pela subtração de seu valor a cada coordenada retirada na carta (GALO; CAMARGO, 1994).

Dos resultados obtidos na Tabela 6, tem-se a seguinte análise:

Tabela 7. Resultado do teste *t-student* aplicado.

Componente Analisada	Distribuição de <i>t-student</i>		Análise
	Calculado - tx	Tabela - $t_{(13, 5\%)}$	
N	1,05004	1,771	Não Tendencioso
E	0,17824		Não Tendencioso

Os resultados da Tabela 7 mostram que a carta topográfica digital gerada não se mostrou tendenciosa para as componentes analisadas.

A segunda análise a ser feita é a de precisão. Esta pode ser efetuada a partir da comparação do desvio padrão das discrepâncias com o Erro Padrão (EP), para a classe que se deseja testar.

$$H_0 : S_{\Delta X}^2 = \sigma_X^2 \quad \text{contra} \quad H_1 : S_{\Delta X}^2 > \sigma_X^2$$

O termo σ_X é o desvio padrão esperado na coordenada X , ou seja, o EP esperado para a classe a ser analisada.

É importante ressaltar que o EP para as classes é fixado para a componente, sendo que nos testes planimétricos, considera-se:

$$\sigma_X = \frac{EP \cdot D}{\sqrt{2}} \quad (50)$$

onde D é o denominador da escala da carta.

Se a análise for feita sobre a resultante das componentes, a expressão (50) fica:

$$\sigma_X = EP \cdot D \quad (51)$$

Depois de determinar o desvio padrão da classe esperada, é calculado a estatística *chi-quadrado* pela fórmula:

$$\chi_X^2 = (n-1) \cdot \frac{S_{\Delta X}^2}{\sigma_X^2} \quad (52)$$

e verificado se o valor de *chi* está no intervalo de aceitação ou rejeição:

$$\chi_X^2 \leq \chi_{(n-1, \alpha)}^2$$

onde: $\chi_{(n-1, \alpha)}^2$ é obtido da tabela *chi-quadrado*, com nível de significância de α e $n-1$ graus de liberdade.

Uma vez que a expressão anterior não é satisfeita, rejeita-se a hipótese nula, ou seja, a carta não atende a precisão correspondente à classe analisada. Assim, diversas escalas foram testadas nas Classes A, B e C, a fim de determinar a precisão da carta. Os resultados obtidos para as escala 1:1000 e 1:2000 são apresentados na Tabela 8 e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** respectivamente.

Tabela 8. Análise da precisão considerando a escala 1:1000.

Classe Analisada	Componente Analisada	<i>Chi-quadrado</i>		Análise Aceita (Sim/Não)
		Calculado - χ^2_X	Tabela - χ^2_X (13, 10%)	
A	N	36,497	22,362	Não
	E	35,977		Não
B	N	21,898		Sim
	E	21,586		Sim
C	N	18,248		Sim
	E	17,989		Sim

Tabela 9. Análise da precisão considerando a escala 1:2000.

Classe Analisada	Componente Analisada	<i>Chi-quadrado</i>		Análise Aceita(Sim/Não)
		Calculado - χ^2_X	Tabela - χ^2_X (13, 10%)	
A	N	18,248	22,362	Sim
	E	17,989		Sim
B	N	10,949		Sim
	E	10,793		Sim
C	N	9,124		Sim
	E	8,994		Sim

Pela análise realizada, pode-se concluir que a precisão da carta atende às especificações da classe B, para escala 1:1000 ou classe A para escala 1:2000. Em outras palavras, isto indica que todos os pontos planimétricos da carta atendem a uma precisão 0,8 metros, de acordo com o PEC, com significância de 10% ou com 90% de probabilidade.

O procedimento para o cálculo do PEC altimétrico, segue a mesma metodologia aplicada para a planimetria. Dessa forma, os resultados obtidos para a classificação altimétrica da carta serão apresentados a seguir.

A Tabela 10 mostra as altitudes ortométricas de cada ponto que compõem a amostra selecionada, bem como suas discrepâncias entre coordenadas altimétricas restituídas e rastreadas em campo. O ponto (P9) foi excluído da amostra também na componente altimétrica, pois este possui a maior discrepância dentre todos os pontos testados.

Tabela 10. Discrepâncias entre as altitudes dos pontos de controle e restituídos.

	Coordenadas Restituição	Coordenadas Pontos de Controle	Discrepância
Ponto	Alt. Ortométrica (m)	Alt. Ortométrica (m)	ΔH (m)
P1	11,2902	7,563	-3,727
P2	6,5439	4,985	-1,559
P3	18,2274	17,046	-1,181
P4	24,0436	21,259	-2,785
P5	48,9129	57,261	8,348
P6	24,648	17,977	-6,671
P7	10,1046	8,171	-1,934
P8	9,8789	7,797	-2,082
P9	29,1108	41,624	12,513
P10	51,8706	57,891	6,020
P11	21,5718	19,347	-2,225
P12	36,1362	30,346	-5,790
P13	47,4212	46,736	-0,685
P14	70,7886	74,650	3,861
P15	19,6761	20,145	0,469

Parâmetros estatísticos calculados para ΔH :

- Média: -0,710 m
- Desvio Padrão: 4,215 m

A Tabela 11 apresenta o teste de tendência aplicado a altimetria:

Tabela 11. Análise de tendência para altimetria.

Componente Analisada	Distribuição de <i>t-student</i>		Análise
	Calculado - t_x	Tabela - $t_{(13, 5\%)}$	
H	0,63021	1,771	Não Tendencioso

Após verificar na Tabela 11 que a amostra estudada não possui tendência, pode-se analisar a precisão altimétrica da carta.

Aplicando o teste *chi-quadrado* para diferentes equidistâncias de curvas de nível, chegou-se ao melhor resultado para o PEC altimétrico da carta topográfica digital gerada (Tabela 12).

Tabela 12. Resultados para precisão altimétrica da carta.

Classe Analisada	Componente Analisada	<i>Chi-quadrado</i>		Análise Aceita (Sim/Não)
		Calculado - χ^2_X	Tabela - $\chi^2_X (13, 10\%)$	
A	H	27,720	22,362	Sim
B	H	23,100		Sim
C	H	18,480		Sim

Curvas de nível com equidistância de 25 metros se enquadram na Classe C do PEC, mostrando que a carta pode atender a aplicações que requerem altimetria de até 18,75 metros de precisão, com 90% de probabilidade.

Os cálculos do PEC demonstram o que se esperava: coordenadas planimétricas, resultantes da restituição, de boa qualidade, enquanto os resultados obtidos na altimetria não atingem valores compatíveis com escala a planimétrica. Isto pode ser explicado, entre outras razões, pela dificuldade de se obter valores precisos de elevações, devido a uma possível má correlação entre as imagens, resultando em erros na amostra geradora do MDT.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Pode-se concluir que este trabalho engrandeceu o conhecimento técnico e prático dos participantes nas diversas áreas da Engenharia Cartográfica abordadas, como Fotogrametria, Geodésia, produção e análise cartográfica. O objetivo maior do projeto foi alcançado parcialmente, visto que o planejamento inicial sofreu diversas adaptações ao longo do período de desenvolvimento.

Cabe-se destacar que durante a realização das atividades planejadas os discentes puderam aprender lições sobre os mais variados assuntos, indo desde a resolução de pequenos imprevistos, passando por ajustar os melhores horários de reunião entre os componentes, e principalmente por desenvolver a habilidade de trabalhar em grupo dentro de um projeto amplo, longo e com várias fases.

Sobre as atividades desenvolvidas no projeto, pode-se realizar diversas ponderações, tanto positivas quanto negativas, bem como recomendações para futuros leitores:

- dificuldades com relação ao acesso a materiais teóricos para a pesquisa de referências. Atualmente, apesar da disseminação da Internet como meio de pesquisa, ainda necessita-se de mais conteúdos atuais e na língua portuguesa sobre os assuntos tratados neste texto. Porém, há diversos livros, dissertações e teses de qualidade que contribuíram de maneira fundamental para este trabalho;
- considerou-se que a área de estudo para o trabalho foi satisfatória por diversos aspectos: é relativamente próxima ao Campus do Vale da UFRGS (aproximadamente 45 km), facilitando o deslocamento; apresenta diferentes características de uso do solo, propiciando que fossem interpretados diversos tipos de feições; e, pelo fato de os discentes não conhecerem a área, foi um desafio maior para a orientação realizada nas saídas de campo;
- o planejamento de campo realizado para ocupação GNSS para os pontos de apoio foi falho em algumas situações, apesar de isto não ter comprometido a qualidade do produto. Mas, como observa-se na Figura 24 a disposição planejada e executada foi um pouco diferente do que a teoria apresentada cita. Tal fato ocorreu pelos dois fatores já mencionados, a dificuldade de encontrar feições identificáveis para ocupação na parte norte das fotografias, visto que haviam poucas edificações e muita vegetação e pelo erro operacional de haver planejado dois pontos nas extremidades das últimas fotografias das faixas, de maneira que

estes ficaram fora da zona de sobreposição. Tais pontos, após todo o processo de ocupação e processamento foram descartados;

- o tempo dispendido para rastreamento dos pontos de apoio, usando o receptor GNSS foi de 20 minutos para cada uma das estações. Percebeu-se, após os levantamentos, que vários desses pontos poderiam ter sido ocupados por um período menor, pois estavam mais próximos do ponto base. Dentro desse contexto, as saídas de campo demandariam menos tempo. Esse fato seria muito importante, principalmente no segundo dia de ocupação, pois a bateria do receptor que encontrava-se na base descarregou antes do término da coleta de todos os pontos com o receptor móvel;

- o processamento dos dados GNSS ocorreu como o planejado, entretanto a utilização do *software* Topcon Tools para processamento e ajustamento de dados, não permite a injeção relativa das coordenadas conhecidas na obra, além de superestimar a qualidade das coordenadas ajustadas, resultando em precisões questionáveis para as estações rastreadas;

- na operação de fototriangulação nota-se que os erros diminuem conforme aumentam os pontos de ligação medidos nas fotografias. Para isso os *tie points* devem ser coletados de maneira precisa levando à convergência do ajustamento;

- a restituição é um processo demorado e exige concentração e atenção do operador. Nesta etapa as feições foram restituídas de forma incompleta, pois o armazenamento das informações altimétricas não era efetuado pelo *software*. Isto ocorreu pela não habilitação da função de coleta tridimensional das feições. Sendo assim, apenas coordenadas planimétricas foram restituídas;

- a etapa de elaboração e edição do MDT é crítica dentro do processo fotogramétrico, pois este fornece grande parte da informação altimétrica resultante das fotografias. Dessa forma, sua execução deve ser extremamente cuidadosa tentando evitar erros grosseiros e sistemáticos;

- a partir dos resultados obtidos na avaliação da qualidade da carta, recomenda-se a aplicação de métodos estatísticos bem elaborados para aplicação do PEC, de maneira a embasar o uso efetivo dos produtos gerados;

- conclui-se que o emprego de fotografias de médio formato para o mapeamento cartográfico de escalas menores que 1:1000 pode ser adotado, tornando-se uma alternativa economicamente viável e de alta acessibilidade.

- o mapeamento fotogramétrico foi aplicado em uma área de tamanho reduzido, abrangendo apenas três municípios. Porém deve se deixar claro que o mapeamento de áreas de maiores dimensões, como a do estado do Rio grande do Sul, pode ser executado partindo-se dos mesmos procedimentos utilizados no presente trabalho.

Neste sentido, sugere-se para a continuidade deste trabalho, a geração de um SIG contendo níveis de informação que facilitem o planejamento e gestão municipais da região mapeada, a criação de um MDT mais refinado e a restituição das demais feições existentes nas fotografias. Os dados gerados neste projeto estarão disponíveis a todos estudantes que tenham interesse em desenvolver atividades naquela região.

REFERÊNCIAS

- ABIB, O. A. **Aerofotogrametria**. Presidente Prudente: Instituto de Planejamento e Estudos Ambientais (IPEA) – UNESP. 1983.
- ANDRADE, J. B. de. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: Informação e documentação – Trabalhos acadêmicos – Apresentação. Rio de Janeiro, 2005.
- BENDA, F.; CÔRREA, F. de P.; ALVES, M. da G. **Modelagem Digital de Terrenos aplicada à elaboração de mapas temáticos**. Anais do II Workshop de Computação Científica da UENF -- IIWCC 2006 Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil, 2006. Disponível em <http://www.lenep.uenf.br/~wcc/IIWCC-HomePage/arquivos_enviados/artigos/Fabricia_Benda.pdf> Acesso em 30 dez. 2010
- BLITZKOW, D.; MATOS, A. C. C. de. A Evolução dos Referenciais Usados em Geodésia: A Era Moderna. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 8, n. 1, p. 3 – 16, mar. 2007.
- BRASIL. Decreto n. 89.817, de 20 de junho de 1984. Instruções Reguladoras e Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF. 22 jul. 1984. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm>. Acesso em 09 out. 2010.
- BRITO, J. L. N. e S.; COELHO FILHO, L. C. T. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2007.
- DEMARQUI, E. N. **Determinação Semi-Automática da Altura de Edifícios em Imagens Aéreas**. Presidente Prudente, 2007. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, UNESP.
- ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S. A. Home Page. <http://www.esteio.com.br/servicos/se_ortofotos.htm>. Acesso em 30 dez. 2010.
- FUNDAÇÃO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA. “COREDE Vale do Rio dos Sinos”. <http://www.fee.tche.br/sitefee/pt/content/resumo/pg_coredes_detalhe.php?corede=Vale+do+Rio+dos+Sinos> Acesso em 07 nov. 2010.
- GALO, M. **Estrutura dos Dados de Entrada/Saída do Aplicativo para a Calibração de Câmaras (CC)**. 2004. 30 p. Disponível em: < <http://www.prudente.unesp.br/dcartog/uptk/>> Acesso em 15 set. 2009.

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

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

GOLÇALVES, H. de A. **Normas para Referências, Citações e Notas de Rodapé (NBR 6023/ NBR 10520 – 2002)**. Aracaju: UNIT, 2003.

GUARDIA, M. C.; REISS, M. L. L.; SILVA, R. A. C. **Levantamento Topográfico Usando o Sistema Móvel de Mapeamento Digital**. Presidente Prudente, 1999. 111 p. (Trabalho de conclusão de curso). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, UNESP.

HASEGAWA, J. K. **Restituição Fotogramétrica (Analítica e Digital): Teoria das Orientações – Introdução**. 2004. 25 p. Digitado.

IBGE. “Modelo de Ondulação Geoidal”. <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm> Acesso em 07 nov. 2010).

IBGE. “Recomendações para Levantamentos Relativos Estáticos – GPS”. 04.2008. <ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/pdf/Recom_GPS_internet.pdf>, Acesso em 13 set. 2010a.

IBGE. “Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo”. <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc_est.shtm> Acesso em 20 out. 2010b.

IBGE PRESIDÊNCIA. **Resolução PR nº 1 de 25/02/05** – Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro. Rio de Janeiro. 2005.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. “Teoria : Modelagem Digital de Terreno”. <<http://www.dpi.inpe.br/spring/teoria/mnt/mnt.htm>>. Acesso em 10 out. 2010.

KLEIN, I.; GÖTZ, J. J.; ROCHA, L. S. S. et al. **Mapeamento Fotogramétrico Utilizando Imagens Digitais de Pequeno Formato: Área Teste Entre os Municípios de Novo Hamburgo e São Leopoldo - RS**. Porto Alegre, 2009. (Trabalho de conclusão de curso). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS.

LANGLEY, R. B. **Propagation of the GPS Signals**, In: KLEUSBERG, A. and TEUNISSEN, P. *GPS for Geodesy*, Berlin: Verlag, 1996.

LEAL, E.; DALMOLIN, Q. Análise da Qualidade Posicional em Bases Cartográficas Geradas em CAD. In: GIS BRASIL 99, 5., 1999, Salvador. **Anais...** Salvador, 1999.

LEICK, A. GPS Satellite Surveying. 2. ed. New York: John Wiley, 1995

LIMA, O. P.; LOCH, C. O Uso de Câmaras Fotográficas de Pequeno Porte nos Levantamentos Cartográficos Destinados ao Cadastro Técnico Multifinalitário. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Multifinalitário – COBRAC, 1998, Florianópolis. **Anais...** UFSC, 1998.

LUGNANI, J. B. **Introdução à Fototriangulação**, Curitiba: Editora da UFPR, 1987.

MANUAIS: TUTORIAL De GEOPROCESSAMENTO. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/modelagem.html>>. Acesso em 30 dez. 2010.

MATOS, A. C. O. C. de. **Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de geodésia e geofísica na América do Sul**. São Paulo, 2005. 355 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MENESES, L. F. de. **Ortorretificação de Fotografias Aéreas de Pequeno Formato Obtidas com Câmara Digital Convencional**. João Pessoa, 2007. 76 f. Monografia (Tecnólogo em Geoprocessamento). Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba.

MIKHAIL, E. M. **Introduction to Modern Photogrammetry**. New York: John Wiley, 2001.

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

NOGUEIRA JÚNIOR, J. B. **Controle de Qualidade de Produtos Cartográficos: uma proposta metodológica**. Presidente Prudente, 2003. 130 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, UNESP.

OLIVEIRA, C. de. **Dicionário Cartográfico**. 4. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1993.

PHEM, S.; GRABMAIER, K. Refresher Course on Digital Photogrammetry. In: ISPRS Congress, July 12-23, 2004, Istanbul, Turquia. **Anais...** Istanbul. 2004. Disponível em: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm6/comm6.aspx>>. Acesso em 19 nov. 2010.

PEOPLEWARE NO COMMENTS. Disponível em <<http://pplware.sapo.pt/informacao/google-street-view-disponivel-em-3d/>>. Acesso em 30 dez. 2010.

REISS, M. L. L. **Fotogrametria I**. 2009. Notas de Aula

RIBEIRO, S. C. L. **Automação Fotogramétrica e Geração de Modelos Digitais do Terreno (MDTs)**. São Paulo, 1995. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

RIO GRANDE DO SUL. Lei n.10.283, de 17/10/94, COREDEs – Marco Legal. Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. Disponível em: <http://www.sri.rs.gov.br/conteudo_puro.asp?ta=1&modo_exibicao=&cod_menu=31>. Acesso em 07 nov. 2010.

ROCHA, R. dos S. da. **Exatidão Cartográfica para as Cartas Digitais Urbanas**. Florianópolis, 2002. 128 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas). Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC.

RUY, R. da S. **Desenvolvimento e Validação Geométrica de um Sistema para Mapeamento com Câmaras Digitais de Médio Formato**. Presidente Prudente, 2008. 229 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, UNESP.

SCHENCK, T. **Digital Photogrammetry**. v.1. Laurelville, Ohio: TerraScience, 1999.

SCHULER, C. A. B.; ARAUJO, L. L. Detecção de Assentamentos Irregulares em Áreas de Risco e Classificação das Habitações Utilizando Imagens Anaglifo – Uma Forma de Apoiar o Planejamento Urbano. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods and applications**, Berlin, New York: Walter de Gruyter, 1993.

SEVERO, T. C.; SOUZA, S. F.; MATSUOKA, M. T. Posicionamento GPS sobre referências de nível no estado do Rio Grande do Sul. In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2010, Recife. **Anais...** Recife: UFPE, 2010.

SLAMA, C. C. **Manual of Photogrammetry**. 4. ed. Falls Church, Virginia: American Society of Photogrammetry, 1980.

TEUNISSEN, P.J.G.; KLEUBERG, A. GPS for Geodesy. 2nd. Berlin: Springer, 1998.

TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria Básica**. 2004. 181 p. Digitado.

TOPCON PRODUCTS. Home Page. <<http://www.topconpositioning.com/products/>> Acesso em 14 nov. 2010.

USNO NAVSTAR Global Positioning System. Home Page. <<http://tycho.usno.navy.mil/gpsinfo.html>> Acesso em 27 dez. 2010.

WIKIPÉDIA. Home Page. <<http://pt.wikipedia.org/wiki/An%C3%A1glifo>> Acesso em 30 dez. 2010.

WOLF, P. R. **Elements of Photogrammetry with Air Photo Interpretation and Remote Sensing**. 2. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1983.

ZANARDI, R. P. **Geração de Modelo Digital de Terreno a Partir de Par Estereoscópico do Sensor CCD do Satélite CBERS-2 e Controle de Qualidade das Informações Altimétricas**. Porto Alegre, 2006. 94 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS.

ANEXOS

ANEXO A. CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DE CÂMARA.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DE CÂMARA

Presidente Prudente, 14 de Janeiro de 2008

1 CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA

Fabricante: HASSELBLAD

Modelo da câmara: H3D – 39 Megapixels- Digital

Número de série da câmara: IX05242009

Lente: HC 50 mm

Número de série da lente: 7BSI11097

Dimensão do quadro da imagem: 49 x 36,9 mm (Tamanho físico do sensor CCD)

Dimensões do pixel: 6,8 x 6,8 μm

Distância focal nominal: 50 mm

2 DADOS DA CALIBRAÇÃO

Método de calibração: Campo

Campo de calibração: Campo de calibração da FCT/UNESP

Data de aquisição das imagens: 12/12/2007

Abertura: f/11

Número de imagens: 16*

Número de alvos utilizados: 80

Número de pontos medidos nas imagens: 667

(Precisão na medida das coordenadas: $\sigma = 0,3$ pixel)

Graus de liberdade: 1155

* Imagens pré-corrigidas da distorção nominal com algoritmo específico da Hasselblad.

3 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO

Distância focal Gaussiana Equivalente:

$$c = 49,8132 \pm 0,0081 \text{ mm}$$

Distância focal Calibrada:

$$c = 49,8185 \text{ mm}$$

Coordenadas do Ponto Principal em relação ao centro geométrico da imagem:

$$x_0 = -0,2642 \text{ mm} \pm 0,0032 \text{ mm}$$

$$y_0 = 0,0123 \text{ mm} \pm 0,0034 \text{ mm}$$

Coordenadas do Ponto Principal em relação ao canto superior esquerdo da imagem:

$$x_0 = 24,2668 \text{ mm}$$

$$y_0 = 18,3851 \text{ mm}$$

Coefficientes de Distorção Radial Simétrica para a distância focal gaussiana equivalente:

$$k_1 = -5.5462\text{E-}007 \text{ mm}^{-2} \pm 1.3213\text{E-}007 \text{ mm}^{-2}$$

$$k_2 = 8.5352\text{E-}010 \text{ mm}^{-4} \pm 1.5618\text{E-}010 \text{ mm}^{-2}$$

k_3 = Este parâmetro não foi considerado estatisticamente significativo.

Coefficientes de Distorção Radial Simétrica para a distância focal calibrada:

$$k_0 = -1,06674\text{E-}004$$

$$k_1 = -5.54679\text{E-}007 \text{ mm}^{-2}$$

$$k_2 = 8.53611\text{E-}010 \text{ mm}^{-4}$$

k_3 = Este parâmetro não foi considerado estatisticamente significativo.

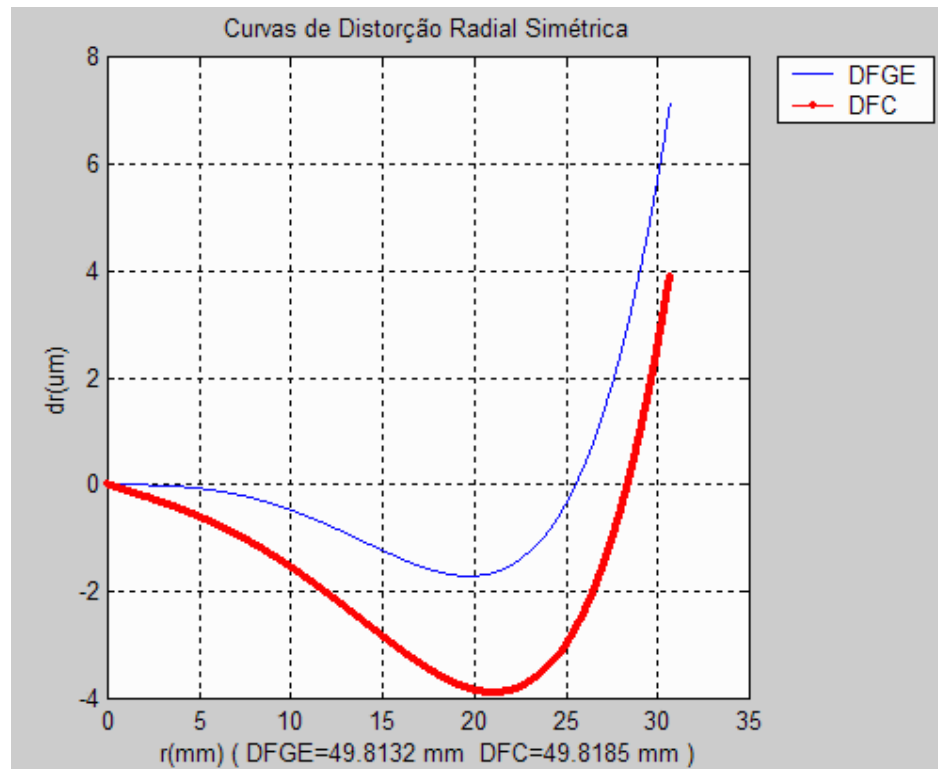
Coefficientes de Distorção Descentrada:

Estes parâmetros não foram considerados estatisticamente significativos.

4 VALORES MÉDIOS DE DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA

r (mm)	0	10	20	30
δr (mm)	0,000	-0,002	-0,004	0,004

6 CURVAS DE DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA



DFGE – Distância focal gaussiana equivalente

DFC – Distância focal calibrada

RESPONSÁVEL PELA CALIBRAÇÃO:

Msc. Roberto da Silva Ruy
UNESP – Faculdade de Ciências e Tecnologia

COLABORAÇÃO:

Prof. Dr. Mauricio Galo - UNESP – Faculdade de Ciências e Tecnologia

ANEXO

MODELO FUNCIONAL

$$x = x_0 + \Delta x - f \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y = y_0 + \Delta y - f \cdot \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

com:

x, y : coordenadas de imagem do ponto;

x_0, y_0 : coordenadas do ponto principal;

f : distância focal da câmara;

$\Delta x, \Delta y$: correções calculadas a partir dos componentes de distorção ótica: $(\delta x_r, \delta y_r)$ - componentes da distorção radial simétrica, $(\delta x_d, \delta y_d)$ - componentes da distorção descentrada:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x_r \\ \delta y_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta x_d \\ \delta y_d \end{bmatrix},$$

$$\delta x_r = (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) * (x - x_0)$$

$$\delta y_r = (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) * (y - y_0)$$

$$\delta x_d = P_1 [\beta (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] + 2P_2 (x - x_0)(y - y_0)$$

$$\delta y_d = 2P_1 (x - x_0)(y - y_0) + P_2 [\beta (y - y_0)^2 + (x - x_0)^2]$$

X_0, Y_0, Z_0 : coordenadas do centro perspectivo da câmara no espaço objeto;

X, Y, Z : coordenadas do ponto no espaço objeto;

r_{11}, \dots, r_{33} : elementos da matriz de rotação, que relacionam os espaços imagem e objeto – rotações em torno dos eixos X (ω), Y (φ) e Z (κ):

$$R = \begin{bmatrix} \cos \kappa \cos \varphi & \cos \kappa \sin \varphi \sin \omega + \sin \kappa \cos \omega & \sin \kappa \sin \omega - \cos \kappa \sin \varphi \cos \omega \\ -\sin \kappa \cos \varphi & \cos \kappa \cos \omega - \sin \kappa \sin \varphi \sin \omega & \sin \kappa \sin \varphi \cos \omega + \cos \kappa \sin \omega \\ \sin \varphi & -\cos \varphi \sin \omega & \cos \varphi \cos \omega \end{bmatrix}$$

Modelo de distorção radial simétrica para a curva correspondente a distância focal calibrada:

$$\delta x_r = (k_0 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) * (x - x_0)$$

$$\delta y_r = (k_0 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) * (y - y_0)$$

ANEXO B. DISPOSIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO E LIGAÇÃO PLANEJADOS.

FAIXA 01

70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83
01▲ 1002 1015 1016 12▲ 1030	01▲ 1002 02▲ 1015 1016 1017 12▲ 1030 11▲	1002 02▲ 1004 1016 1017 1018 1030 11▲ 1032	02▲ 1004 1005 1017 1018 1019 11▲ 1032 1033	1004 1005 03▲ 1018 1019 1020 1032 1033 10▲	1005 03▲ 1007 1020 1021 1022 1033 10▲ 1035	02▲ 1007 1008 1020 1021 1022 10▲ 1035 1036	1007 1008 04▲ 1021 1022 1023 1035 1036 09▲	1008 04▲ 1010 1022 1023 1024 1036 09▲ 1038	04▲ 1010 1011 1023 1024 1025 09▲ 1038 1039	1010 1011 05▲ 1024 1025 1026 1038 1039 04▲	1011 05▲ 1013 1025 1026 1027 1039 05▲ 1041	05▲ 1013 06▲ 1026 1027 1028 06▲ 1041 07▲	1013 06▲ 1027 1028 1041 07▲

FAIXA 02

41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27
12▲ 1030 1044 1045 10▲ 1060	12▲ 1030 11▲ 1044 1045 1046 10▲ 1060 17▲	1030 11▲ 1032 1045 1046 1047 1060 17▲ 1062	11▲ 1032 1033 1046 1047 1048 17▲ 1062 1063	1032 1033 10▲ 1047 1048 1049 1062 1063 10▲	1033 10▲ 1035 1048 1049 1050 1063 10▲ 1065	10▲ 1035 1036 1049 1050 1051 10▲ 1065 1066	1035 1036 09▲ 1050 1051 1052 1065 1066 15▲	1036 09▲ 1038 1051 1052 1053 1066 15▲ 1068	09▲ 1038 1039 1052 1053 1054 15▲ 1068 1069	1038 1039 06▲ 1053 1054 1055 1068 1069 14▲	1039 06▲ 1041 1054 1055 1056 1069 14▲ 1071	06▲ 1041 07▲ 1055 1056 1057 14▲ 1071 13▲	1041 07▲ 1043 1056 1057 1058 1071 13▲ 1073	07▲ 1043 1057 1058 13▲ 1073

FAIXA 03

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
10▲ 1060 1073 1074 20▲ 1080	10▲ 1060 17▲ 1073 1074 1075 24▲ 1080 27▲	1060 17▲ 1062 1074 1075 1076 1080 27▲ 1090	17▲ 1062 1063 1075 1076 1077 23▲ 1090 1091	1062 1063 10▲ 1076 1077 1078 1090 1091 22▲	1063 10▲ 1065 1077 1078 1079 1091 22▲ 1093	10▲ 1065 1066 1078 1079 1080 22▲ 1093 1094	1065 1066 15▲ 1079 1080 1081 1093 1094 21▲	1066 15▲ 1068 1080 1081 1082 1094 21▲ 1096	15▲ 1068 1069 1081 1082 1083 21▲ 1096 1097	1068 1069 14▲ 1082 1083 1084 1096 1097 20▲	1069 14▲ 1071 1083 1084 1085 1097 20▲ 1099	14▲ 1071 13▲ 1084 1085 1086 20▲ 1099 19▲	1071 13▲ 1085 1086 19▲ 1099

ANEXO C. MEMORIAL DESCRITIVO DE LEVANTAMENTO DE CAMPO.

PLANILHA DE CAMPO (LEVANTAMENTO GNSS)

Ponto coletado: P11() ou P11b()

Data: ___/___/___

Nome do Arquivo: _____

Coordenadas aproximadas:

P11

Lat: 29° 43' 18.17" S

Lon: 51° 10' 57.23" O

P11b

Lat: 29° 43' 17.91" S

Lon: 51° 11' 01.41" O

Altura da antena: ____, ____ m

() VERTICAL

() INCLINADA

Horário de rastreo (Hora Local)

Início: ____:____

Fim: ____:____

Croqui:

Descrição do Ponto:

Altura da Feição: ____, ____ m

Observações:

Localização:

P11

Esquina das Ruas Georg Hoefel com
Ignácio Antonio de Moraes.

P11b

Esquina da Rua Panai com Avenida
Alta Tensão.

Fotografia Original:



Imagem de Localização:



ANEXO D. DISPOSIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO E LIGAÇÃO COLETADOS.

	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83
FAIXA 01	01▲ 1002	01▲ 1002 02▲	1002 02▲ 1004	02▲ 1004 1005 03▲	1004 1005 03▲ 1006	005 1006 1007 1009	1006 1007 1001	1007 1009 1001	1009 1010	1009 1010 1011	1010 1011 05▲	1011 05▲ 1013	05▲ 1013 1014	1013 1014 06▲
	1015 1016	1015 1016 1017	1016 1017 1018	1017 1018 1019	1018 1019 1020	1019 1020 1021	1020 1021 1022	1021 1022 1023	1022 1023 1024	1023 1024 1025	1024 1025 1026	1025 1026 1027	1026 1027 1028	1027 1028
	1001 1020	1020 11▲	1020 11▲ 1032	11▲ 1032 1033	1032 1033	1033 10▲ 1035	10▲ 1035 1036	1035 1036 1037 10▲	1036 1037	1037 1039	1039 08▲	1039 08▲ 1041	08▲ 1041 1042	1041 1042 07▲

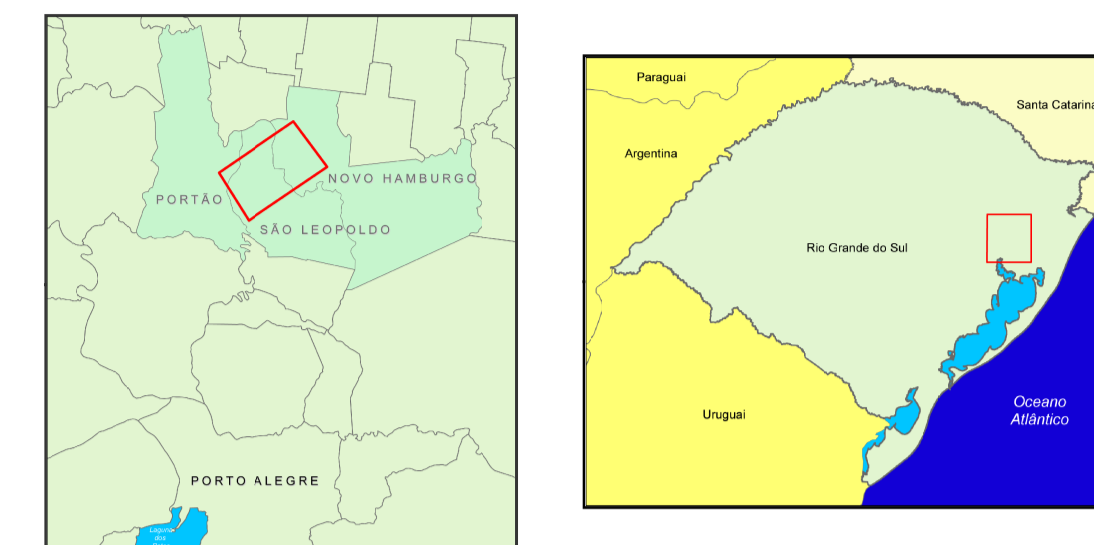
	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27
FAIXA 02	12▲ 2001 1030	1030	1030 11▲	11▲ 1032 1033	11▲ 1032 1033	032 1033 10▲	1033 10▲ 1035	10▲ 1035 1036	1035 1036 1037	1036 1037	1037 1039	1039 08▲	1039 08▲ 1041	08▲ 1041 1042	1041 1042 07▲
	1043 1044	1043 1044 1045	1044 1045 1046	1045 1046 1047	1046 1047 1048	1047 1048 1049	1048 1049 1050	1049 1050 1051	1050 1051 1052	1051 1052 1053	1052 1053 1054	1053 1054 1055	1054 1055 1056	1055 1056 1057	1056 1057
	10▲ 1058	10▲ 1058 17▲	1058 17▲ 1060	17▲ 1060 1061	1060 1061	1061 10▲ 1063	10▲ 1063 1064	1063 1064 1065	1064 1065 15▲	1065 15▲	10▲ 1067	1067 1068	1068 14▲ 1070	14▲ 1070 1071	1070 1071 13▲

	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
FAIXA 03	10▲ 1058	10▲ 1058	1058 17▲ 1060	17▲ 1060 1061	1060 1061 16▲	1061 16▲ 1063	16▲ 1063 1064	1063 1064 1065	1064 1065 15▲	1065 15▲ 1067	1067 1068 14▲	1067 1068 14▲	14▲ 1070 1071	1070 1071 13▲
	24▲ 1073	24▲ 1073 1074	1073 1074 1075 23▲	1074 1075 1076 23▲	1075 1076 1077	1076 1077 1078	1077 1078 1079	1078 1079 21▲	1079 21▲ 1081	21▲ 1081 1082	1081 1082 1083	1082 1083 1084	1083 1084 1085	1084 1085
	1000 1067	1000 1067 1068	1067 1068 1069	1068 1069 1090	1069 1090 22▲	1090 22▲ 1092	22▲ 1092 1093	1092 1093 1094	1093 1094 1095	1094 1095 1096	1095 1096 20▲	1096 20▲ 1000	20▲ 1098 1099	1098 1099

ANEXO E. MAPA TOPOGRÁFICO.

MAPA TOPOGRÁFICO SÃO LEOPOLDO / NOVO HAMBURGO

MAPA DE SITUAÇÃO



ESCALA 1:15.000



EQUIDISTÂNCIA DAS CURVAS DE NÍVEL: 5 METROS

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR

DATUM: SIRGAS2000

DECLINAÇÃO MAGNÉTICA: -15,61°
CONVERGÊNCIA MERIDIANA: 0°3'4,28"

ORIGEM DA QUILOMETRAGEM UTM: EQUADOR E MERIDIANO 51° W. GR.
ACRESCIDAS AS CONSTANTES 10.000 KM E 500 KM, RESPECTIVAMENTE

LEVANTAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO: 2008
FOTOTRIANGULAÇÃO, RESTITUIÇÃO, MODELO DIGITAL DO TERRENO: 2010

PEC PLANIMÉTRICO: CLASSE A

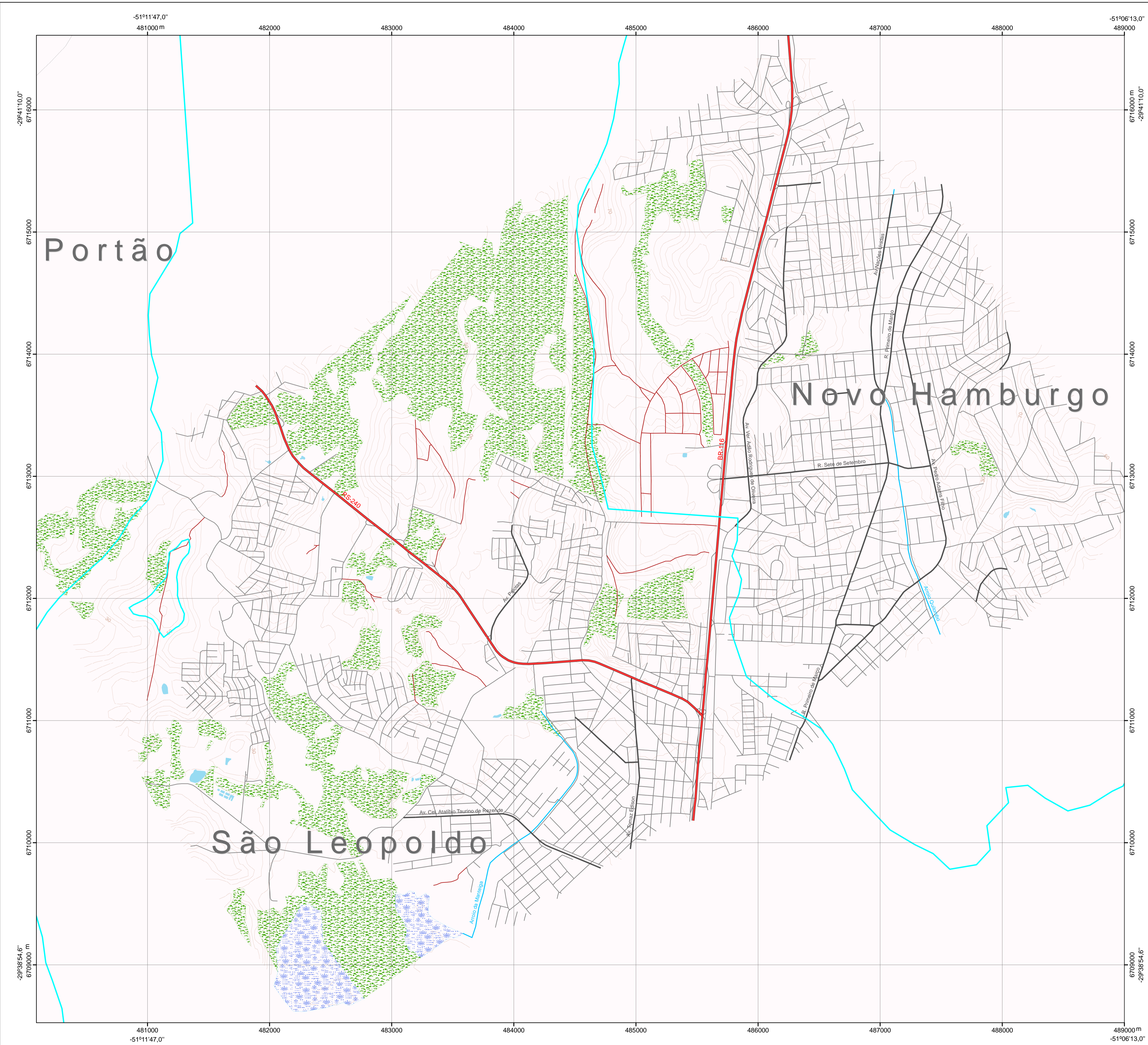
LEGENDA

- Rodovia
- Avenida
- Estrada Vicinal
- Rua
- Arroio
- Açude
- Banhado
- Vegetação
- Curvas de Nível
- Município

**MAPEAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO
DIGITAL UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE MÉDIO FORMATO**

RESPONSÁVEIS TÉCNICOS
ELEN MARTEN DE LIMA
THIAGO ALEXANDRE MARQUES THOMAZ
TIAGO CAVAGNOLI SEVERO
ORIENTADOR: MÁRIO LUIZ LOPES REISS

PORTO ALEGRE, 13 DE DEZEMBRO DE 2010



ANEXO F. ORTOFOTOS.





ANEXO G. ANAGLIFO.

