ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ÉMERSON ANDRADE DINIZ

AVALIAÇÃO DE PRODUTOS AEROFOTOGRAMÉTRICOS ALTERNATIVOS COM CÂMARAS DIGITAIS NÃO MÉTRICAS DE PEQUENO FORMATO EM VÔO APOIADO

São Paulo

2016

ÉMERSON ANDRADE DINIZ

AVALIAÇÃO DE PRODUTOS AEROFOTOGRAMÉTRICOS ALTERNATIVOS COM CÂMARAS DIGITAIS NÃO MÉTRICAS DE PEQUENO FORMATO EM VÔO APOIADO

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes
Informações Espaciais

Orientador:
Prof. Dr. Jorge Pimentel Cintra

São Paulo
2016

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catalogação-na-publicação

DINIZ, ÉMERSON
AVALIAÇÃO DE PRODUTOS AEROFOTOGRAMÉTRICOS ALTERNATIVOS COM CÂMARAS DIGITAIS NÃO MÉTRICAS DE PEQUENO FORMATO EM VÔO APOIADO / . DINIZ -- versão corr. -- São Paulo, 2016.
109 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Aerofotogrametria 2.Posicionamento por Ponto Preciso 3.Câmaras Digitais não Métrica de Pequeno Formato 4.Voo Apoiado I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha querida mãe Mirthes, a memória de meu amado pai Nunes,todos meus familiares e à minha amada esposa Ana Luiza e filha Beatriz.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que colaboraram para a concretização desta pesquisa, mas em especial:

Ao Prof. J. P. Cintra pela dedicação, cordialidade e conhecimento sempre ao alcance de todos.

Ao Prof. Dr. Edvaldo Simões da Fonseca Junior pelo todo apoio e cooperação.

Ao amigo Leonardo Ercolin Filho pelas idéias e amizade;

A minha esposa Ana Luiza pelo apoio;

A minha querida filha Beatriz pela felicidade;

Aos amigos Luis Antonio de Lima e Guilherme Pinho da Fototerra pelo apoio.

EPÍGRAFE

“Para termos mais amanhã, precisamos
ser mais do que somos hoje”.
(***Goethe***)

RESUMO

Os produtos cartográficos gerados pelo processo de Aerolevantamento são uma importante ferramenta de análise e tomada de decisões na engenharia moderna. Por outro lado a crescente demanda de projetos está levando pesquisadores a buscarem meios mais rápidos, econômicos e eficientes para obter bons produtos. Dessa maneira, vem surgindo novos equipamentos e produtos nessa área. Paralelamente, com o advento do posicionamento por satélite é possível um maior controle da qualidade cartográfica e a verificação da eficácia desses novos produtos. O presente estudo analisa diferentes tecnologias associadas ao uso da câmara digital não métrica de pequeno formato, como a HASSELBLAD H4D-31, com a utilização do Posicionamento por Ponto Preciso associado a um sistema inercial com e sem a utilização de uma base de referência (voo não apoiado), para a elaboração de ortofotos e cartas. Com relação à precisão geométrica e atendimento do padrão brasileiro de qualidade foram testadas comparativamente essas e outras alternativas, contando com dados da RBMC e apoio suplementar de campo. O produto resultante foi analisado também quanto à eficácia no que se diz respeito à boa qualidade da imagem com a identificação dos objetos em campo para utilização em projetos de engenharia. Ao final pode-se dizer que o produto foi validado, quanto à qualidade informativa e quanto à precisão necessária, atingindo o PEC classe A, para a escala 1:2.000. Ou seja, esse produto é uma alternativa viável tecnicamente e de menor custo, para aplicações como as apresentadas no presente trabalho.

Palavras-chave: Novos produtos cartográficos, Aerofotogrametria, Câmara de pequeno formato, Voo não apoiado e Precisão Geométrica.

ABSTRACT

The cartographic products generated by Aerial Survey process is an important tool for analysis and decision in modern engineering. On the other way the growing demand for projects is leading researchers to seek ways more faster, economical and efficient to get good products. In this way, are emerging new equipments and products in this area. At the same time, with the advent of satellite positioning it is possible greater control of cartographic quality and checking the effectiveness of these new products. This study analyzes different technologies associated with the use of the digital camera not metric of small-format, as the Hasselblad H4D-31, using the Positioning Precise Point associated with an inertial system without the use of a reference base (flight not supported), for the development of orthophotos and maps. Regarding the geometric precision and care of the Brazilian standard of quality we were tested compared these and other alternatives, with data RBMC and additional support field. The resulting product was analyzed as well as the effectiveness as it relates to the quality of the image with the identification of field objects for use in engineering projects. At the end it can be said that the product was validated information as to quality and as to the necessary precision, reaching the PEC class A, to 1: 2000. That is, this product is a technically feasible and low-cost alternative for applications such as those presented in this work.

Keywords: New cartographic products, Aerophotogrametry, small format camera, Flight not supported and Accuracy Geometrical.

INDÍCE

01 INTRODUÇÃO 01

1.1 Apresentação e Justificativa 01

1.2 Objetivos 03

02 SENSORES AEROTRANSPORTADOS E SUA INTEGRAÇÃO 04

2.1 Estudos e Perspectivas 04

2.2 Câmeras não métricas 08

2.3 Sistema Inercial 14

2.4 Aeronave 17

2.5 GNSS (Global Navigation Satellite System) 21

2.6 Rede de Monitoramento Continuo dos Sistemas GNSS (RBMC) 22

2.7 Posicionamento por Ponto Preciso 26

2.8 Modelo Gravitacional da Terra 2008 – EGM08 no PPP 34

2.9 Efeito BoreSight e sua correção 39

03 PROGRAMAS, MODELOS E CORREÇÕES 44

3.1 Navegação Inercial 44

3.2 Filtro de Kalman 53

3.3 Inertial Explorer 2.30 55

3.4 DVP (Digital Video Plotter) 6.4 57

3.5 MAPEGEO10 58

04 CASO PRÁTICO: DESCRIÇÃO E LEVANTAMENTO DE CAMPO 62

4.1 Descrição da Aplicação: Levantamento de Linha de Transmissão 62

4.2 Escopo e Precisão do Produto 62

4.3 Produtos 64

4.4 Objetivo dos Produtos 67

4.5 Levantamento de Dados 69

4.5.1 Preparação do Equipamento 69

4.5.2 Tomada Aérea de Calibração 70

4.5.3 Apoio de Campo 71

05 PROCESAMENTO DOS DADOS 76

5.1 Introdução 76

5.2 Processamento dos Dados do Sistema Inercial 76

5.3 Processamento das Imagens 79

5.4 Aerotriangulação 79

5.5 Medição dos Pontos de Controle 80

5.6 Usos do Produto em Projetos 80

06 CONTROLE DE QUALIDADE DOS PRODUTOS GERADOS E RESULTADOS OBTIDOS 82

6.1 Introdução 82

6.2 Metodologia e Planejamento da Aplicação Prática 85

6.3 Análise dos Produtos 90

6.4 Experimento 01 - PPP Sem a Utilização de Base Nem Apoio Terrestre 91

6.5 Experimento 02 - PPP Com a Utilização de Apoio Terrestre 96

6.6 Experimento 03 - Estação RBMC Sem a Utilização de Apoio Terrestre Adicional 98

6.7 Experimento 04 - Estação RBMC Com a Utilização de Apoio Terrestre 101

6.8 Análise Comparativa Entre os Diferentes Experimentos 103

07 CONCLUSÕES 104

08 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 106

08 REFERÊNCIAS CONSULTADAS 108

Lista de Figuras

Figura. 01 Ilha da Trindade, em cujo levantamento se utilizou câmera de médio formato a bordo de helicóptero – Fonte: Ramos et al (2008).....07

Figura. 02 Hasselblad H4D-31, DMC-Z, Sony NX7 e Nikon DSLR . Fonte: Intergraph, Sony , Nikon e Hasselblad. 11

Figura. 03 APL Foco automático ao centro da imagem independente da angulação do sensor. 13

Figura. 04 Sistema de Coordenadas Digital TOMMASELLI. 14

Figura. 05 Relação entre os Sistemas: Sensor, IMU e GNSS.Fonte: NovAtel Inc. 16

Figura. 06 IMU, Antena GNSS e receptor. Fonte: NovAtel Inc. 17

Figura. 07 Helicóptero Ronbinson 22 utilizado no levantamento do presente trabalho.....18

Figura. 08 Furo na fuselagem atrás do acento do piloto para a colocação da câmera e da plataforma com os sensores.....18

Figura. 09 Preparação da Plataforma interna para fixação dos sensores. 19

Figura. 10 Preparação da Plataforma interna para fixação dos sensores. 19

Figura. 11 Foto tomada por baixo da fuselagem mostrando a lente da câmera. ...20

Figura. 12 Imagem com a posição da antena GNSS na parte externa da aeronave. 21

Figura. 13 Constelação NavStar GPS. Fonte: IGS 22

Figura. 14 RBMC: Estações da Rede Brasileira de Monitoramento Continuo. Fonte: IBGE 24

Figura. 15 Modelo Monografia Estação RBMC. Fonte IBGE... 25

Figura. 16 Esquema de Posicionamento Método Diferencial. 33

Figura. 17 Primeiro geóide gerado a partir de dados GOCE – 2010 (imagem: ESA) 35

Figura. 18 Modelo Ondulação Geoidal Brasil MAPGEO10 (Imagem: IBGE). 37

Figura. 19 Distância do centro de fase da antena GNSS até o centro de gravidade do inercial. 41

Figura. 20 Centro Perspectivo/Centro de fase da antena. 42

Figura. 21 Sistema de navegação 2D. 45

Figura. 22 Acelerômetro. 48

Figura. 23 Eixos de orientação do vôo... 50

Figura. 24 Sistema dextrógiro. 52

Figura. 25 Imagens Orientadas Geometricamente por Correlação. 58

Figura. 26 Esquema para o Cálculo Altitude Ortométrica.. 59

Figura. 27 Distribuição dos pontos gravimétricos. (Fonte: www.ibge.gov.br). 61

Figura. 28 Posição para medição da coordenada da torre de transmissão.. 63

Figura. 29 Formato e tensões das torres de transmissão. 64

Figura. 30 Subestação de São José do Rio Preto/SP, com coordenada definida no centro das instalações. 65

Figura. 31 Sistema de Informação Geográfica, mostrando uma planta produzida a partir da ortofoto 66

Figura. 32 Torre em detalhe com projeção ortoretificada. A sombra da torre permite determinar seu tipo 67

Figura. 33 Ortofoto carta. 68

Figura. 34 Câmera, Receptor e IMU, montados sobre a plataforma fixa. 69

Figura. 35 Tomada aérea.. 70

Figura. 36 PAF- Ponto de Apoio Fotogramétrico em estrutura antrópica, considerado *natural*, por não exigir pré-sinalização em campo.. 71

Figura. 37 PAF- Ponto de Apoio Fotogramétrico *Natural*.. 72

Figura. 38 PAF- Ponto de Apoio Fotogramétrico Artificial – Pré Sinalizado.. 72

Figura. 39 PAF- Ponto de Apoio Fotogramétrico.. 73

Figura. 40 Monografia de Ponto de Apoio Fotogramétrico Natural.. 74

Figura. 41 Deslocamento da aeronave – Software InertialExplorer. Elaborado pelo autor.. 77

Figura. 42 Resultado fechamento aerotriangulação..... 79

Figura. 43 Bragança Paulista – SP – Local do experimento. (Fonte: www.ibge.gov.br)..... 85

Figura. 44 Campo de Prova - Bragança Paulista - SP. (Fonte: GoogleEarth)..... 86

Figura. 45 Esquema de etapas da metodologia desenvolvida. Elaborado por: Émerson Diniz. 87

Figura. 45 Relatório final de ambos processamentos. Elaborado por: Émerson Diniz..... 87

Lista de Gráficos

Gráfico. 01 Variação dos desvios padrão obtidos no processamento PPP estático L1&L2 numa sessão de 24 horas. (fonte: www.ibge.gov) 29

Gráfico. 02 Variação dos desvios padrão obtidos no processamento PPP estático em C1&L1 numa sessão de 24 horas. (fonte: www.ibge.gov) 29

Gráfico. 03 Precisão horizontal (linha vermelha) e vertical (linha verde) de um levantamento obtidas no processamento PPP realizado na opção cinemático em L1&L2. (fonte: www.ibge.gov) 30

Gráfico. 04 Precisão horizontal (linha vermelha) e vertical (linha verde) de um levantamento PPP obtidas no processamento realizado na opção cinemático em C1&L1. (fonte: www.ibge.gov) 31

Lista de Tabelas

Tabela 01 - Algumas câmeras disponíveis atualmente no mercado 09

Tabela 02 - Câmeras de pequeno formato. Fonte: Sony Corporation, Hasselblad Bron Inc. e Nikon Corporation..... 10

Tabela 03 - Disponibilidade dos produtos IGS. Fonte: http://www.igs.org/components/prod.html 28

Tabela 04 - Distância focal, ponto principal, calibrados e correção do Boresight...40

Tabela 05 - Pontos de apoio fotogramétrico 75

Tabela 06 - Resultado do processamento da IMU. 78

Tabela 07 - Parâmetros para controle de qualidade geométrica..... 83

Tabela 08 - Padrão de exatidão cartográfica da planimétrica dos produtos cartográficos digitais 84

Tabela 09 - Padrão de exatidão cartográfica da altimétrica dos pontos cotados e do MDT, MDE e MDS 84

Tabela 10 - Padrão de exatidão cartográfica da altimetria (curvas de nível) dos produtos cartográficos digitais 84

Tabela 11 - Parâmetros para controle de qualidade geométrica 85

Tabela 12 - Relatório final de ambos processamentos..... 90

Tabela 13 - Desvios nas componentes E, N e H - experimento 01..... 92

Tabela 14 - Análise estatística planimétrica/altimétrica - experimento 01 92

Tabela 15 - Padrão do PEC e EP planimétrica - experimento 01 93

Tabela 16 - Classificação do produto planimétrico - experimento 01..... 93

Tabela 17 - Classificação do produto altimétrico - experimento 01..... 94

Tabela 18 - Teste de tendência planimétrico - experimento 01 95

Tabela 19 - Teste de Qui-quadrado planimétrico - experimento 01..... 95

Tabela 20 - Teste de tendência altiimétrico - experimento 01 95

Tabela 21 - Teste de Qui-quadrado altimétrico - experimento 01.....95

Tabela 22 - Desvios nas componentes E, N e H - experimento 02.....96

Tabela 23 - Análise estatística nas componentes E, N e H - experimento 02.....97

Tabela 24 - Classificação do produto planimétrico - experimento 02.....97

Tabela 25 - Classificação do produto altimétrico - experimento 02.....97

Tabela 26 - Teste de tendência planimétrico - experimento 02.....97

Tabela 27 - Teste de Qui-quadrado planimétrico - experimento 02.....98

Tabela 28 - Teste de tendência altimétrico - experimento 02.....98

Tabela 29 - Teste de Qui-quadrado altimétrico - experimento 02.....98

Tabela 30 - Desvios nas componente E, N e H - experimento 03.....99

Tabela 31 - Análise estatística nas componentes E, N e H - experimento 03.....99

Tabela 32 - Classificação do produto planimétrico - experimento 03.....100

Tabela 33 - Classificação do produto altimétrico - experimento 03 100

Tabela 34 - Teste de tendência planimétrico - experimento 03.....100

Tabela 35 - Teste de Qui-quadrado planimétrico - experimento 03.....100

Tabela 36 - Teste de tendência altimétrico - experimento 03.....100

Tabela 37 - Teste de Qui-quadrado altimétrico - experimento 03.....101

Tabela 38 - Desvios nas componente E, N e H - experimento 04.....101

Tabela 39 - Análise estatística nas componentes E e N - experimento 04 102

Tabela 40 - Classificação do produto planimétrico - experimento 04.....102

Tabela 41 - Classificação do produto altimétrico - experimento 04.....102

Tabela 42 - Teste de tendência planimétrico - experimento 04.....102

Tabela 43 - Teste de Qui-quadrado planimétrico - experimento 04.....102

Tabela 44 - Teste de tendência altimétrico - experimento 04.....102

Tabela 45 - Teste de Qui-quadrado altimétrico - experimento 04.....103

Lista de Siglas

1.1 INS – Sistema Inercial 01

1.2 PPP – Posicionamento por Ponto Preciso 01

1.3 GNSS – Global Navigation Satellite System 08

1.4 GPS – Global Navigation Satellite System 01

1.5 SAAPI – Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-Processamento de Imagens Digitais 04

1.6 IMU – Inertial Measurement Unit 08

1.7 CCD – Charge Coupled Device 09

1.8 RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Continuo 01

1.9 IGS – International GNSS Service 22

CAPÍTULO 01

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Os produtos advindos do processo aerofotogramétrico são uma importante ferramenta na tomada de decisões em diversas áreas. Por outro lado, a crescente demanda de projetos, tem levado à busca de meios mais rápidos, econômicos e eficientes para obter dados para esses projetos, entre eles produtos de sensores aerotransportados.

Com periodicidade crescente surgem novos equipamentos e, em paralelo aos tradicionais, surgem produtos cartográficos alternativos que combinam novas tecnologias para reduzir os custos. Cabe sempre aos profissionais da área verificar se esses produtos atendem aos requisitos de qualidade para determinadas aplicações.

O presente estudo analisa e avalia um produto aerofotogramétrico alternativo resultado de uma particular integração de uma aeronave (helicóptero) com uma câmara digital não métrica de pequeno formato e a técnica de Posicionamento Preciso com o uso do GPS integrado a um sistema inercial (INS), o que dispensaria o apoio de campo, para a produção de ortofotos e mapas, em áreas específicas, obtendo precisão posicional adequada para uma série de aplicações, sendo que a precisão obtida faz parte da pesquisa. Foram estudadas e testadas outras alternativas a essa metodologia de processamento (PPP), que incluem o uso de uma Estação da RBMC e/ou pontos de apoio de campo.

Para testar e comprovar a qualidade e a real utilidade dos produtos gerados foi feita uma verificação no que diz respeito à qualidade visual das imagens verificando se, ocorrem ou não arrastamentos, distorções e outras anomalias causadas por fatores de processamento, e também, de acordo com a norma brasileira Decreto Nº 89.817 de 20 de junho de 1984, uma verificação da precisão geométrica, para

garantir a possibilidade do uso desse produto cartográfico nas atividades para as quais foi pensado e mais se adequa, principalmente nas fases preliminares de projetos de engenharia como licenciamentos ambientais, estudos hidrográficos e hidrológicos, cadastro urbano, agricultura de precisão e obras lineares como rodovias, gasodutos e linhas de transmissão.

A presente proposta baseia-se, assim, no uso de aeronaves menos dispendiosas e de câmeras não métricas, mas de boa qualidade, com preços bem mais acessíveis quando comparados com os da aerofotogrametria tradicional, em segmentos e aplicações específicas.

Há muitos casos da prática profissional em que, comparado com a aerofotogrametria tradicional, há menores exigências em termos de precisão e, dessa forma, nessas aplicações, pode ser utilizada a alternativa proposta, que atende bem às necessidades do usuário. Exemplos disso são: estudos de impactos ambientais, manejo de floresta de eucaliptos, mapeamentos de culturas temporárias como cana de açúcar, e outros estudos de obras lineares em que se utiliza uma escala típica de trabalho de 1:5.000. No presente trabalho almeja-se um produto que seja uma ortofoto com precisão compatível com a escala 1:2.000, PEC classe A.

A questão a ser estudada e respondida é se essa solução com sensores não métricos, a custos menores, pode ser empregada como uma solução alternativa ao uso das câmaras aerofotogramétricas. Para isso será empregado uma metodologia de controle e análise, a ser apresentada durante o presente trabalho, visando um controle de qualidade do produto, verificando até que ponto as necessidades do usuário são atendidas em termos de identificação e visibilidade de detalhes e atendimento do PEC (precisão geométrica). Em outras palavras procura-se avaliar e apontar as potencialidades e limitações do produto e fornecer parâmetros de decisão para o usuário.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral o estudo, o desenvolvimento de uma metodologia de produção e controle de qualidade de um produto cartográfico não convencional gerado a partir de uma câmera não métrica de pequeno formato associada a um sistema inercial e a um método de posicionamento GPS. O objetivo específico é descrever a metodologia desenvolvida para a geração desses produtos avaliando a qualidade visual e informativa do produto, através da apresentação comentada de algumas imagens e, através de alguns testes clássicos, como a precisão geométrica do mesmo.

Serão testadas 4 alternativas de processamento de dados: Experimento 01 – PPP, sem apoio terrestre, Experimento 02 – PPP com a utilização adicional de apoio terrestre, Experimento 03 – RBMC como apoio e Experimento 04 – RBMC e outros apoios terrestres.

Em concreto, a parte prática procurará mostrar a possibilidade de produzir uma ortofotocarta na escala 1:2.000 atendendo aos requisitos dessa escala. O controle de qualidade será feito através da comparação com pontos de controle levantados em campo.

Atendendo a esses requisitos, o produto poderá ser utilizado em diversas aplicações como cadastro rural, estudos ambientais, acompanhamento de acidentes ambientais, estudo de culturas agrícolas, levantamento de torres de transmissão ou estudos de traçados de gasodutos e rodovias no Brasil.

CAPÍTULO 02

SENSORES AEROTRANSPORTADOS E SUA INTEGRAÇÃO

2.1 ESTUDOS E PERSPECTIVAS

Estudos sobre câmeras de pequeno formato já foram realizados, como mostram diversos trabalhos acadêmicos. Por exemplo, no Brasil, Tommaselli at al (2008), analisaram a fototriangulação com parâmetros adicionais para o ajustamento em blocos de imagens coletadas com o que denominaram Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-Processamento de Imagens Digitais (SAAPI). Esse trabalho foi resultado de uma parceria da empresa Engemap com o Departamento de Cartografia da UNESP – Presidente Prudente/SP. O SAAPI é um sistema integrado de câmaras digitais profissionais especialmente adaptadas, sensores de posicionamento e navegação, e dispositivos eletrônicos especializados e softwares para aplicações em aerofotogrametria, em que, após uma verificação da acurácia dos pontos do mapeamento produzido e o estudo do comportamento dos parâmetros de ajuste, os resultados mostraram-se satisfatórios, e atualmente o produto é comercializado pela empresa.

Ainda sobre câmaras de pequeno formato, outro estudo foi realizado por Mitishita et al (2010), realizando uma análise do uso combinado de parâmetros da calibração convencional e da calibração em serviço na aerotriangulação, em aerofotos obtidas com esse tipo de câmera. Os resultados mostraram que a utilização de certos parâmetros melhoram os resultados planialtimétricos da aerotriangulação e que o produto final é útil e preciso.

Barbosa (1999) mostrou que é possível a obtenção de um modelo digital de terreno utilizando câmaras digitais de pequeno formato através da técnica de aproximações sucessivas, sendo possível utilizá-la comercialmente mediante alguns aprimoramentos como a otimização através de software desenvolvido pelo autor. Para isso realizou experimentos na metodologia de interpolação a ser adotada, a partir de um par de fotos digitais com superposição aproximada de 60% e

conhecidos os elementos de orientação exterior das imagens e os pontos de Gruber. Para que uma imagem esteja orientada exteriormente é necessário conhecer os seis parâmetros de orientação exterior para a mesma, sendo estes as coordenadas no espaço-objeto do centro de perspectiva e ângulos de rotação ou de atitude do sensor. Já os pontos de Gruber, são seis (06) pontos críticos no modelo aerofotogramétrico que permitem a reconstrução espacial de um ponto-objeto em função das projeções dos respectivos pontos-imagens no plano da fotografia WOLF(1983).

A estratégia de aproximação utilizou uma Resseção Espacial Dupla de um par de fotos digitais. É feita uma interpolação linear nos quadriláteros formados pelos pontos de referência (sinalizados). Com os pontos interpolados determinam-se as fotocoordenadas nas imagens da esquerda e da direita. Tomando-se as fotocoordenadas da esquerda como referência, buscou-se uma melhor localização das fotocoordenadas da direita. Com as fotocoordenadas refinadas pela correspondência, é realizada a Intersecção para melhorar a interpolação. Com este novo conjunto de pontos, é realizado um reajustamento da Resseção Dupla. Em seguida, o processo se repete, interpolando-se novos pontos nos quadriláteros formados pelos pontos interpolados no passo anterior, até atingir uma densidade definida. Os resultados mostraram que o tamanho da janela de referência e de busca influenciam tanto na parte interna (estatística) quanto na externa (erro médio com relação ao modelo de referência) e em um dos experimentos realizados, esse erro foi de 0,0014m. A metodologia mostrou-se funcional e futuros trabalhos podem contribuir para melhorar a acurácia.

Outro trabalho, realizado por Martins (2010) focaliza a produção da ortofoto, utilizando um modelo altimétrico obtido através de uma nuvem de pontos gerada pelo Sistema Laser Scanner Aerotransportado. As ortofotos produzidas na escala 1:2.000 atenderam às expectativas quando se utilizam pontos de apoio obtidos do levantamento LIDAR. Entretanto, sem os pontos de apoio, o produto possui a exatidão suficiente somente na escala 1:5.000.

Por sua vez, Ramos et al (2008), descreve um levantamento realizado com a utilização de um helicóptero das Ilhas Trindade e Martim Vaz, arquipélago brasileiro localizado no Oceano Atlântico, sendo seu território pertencente ao Município de Vitória-ES. O trabalho atendeu às especificações internacionais para a representação cartográfica náutica do contorno da ilha, e segundo descrevem os autores, mostrou-se de relevância estratégica, dando à Marinha do Brasil agilidade e independência para a realização do levantamento náutico de todo o território nacional, inclusive de regiões de difícil acesso como outras ilhas oceânicas e as bacias Amazônica e Pantaneira, sendo este composto por cartas e/ou as listas dos pontos que definem as coordenadas das Linhas de Base Normais (LBN) ou Retas (LBR). Estas linhas são as referências para o estabelecimento do Mar Territorial (limite de 12 milhas náuticas), da Zona Contígua (limite de 24 milhas náuticas), da Zona Econômica Exclusiva (limite de 200 milhas náuticas) e da Plataforma Continental, e são obtidas graficamente a partir de cartas náuticas. As cartas referentes às ilhas oceânicas tiveram seus contornos definidos a partir de antigas restituições aerofotogramétricas e estão referenciadas a Sistemas Geodésicos de Referência Locais. Este trabalho verificou a possibilidade de utilização da fotogrametria digital, usando imagens coletadas com câmaras digitais de médio formato instaladas a bordo de helicópteros, para o processo de atualização de cartas náuticas no entorno das Ilhas Trindade e Martim Vaz (Figura 01).

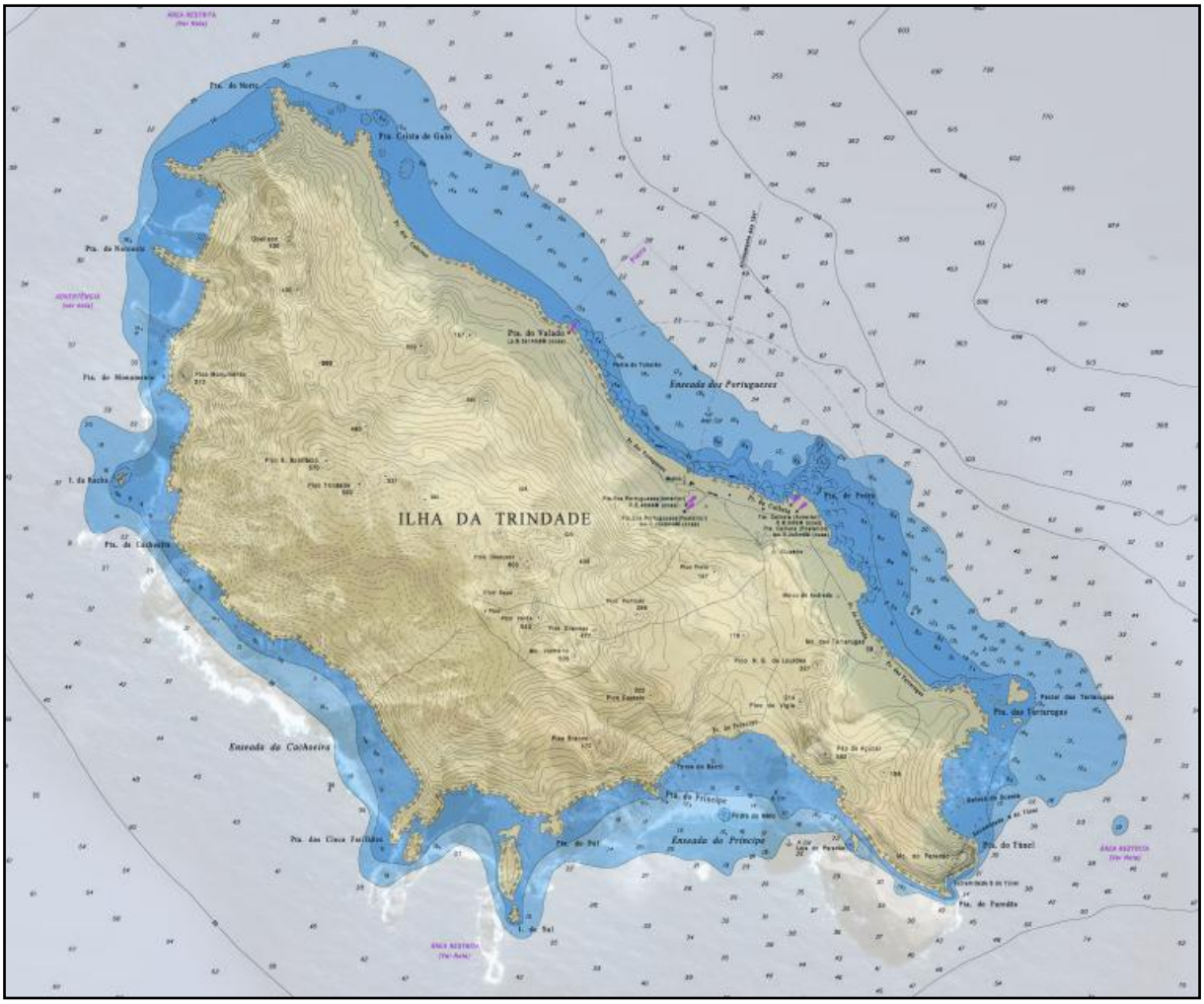


Figura 01 – Ilha da Trindade, em cujo levantamento se utilizou câmera de médio formato a bordo de helicóptero – Fonte: Ramos et al (2008).

Mais recentemente, Lima (2016) realizou um estudo com a finalidade de avaliar a acurácia/exatidão posicional de ortofotos digitais e modelos digitais do terreno, obtidos com câmera aérea fotogramétrica digital de grande formato, auxiliada por um sistema de medida inercial. O objetivo central foi avaliar a acurácia posicional dos produtos gerados sem pontos de controle terrestre. Para tal foi executado voo fotogramétrico com câmera digital de grande formato e foram avaliadas três situações distintas. Na primeira situação a execução de ortofoto e modelo digital de terreno sem a utilização de correlação de imagens e pontos de controle, na segunda foram gerados os mesmos produtos sem a utilização de pontos de controle, porém com a utilização de correlação de imagens, e na última situação executou-se um processo de aerotriangulação com a utilização de pontos de controle. Para a realização da verificação da qualidade posicional foi realizada a medição das

coordenadas de controle por GNSS levando em consideração o Padrão de Exatidão Cartográfica.

No entanto, nenhum desses trabalhos propõe um esquema como o sugerido e implementado no presente trabalho: a utilização de uma câmera não métrica de pequeno formato, a bordo de helicóptero e que, como uma das opções, dispensasse o apoio de campo.

Nos demais itens deste capítulo, apresentam-se de forma sucinta, os diversos componentes do sistema: câmara não métrica, aeronave, GNSS e IMU, tecnologias para o levantamento proposto.

2.2 CÂMERAS NÃO MÉTRICAS

Os avanços tecnológicos de sensores de imagens digitais aerotransportados e a integração de diferentes tecnologias estão possibilitando a automação dos processos na área da aerofotogrametria tornando-os mais rápidos, precisos e econômicos.

A indústria tem lançado novos equipamentos como câmaras aéreas mais compactas e com maior resolução. A tabela 01 resume os dados de algumas câmaras disponíveis. Nela foram incluídas as câmeras digitais de médio e de grande formato não usadas no presente trabalho, mas que são úteis para ter uma panorâmica do mercado. Em outra tabela serão apresentadas as câmaras de pequeno formato.

Tabela 01 - Algumas câmeras disponíveis atualmente no mercado (2016).

GRANDE FORMATO - CÂMERA DE QUADRO						
CAMERA MARCA TIPO	FABRICANTE	RESOLUÇÃO microns	QUADRO FOCAL (L) pixel	QUADRO FOCAL (C) pixel	QUADRO FOCAL (L) mm	QUADRO FOCAL (C) mm
DMC - ZI	INTERGRAPH Z/I	12.00	13824	7680	165.89	92.16
ULTRACAM - X	VEXCEL	7.20	14450	9420	104.04	67.82
ULTRACAM - D	VEXCEL	9.00	11500	7500	103.50	67.50
DIMAC	DIMAC SYSTEMS	6.80	10500	7200	71.40	48.96
GRANDE FORMATO - CÂMERA LINEAR						
CAMERA MARCA TIPO	FABRICANTE	RESOLUÇÃO micron	QUADRO FOCAL (L) - pixel	QUADRO FOCAL (C) pixel	QUADRO FOCAL (L) - mm	QUADRO FOCAL (C) mm
HRSC	DLR	6.50	12000	-	78.00	-
ADS-40	LEICA	6.50	12000	-	78.00	-
JAS 150	JENA AIRBONE	6.50	11500	-	74.75	-
3-DAS-1	WEHRLI ASSOCIATES	9.00	8002	-	72.02	-
MÉDIO FORMATO - CÂMERA DE QUADRO						
CAMERA MARCA TIPO	FABRICANTE	RESOLUÇÃO micron	QUADRO FOCAL (L) - pixel	QUADRO FOCAL (C) pixel	QUADRO FOCAL (L) - mm	QUADRO FOCAL (C) mm
DSS	APLANIX	9.00	5436	4092	48.92	36.83
DSS	APLANIX	6.80	7216	5412	49.07	36.80
DIGICAM	IGI	9.00	5440	4080	48.96	36.72
DIGICAM	IGI	6.80	7216	5428	49.07	36.91
AIC	ROLLEI	9.00	5440	4080	48.96	36.72
AIC	ROLLEI	6.80	7228	5428	49.15	36.91
AIC - DUPLA	ROLLEI	6.80	13000	5428	88.40	36.91

A primeira coluna da tabela 01 indica a marca e o tipo da câmera, e a segunda, o fabricante. A terceira indica a resolução da imagem de cada equipamento em mícrons, ou seja, o tamanho do pixel. Este multiplicado pela escala de vôo fornece o tamanho do pixel/resolução no terreno. A escala de voo ou da foto, como se sabe, é obtida pela relação f/H onde f é a distância focal e H é a altura do vôo. A distância focal f por sua vez, no caso de equipamentos digitais é a distância, geralmente fornecidas em milímetros, entre o ponto de convergência da luz até o plano do sensor CCD (Charge Coupled Device) onde a imagem é focalizada e projetada. O dispositivo eletrônico conhecido como CCD é um sensor capaz de captar a energia eletromagnética através da radiometria emitida por qualquer alvo e de transformar esse dado em informação digital.

Da quarta até a sétima coluna, são fornecidos dados sobre a câmera, em concreto, o número de Linhas (L) e colunas (C), tanto em pixels com em mm.

As câmeras lineares são aquelas que efetuam o levantamento por varredura linear com três sensores lineares com posicionamento de visada anterior, nadiral e posterior. Essa geometria garante a cobertura estereoscópica da superfície.

As câmeras de quadro (C) por sua vez lembram a clássica fotografia formada por um sensor CCD em disposição matricial, com as características físicas conhecidas através do mesmo principio de centro perspectivo da câmera convencional.

O termo “formato” usado na aerofotogrametria para definir tipos de sensores, refere-se ao tamanho dos elementos que compõem o equipamento em relação aos equipamentos tradicionais como, por exemplo, o tamanho do CCD. A tabela 02 resume os dados de algumas câmaras de pequeno formato disponíveis incluindo a HASSELBLAD usada no presente trabalho.

Como na tabela 01 a primeira coluna indica o tipo da câmera, a segunda o fabricante, a terceira a resolução de cada câmera indicando o tamanho do pixel. As colunas de 4 a 7 referem-se ao quadro focal de cada câmera em Linhas (L) e colunas (C), em pixels e mm.

Tabela 02 - Câmeras de pequeno formato (2016). Fonte: Sony Corporation, Hasselblad Bron Inc. e Nikon Corporation

PEQUENO FORMATO – CÂMERA DE QUADRO						
CÂMERA MARCA TIPO	FABRICANTE	RESOLUÇÃO microns	QUADRO FOCAL (L) pixel	QUADRO FOCAL (C) pixel	QUADRO FOCAL (L) -mm	QUADRO FOCAL (C) -mm
NX7	SONY	3.89	6041	4010	23.5	15.6
H4D-31	HASSELBLAD	6.80	6496	4872	44.2	33.1
DSLR D5100	NIKON	4.70	4928	3264	23.1	15.3

Em particular a Hasselblad H4D-31 usada no presente trabalho estabelece um novo padrão para a fotografia de pequeno formato para fins aerofotogramétricos, pois é um sensor com boa resolução e armazenamento de 31 megapixels, sendo um dos melhores sensores digitais disponíveis no momento da realização da pesquisa (2016). Com um CCD medindo 44,2x33,1 milímetros, possui um tamanho físico quase duas vezes maior que o sensor NIKON DSLR D5100. Mesmo possuindo uma

resolução menor, o fato de possuir quadro focal maior proporciona um maior recobrimento durante a captura da imagem e que levou pela escolha da mesma para a pesquisa.

Outra caracteristica do sensor HasselBlad é a quantidade de pixels por polegada, proporcionando uma alta qualidade de imagem, suavizando o efeito de arrasto de imagem no momento da tomada, o que a caracteriza como uma câmera de alto desempenho fornecendo a qualidade necessária para processos fotogramétricos.

Essa camêra apresenta um custo bem menor em relação às métricas digitais de levantamento aéreo tradicional. A figura 02 a seguir faz uma breve comparação de valores:

VALOR CÂMERAS

DMC – ZI: 300.000,00 $US

H4D-31: 6.500,00 $US

SONY NX7: 450,00$US

NIKON DSLR D5100: 350,00 $US

Figura 02 - Hasselblad H4D-31, DMC-Z, Sony NX7 e Nikon DSLR . Fonte: Intergraph, Sony , Nikon e Hasselblad.

O equipamento HASSELBLAD segundo fabricante, possui uma arquitetura de captura de alta velocidade com imagens comprimidas de 40Mbytes a uma taxa de 1,2 segundos por foto armazenada na própria máquina, ou aproxidamente 4,0 segundos quando conectado a um computador. Esse tempo deve ser considerado no planejamento de vôo, em concreto no cálculo de velocidade da aeronave, que se

reflete na distância entre tomadas consecutivas, para que se garanta que o tempo de percursso seja menor ou igual a esse limite. Esse tempo é necessário para a operação de descarregar a imagem no computador e sabe-se que os fabricantes estão procurando diminui-lo, já que pode ser um fator limitante, em alguns casos.

Esse mesmo equipamento possui um alinhamento de lentes que inclui 11 tipos de composições automáticas, todas com obturadores centrais. Sua distância focal varia entre 28mm e 300mm (controlável), e seu conversor tem 1.7X a velocidade do obturador chegando a 1/800s de abertura. Essa característica melhora significativamente a qualidade da imagem e reduz arrastos por vibração da câmera.

Para ter uma sensibilidade para com o parâmetro de intervalo de tempo entre fotos pode-se imaginar o helicóptero deslocando-se a uma velocidade típica de aproximadamente 50m/s (180km/h) ou um avião deslocando-se numa velocidade também típica de 80m/s (288km/h), ter-se-á um deslocamento ou arraste (ΔS) terrestre durante a abertura do obturador calculada como a seguir:

$\Delta S = (1s/800) \times (50m/s) \rightarrow \Delta S = 0.06m$, situação com o uso de helicoptero;

$\Delta S = (1s/800) \times (80m/s) \rightarrow \Delta S = 0.10m$, situação com o uso de avião;

As características da H4D-31, com foco verdadeiro APL – Lock Position Absolut (Processador de Posição Absoluta) ou foco automático, ajudam a obter fotos com maior qualidade visual, havendo um bom equilibrio entre contraste, brilho e cores, com boa distinção visual dos elementos. O processador APL registra com precisão o movimento do jogo de lentes durante o voo, e usa essas medições para calcular o ajuste do foco necessário e envia os comandos apropriados para o motor da lente de foco para que a mesma possa compensar as alterações de altitudes com relação ao solo.

O processador APL utiliza algoritmos que realizam as correções de foco em uma velocidade tal que não ocorra o atraso no disparo do obturador. Esse sistema

ajuda na captura das imagens focando não em multi pontos do quadro imagem, como ocorre em câmeras automáticas quando se está em movimento. Nas câmeras APL o jogo de lentes não fica se ajustando aos objetos conforme eles se movem na cena, mas basicamente direciona o foco ao centro da imagem, e depois recompõem a imagem como um todo dando nitidez perpendicular ao eixo da lente como esquematizado na Figura 03.

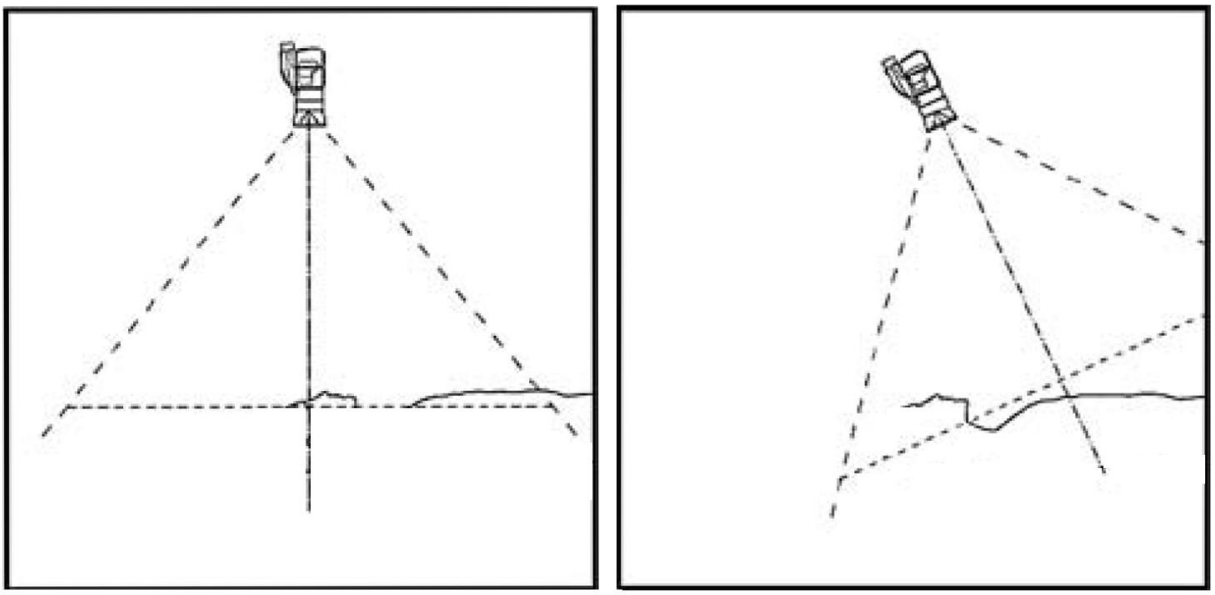


Figura 03 - APL Foco automático ao centro da imagem independente da angulação do sensor.

A câmera em questão possui bom desempenho em tomadas terrestres devido às suas características físicas, fornecendo imagens de alta resolução, estando entre as preferidas por profissionais do ramo fotográfico. A questão é analisar se essa qualidade se mantém em fotos aéreas para gerar produtos cartográficos, mantendo as características dos objetos no terreno, estando fixa à aeronave, com os cabos do disparador automático e alimentação de energia, sujeita a alterações de temperaturas, trepidações (elemento critico em helicóptero) e a uma alta taxa de disparos. O princípio de imageamento do sensor dessa câmera é baseado no conceito de aquisição de imagens que utiliza um CCD do tipo quadro, capaz de registrar imagens com alta resolução geométrica (31 megapixel), alta resolução radiométrica (12 bits) e com resolução espectral que cobre a faixa de domínio do visível (RGB).

A imagem digital é uma matriz regular constituída de (i) linhas e (j) colunas possuindo a origem (0,0) localizada no canto superior esquerdo da imagem e com sentido positivo para a direita e para baixo, respectivamente (Figura 04). A diferença entre uma imagem digital comum com essa imagem aérea digital está em que o sistema de coordenadas da fotogrametria clássica possui o ponto de origem no centro da imagem de um sistema ortogonal como também mostra a figura 04.

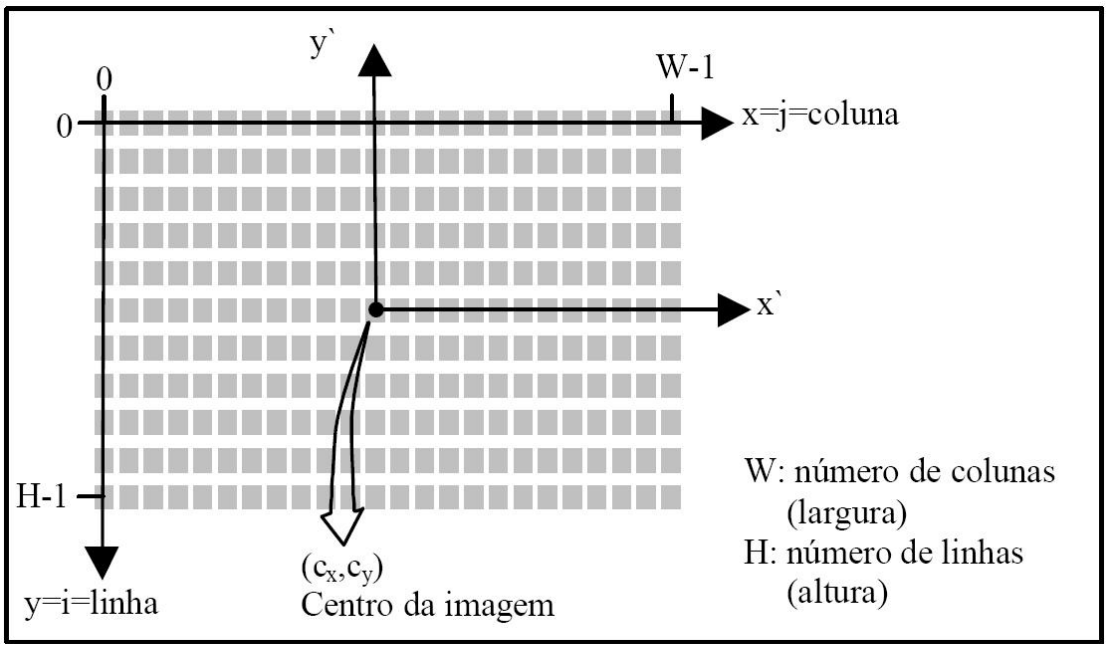


Figura 04 – Sistema de Coordenadas Digital TOMMASELLI (2004).

No entanto isso é algo já resolvido tecnicamente, pois em aerofotogrametria digital está bem estabelecido o processo que digitaliza imagens analógicas em escâner adquirindo dados nas coordenadas (x,y) do equipamento, algo semelhante ao sistema da câmera, (TOMMASELLI, A. M., 2004) e as transforma em coordenadas fotogramétricas x´e y´.

2.3 SISTEMA INERCIAL

Da mesma maneira que as câmeras, os sistemas inerciais vêm crescendo em precisão. A obtenção das coordenadas pelo sistema do presente trabalho requer o conhecimento dos parâmetros de orientação exterior do sensor de imageamento. Isso é possível graças ao sistema de navegação por satélites (GPS) que fornece a

posição do centro ótico de tomada da foto (x0, y0 e z0), integrado com o sistema inercial, que fornece os ângulos de Euler (φ, ω e κ).

A figura 05 esquematiza a obtenção desses dados e salienta que existe uma diferença ou desalinhamento entre o centro da antena GPS, o centro do sistema inercial (INS) e o centro perspectivo da câmera.

O GNSS/GPS integrado à Unidade de Medição Inercial (IMU) fornece dados da posição e velocidade do sensor, sendo que este último, como se disse, fornece os ângulos de Euler (ω, φ e K) representando as rotações sofridas pelo sistema local de coordenadas x, y e z (da câmara) em relação ao sistema global X, Y e Z.

A utilização desse sistema integrado fornece orientação às imagens, diminuindo significativamente a quantidade de pontos de apoio de campo em mapeamentos de média e grande escala, e que é praticamente eliminado em levantamentos de pequena escala.

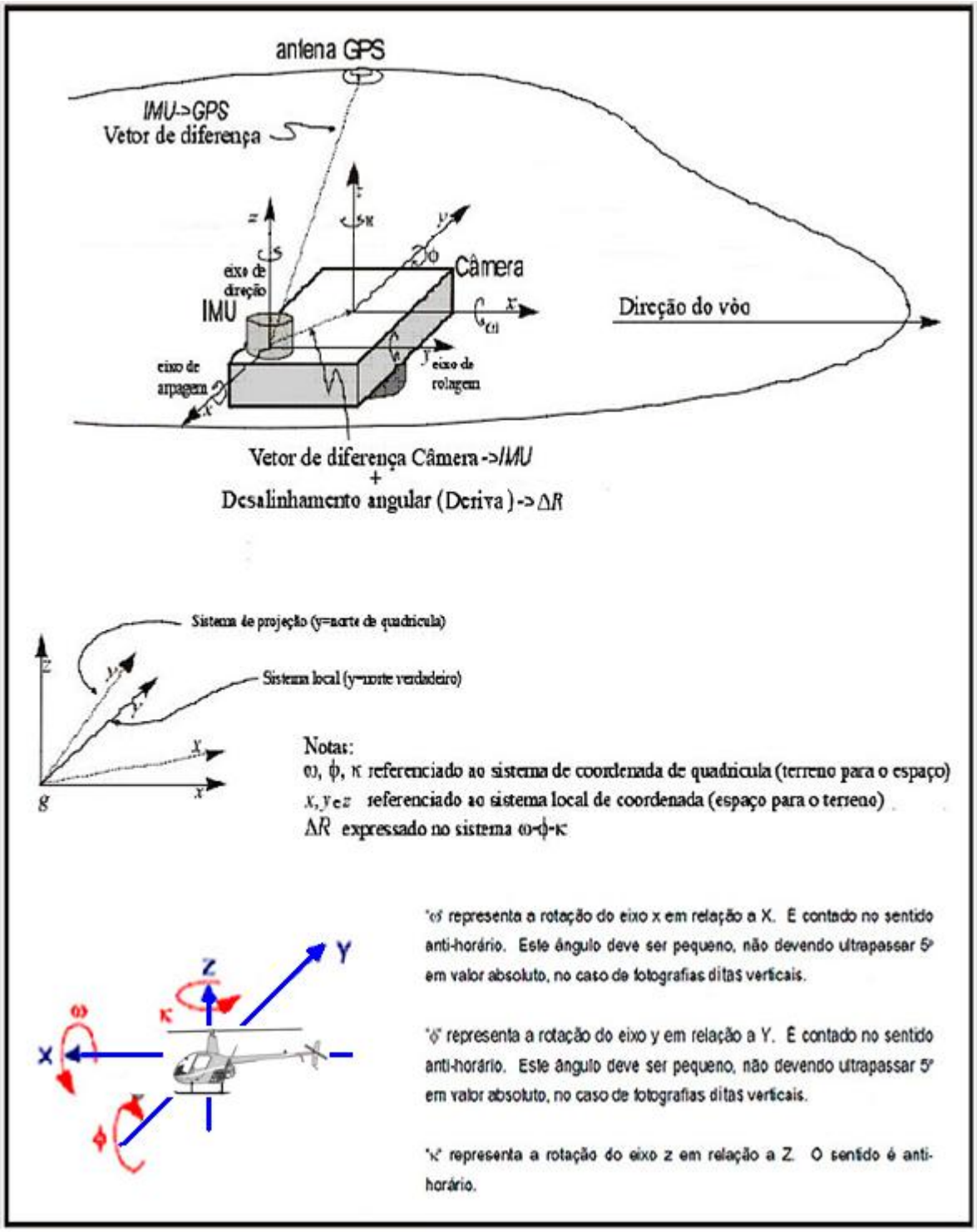


Figura 05 – Relação entre os Sistemas: Sensor, IMU e GNSS.Fonte: NovAtel Inc.

O equipamento Span FSAS INS Novatel (GNSS Solution INS + SPAN NovAtel) utilizado no presente trabalho fornece num só produto essas duas tecnologias complementares: o posicionamento GNSS e o sistema inercial de navegação (Figura 06).

Figura 06 – IMU, Antena GNSS e receptor. Fonte: NovAtel Inc.

A precisão do posicionamento GNSS associado à estabilidade do sistema de giroscópios e acelerômetros é responsável por fornecer uma solução de navegação 3D estável e contínua, mesmo naqueles períodos, em geral pequenos, em que os sinais GPS são bloqueados por algum motivo. O baixo nível de ruído e a estabilidade dos sensores tornam a IMU um complemento adequado para aplicações na aeronave, fornecendo posicionamento e navegação em momentos em que os satélites GNSS são insuficientes para manter uma boa qualidade de posicionamento.

2.4 AERONAVE

Para a execução do levantamento podem ser utilizadas pequenas aeronaves. Por exemplo, no estudo de caso do presente trabalho foi utilizado um helicóptero de pequeno porte com baixo custo de operação e boa estabilidade para a tomada de fotos aéreas. Trata-se de um Robinson 22 (Figura 07) de fabricação norte americana, da construtora Robinson Helicopter Company. Outros helicópteros semelhantes podem, é claro, ser utilizados.

Figura 07 - Helicóptero Ronbinson 22 utilizado no levantamento do presente trabalho.

A aeronave foi preparada de modo a receber o equipamento fotogramétrico, inercial e GNSS sem alteração aerodinâmica da mesma, sendo que nas Figuras de 8 a 11 se mostram detalhe dessa instalação, que o autor do presente trabalho acompanhou e ajudou a implementar. O primeiro passo foi a abertura de um furo na fuselagem para a instalação do equipamento (Figura 08).

Figura 08 – Furo na fuselagem atrás do acento do piloto para a colocação da câmera e da plataforma com os sensores.

Foi produzida uma plataforma interna (Figura 09) capaz de fixar todo o equipamento, com utilização de EVA (Espuma Vinílica Acetinada) em contato com a

fuselagem de modo a minimizar a vibração produzida pela trepidação das hélices em movimento, o que poderia prejudicar as imagens aéreas. As Figuras 10 e 11 mostram os passos seguintes e uma foto tomada do exterior.

Figura 09 – Preparação da Plataforma interna para fixação dos sensores.

Figura 10 – Preparação da Plataforma interna para fixação dos sensores.

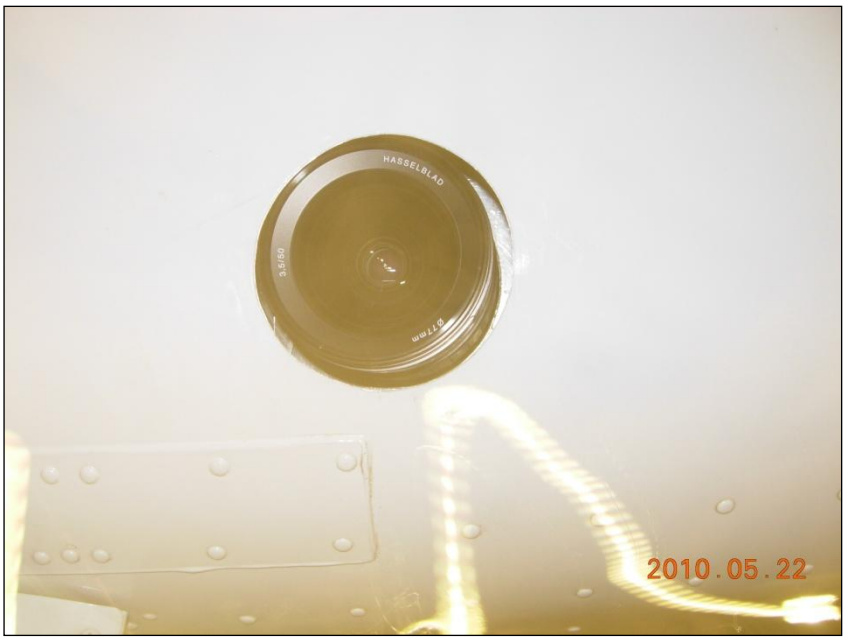


Figura 11 – Foto tomada por baixo da fuselagem mostrando a lente da câmera.

A vibração produzida é precisamente o ponto menos favorável quando comparado com uma aeronave de aerofotogrametria convencional. A análise da qualidade da foto/ortofoto em relação à sua precisão geométrica e a formação da imagem sem ruidos como manchas, arrastamentos ou deformações, é um indicativo do fato dessa vibração ter afetado ou não o produto final. Também por isso, torna-se necessária uma avaliação da precisão geométrica e da qualidade do produto.

Outra precaução tomada foi a colocação da antena GNSS na parte externa do helicóptero em um local com menor probabilidade de perda de sinal durante o voo. Foi feito um pequeno furo na fuselagem, e o cabo da antena colocado de maneira discreta por dentro da estrutura da aeronave até chegar à plataforma que foi montada (Figura 12).

Figura 12 – Imagem com a posição da antena GNSS na parte externa da aeronave.

As distâncias entre o centro de fase da antena e o centro perspectivo da câmera foram medidas manualmente (valores aproximados, utilizados como parâmetros no ajustamento), e após voo de calibração, essas distâncias foram calculadas e ajustadas.

2.5 GNSS (Global Navigation Satellite System)

O GNSS (Global Navigation Satellite System) é um sistema de satélites usado para determinar a posição geográfica do receptor (o centro de fase de sua antena) em qualquer lugar do mundo. Na prática, dois sistemas GNSS estão atualmente em operação: um dos Estados Unidos, o "Sistema de Posicionamento Global" (GPS) e outro da Rússia, o "Global Orbiting Navigation Satellite System" (GLONASS). Outros, como o europeu Galileo, vem funcionando parcialmente até a presente data (2016). A Figura 13 apresenta uma ilustração da constituição GPS.

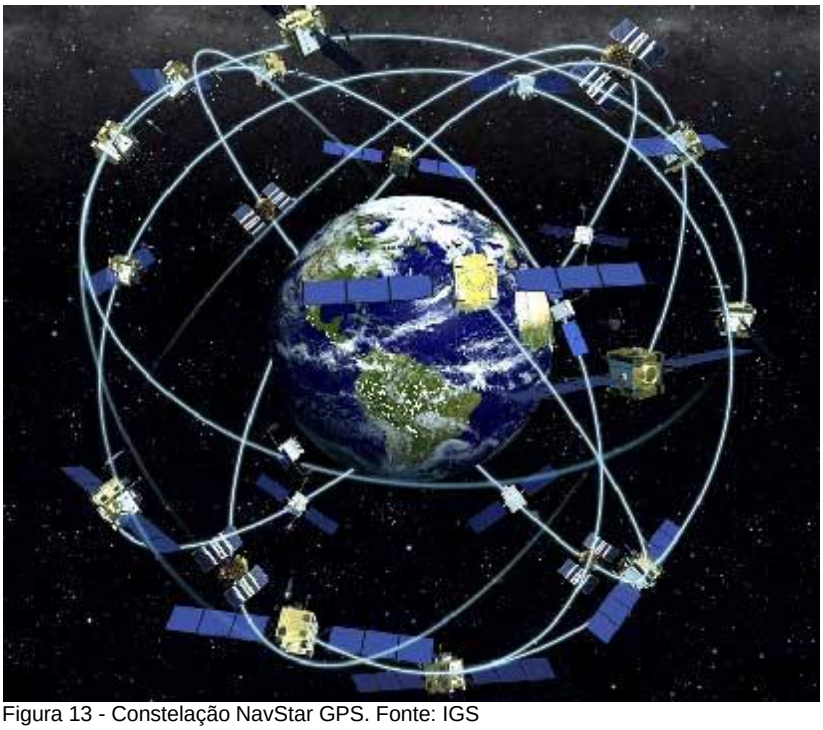


Figura 13 - Constelação NavStar GPS. Fonte: IGS

Cada um dos sistemas GNSS emprega uma constelação de satélites em órbita trabalhando em conjunto com uma rede de estações terrestres. Cada satélite transmite sinais codificados em intervalos precisos. O receptor converte as informações de sinal em posição, velocidade e estimativas de tempo. Usando essa informação, qualquer receptor sobre ou perto da superfície da terra pode ter sua posição calculada (a partir do tempo de atraso de transmissão) entre o satélite e o receptor. Para a realização do levantamento são necessários no mínimo quatro satélites visíveis permitindo determinar a posição do receptor, para calcular as 4 incógnitas (as coordenadas do receptor e o tempo do relógio).

Para maiores detalhes, veja-se no Monico (2008).

2.6 Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC)

A Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), como o próprio nome diz, é uma rede de receptores GNSS permanentemente ligada e captando sinais. Essa rede, em principio se suficientemente densa, dispensa um receptor base na área de interesse para apoiar o levantamento.

Assim, o transporte de coordenadas poderia ser feito através dessa rede, uma vez que todas as estações que fazem parte dela estão homologadas com suas coordenadas conhecidas e os dados das observáveis do GPS estão à disposição dos usuários (download a partir do site do IBGE). A rede tal como está atualmente (2016) pode ser vista na Figura 14.

Figura 14 – RBMC: Estações da Rede Brasileira de Monitoramento Continuo. Fonte: IBGE

Para usar os dados da RBMC é necessário que o usuário realize um cadastro no link: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/download

Os dados geralmente estão disponíveis no inicio do dia seguinte em que as observações foram feitas; mais precisamente, cada estação disponibiliza o arquivo do dia completo logo a seguir à meia noite. O solicitante deve informar a data desejada e o município de interesse. O site informa a disponibilidade dos dados, se estão ou não prontos para serem “baixados” e também fornece a monografia da estação e os dados no formato RINEX compactados. A Figura 15 mostra os dados básicos (monografia) de uma das Estações (POLI).

Diretoria de Geociências
Coordenação de Geodésia

RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
Relatório de Informação de Estação
Estação Politécnica - POLI

0. Formulário

Preparado por - Equipe Técnica da RBMC - “Centro de Controle Engª. Kátia Duarte Pereira”
Data - 01 – janeiro – 2007
Alteração - 01 – julho – 2010 / Atualização da Alt. Orto. (MAPGEO2010).

1. Identificação da estação GPS

Nome da Estação - Escola Politécnica da USP
Ident. da Estação - POLI
Inscrição no Monumento -
Código Internacional - 93800
Informações Adicionais -

2. Informação sobre localização

Cidade - São Paulo
Estado - São Paulo

Informações Adicionais - A estação consiste em uma torre metálica de aproximadamente 14 m de altura, situada ao lado do Prédio da AEP – Associação dos Engenheiros Politécnicos e do prédio administrativo da Escola Politécnica da USP denominado “Governador Mário Covas”.

3. Coordenadas oficiais

3.1) SIRGAS2000 (Época 2000,4)

Coordenadas Geodésicas			
Latitude:	23º 33' 20,3323" S	Sigma:	0,001 m
Longitude:	46º 43' 49,1232" W	Sigma:	0,001 m
Alt.Elip.:	730,62 m	Sigma:	0,004 m
Alt.Orto.:	733,63 m	Fonte:	GPS/ MAPGEO2010
Coordenadas Cartesianas			
X	4.010.099,503 m	Sigma:	0,003 m
Y	-4.259.927,302 m	Sigma:	0,003 m
Z	-2.533.538,799 m	Sigma:	0,002 m
Coordenadas Planas (UTM)			
UTM (N):	7.393.902,042 m		
UTM (E):	323.390,708 m		
MC:	- 45		

4. Informações do equipamento GPS

4.1 Receptor

4.1.1 Tipo do Receptor - Leica GRX1200 PRO
Número de Série - 450239
Versão do Firmware - 4.1
Data de Instalação - 12 – dezembro – 2006

1

Figura 15 - Modelo Monografia Estação RBMC. Fonte IBGE.

Nessa figura 15 podem ser vistas todas as informações relevantes da estação, separadas em 05 descrições:

0. Formulário: Descreve a equipe responsável, a data da elaboração do documento e as alterações realizadas.
1. Identificação da Estação GPS: Possui o nome da estação GPS e seu código internacional de identificação. Em alguns casos informa sobre a frequência da Antena (L1 frequência simples, ou dupla frequência L1 e L2). No caso, não está informada, mas sabe-se que é L1 e L2.
2. Informação sobre a localização: Informa ao usuário, a localização e detalhes físicos do local onde se encontra a antena GPS.
3. Coordenadas oficiais: Informa as coordenadas geodésicas, cartesianas e planas oficiais, com o Datum adotado, a época e as precisões das mesmas.
4. Informações do equipamento GPS: Nesse item consta o tipo e a marca do receptor utilizado na estação. Isso permite buscar a ficha técnica do equipamento, junto ao site do fabricante, contendo informações como a altura do centro de fase e o número de frequência.

Cada estação foi materializada com um dispositivo de centragem forçada desenvolvido especialmente pelo IBGE. Antes de qualquer levantamento é necessário verificar a monografia, como a da figura 15 e fazer uma análise para o tipo de posicionamento que se deseja realizar e se deve sempre considerar a distância entre a estação e o local de trabalho.

2.7 Posicionamento por Ponto Preciso

Quando se trata de posicionamento por GPS, o termo Posicionamento por Ponto Preciso (IBGE, 2009) refere-se à obtenção da posição de uma estação utilizando as observáveis da fase da onda portadora coletadas por receptores de duas frequências e em conjunto com os dados precisos pós processados do IGS. O resultado de um processamento PPP independe de qualquer ajustamento da rede geodésica e não está associado às realizações ou ajustamentos de rede planimétrica (não utiliza a RBMC nem qualquer outra), e sua precisão está ligada

diretamente as efemérides precisas dos satélites, e utiliza somente os dados de um receptor.

Quando se utilizam as observáveis pseudodistância ou fase da onda portadora, ou ambas, com receptores de simples ou dupla freqüência, associadas às efemérides precisas, está se empregando o método chamado PPP, estando o receptor em movimento ou fixo. A grande vantagem do processamento PPP é que, como se disse, não é necessária a existência de uma estação GNSS coletando dados simultaneamente. Para obter um bom posicionamento, utilizando a RBMC, é aconselhável não ultrapassar uma distância de cerca 30 km entre a estação escolhida e o local do levantamento. Devido à configuração atual da rede RBMC existente (densidade relativamente pequena das estações), a solução PPP é interessante, principalmente para as áreas distantes das estações da rede.

Segundo o Manual do Usuário “Posicionamento Por Ponto Preciso” do IBGE (2009), não existe um tempo mínimo de observação GNSS para fixar a posição. Entretanto, sabe-se que quanto menor o tempo de rastreio, pior será a precisão e a acurácia pelo PPP. A precisão está relacionada com a resolução das ambigüidades, que por sua vez está diretamente relacionada com o tempo de rastreio, qualidade do mesmo e tipo de equipamento. Para pequenos períodos de rastreio, as coordenadas são calculadas usando somente as observações da pseudo-distância (precisão métrica). Para arquivos de rastreio com períodos maiores, é possível resolver as ambigüidades usando as observações da fase da onda portadora, tornando-o um posicionamento com precisão centimétrica.

Via de regra, o processamento GNSS pelo PPP só é possível quando as órbitas e as correções de relógios GNSS estiverem disponíveis pelo IGS na Internet. São usados no processamento os produtos IGS mais precisos disponíveis no momento em que os dados forem submetidos ao PPP. A Tabela 03 mostra os tipos de órbitas e informações de relógios GPS que podem ser obtidos no IGS.

Tabela 03 – Disponibilidade dos Produtos IGS. Fonte: http://www.igs.org/components/prod.html

Período		Produto IGS		Latência		Intervalo da Solução Órbitas/Intervalo
De	**Para**	**Órbitas**	**Relógios / Formato**	**De**	**Atraso**	**Atualização**
13 Dias GPS anteriores até hoje	Hoje	Final	Final / CLK	Final do Dia GPS atual	13 dias	15 minutos
Início do Dia GPS atual	Final dos Dias GPS atuais	Rápida	Rápida / CLK	Final do Dia GPS atual	17 horas	15 minutos

Após o processamento dos dados GNSS utilizando o PPP, uma coordenada ou um conjunto delas são estimados, sendo o processamento no modo estático ou cinemático. Associado a cada uma dessas coordenadas, haverá uma precisão estimada. Essa precisão dependerá principalmente do tipo de observável utilizada (código ou fase), do modo de processamento (estático ou cinemático), e do tempo da sessão de observação no levantamento. Essa precisão fornece um indicativo da qualidade das coordenadas determinadas no processamento com o PPP. No caso do processamento estático os resultados apresentados nos gráficos 1 e 2 indicam a variação dos desvios padrões em latitude, longitude e altitude com relação ao tempo (Fonte: www.ibge.gov.br). Analisando o gráfico é possível notar que a precisão da Latitude (linha vermelha) com uma hora fica abaixo de 4 cm de precisão. Já a Longitude (linha verde) para atingir o mesmo resultado necessita aproximadamente de 2 horas de rastreio, e a Altitude (linha azul) para ficar abaixo dos mesmos 4 cm de precisão necessita de 3 horas de rastreamento.

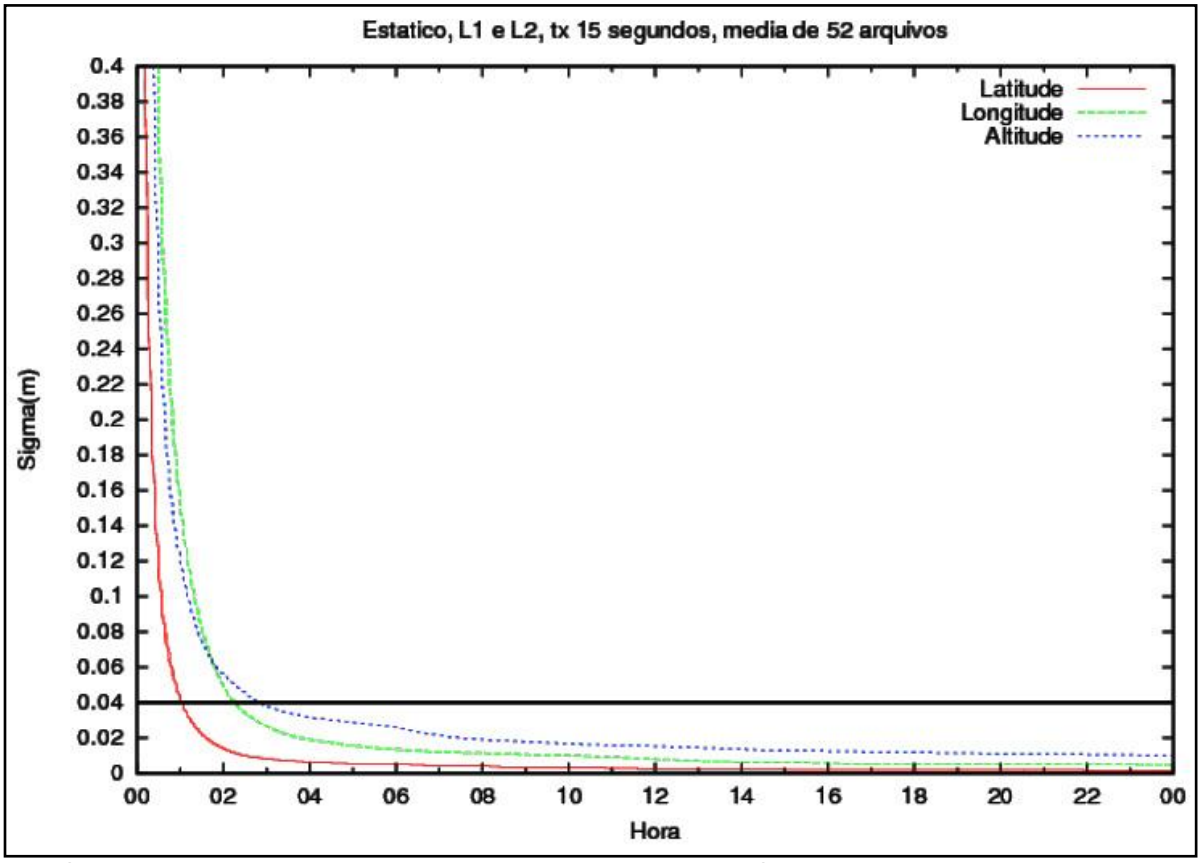


Gráfico1 – Variação dos desvios padrão obtidos no processamento PPP estático em L1&L2 numa sessão de 24 horas.

(fonte: www.ibge.gov)

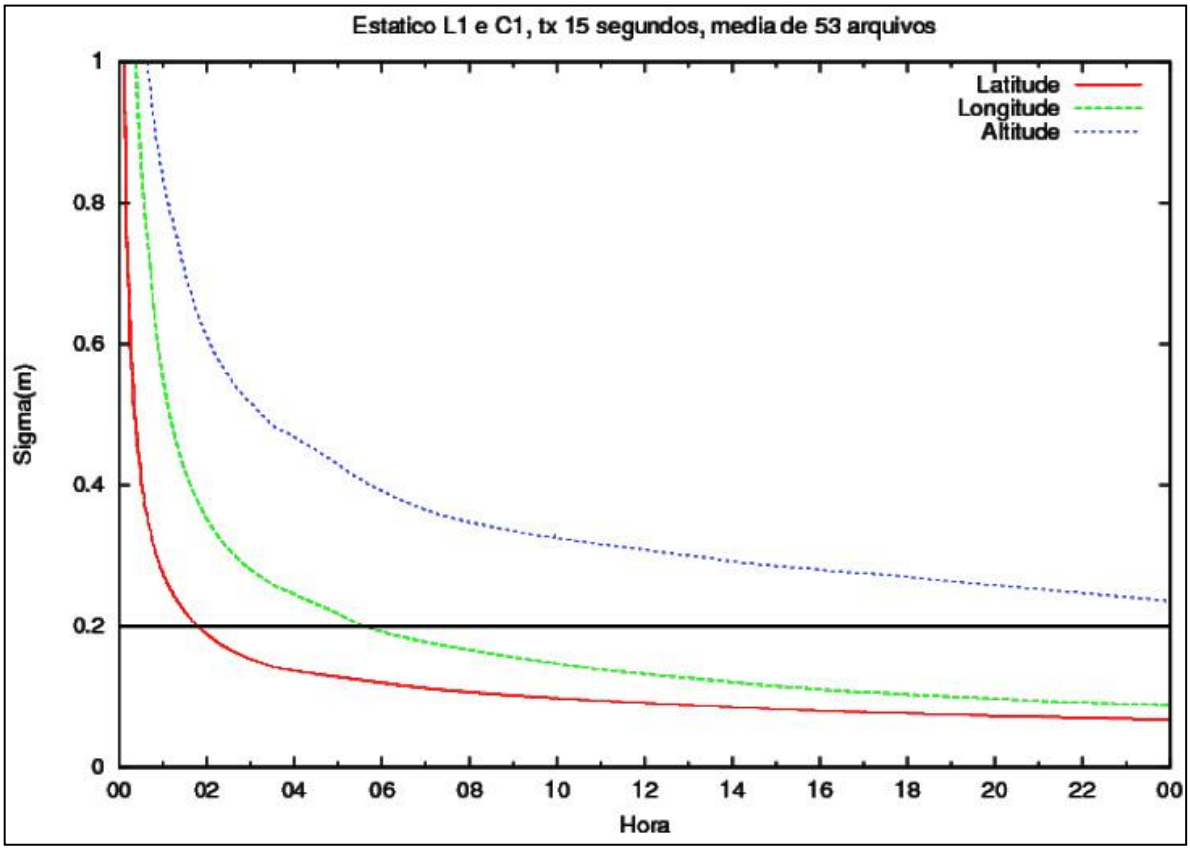


Gráfico2 – Variação dos desvios padrão obtidos no processamento PPP estático em C1&L1 numa sessão de 24 horas.

(fonte: www.ibge.gov)

O gráfico 2 é semelhante ao anterior, entretanto, em C1&L1 no mesmo intervalo de 24h. Os resultados mostram que a Latitude (linha vermelha) com 2 horas resulta numa precisão melhor que 20 cm . Já a Longitude (linha verde) precisa de aproximadamente de quase 6 horas de rastreio para atingir essa precisão, e a Altitude (linha azul) para alcançar esses 20 cm (se é que atinge) necessita de mais de 24 horas de rastreio, o que torna esse método não viável para levantamentos rápidos que desejam essa precisão. O gráfico permite outros estudos, como fixar uma precisão e verificar o tempo necessário para que seja atingida nas 3 coordenadas: por exemplo, para obter 60cm são necessárias 03 horas.

Os próximos gráficos apresentam as precisões obtidas em uma experiência usando a opção cinemática, que foi a utilizada no presente trabalho. A posição é estimada independentemente em cada época da observação, usando no primeiro caso uma observação GNSS de dupla-frequência e no segundo caso de apenas uma frequência. A solução da ambigüidade da fase da portadora é o fator principal que afeta o resultado da precisão dos gráficos.

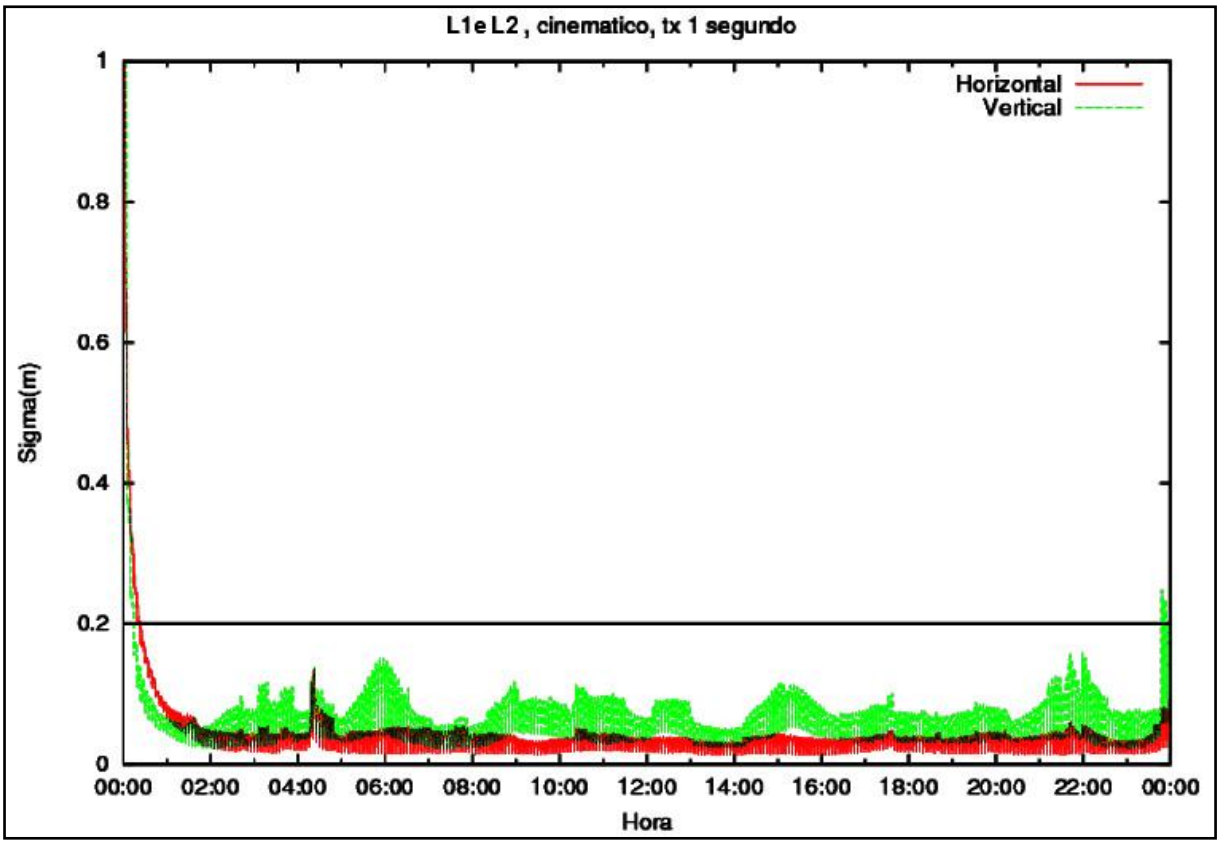


Gráfico3 – Precisão horizontal (linha vermelha) e vertical (linha verde) de um levantamento obtidas no processamento PPP realizado na opção cinemático em L1&L2. (fonte: www.ibge.gov)

No gráfico 3 os resultados mostram que a precisão do posicionamento horizontal (vermelho) com equipamentos de dupla frequência atingem em menos de 01 hora precisão abaixo de 20 cm (cerca de 10 cm).

O posicionamento vertical (verde) fica abaixo dos 20 cm aproximadamente ao mesmo tempo que o horizontal, sendo necessário também menos de 1 hora para obter dados com essa qualidade (por interpolação no gráfico, cerca de 20 minutos).

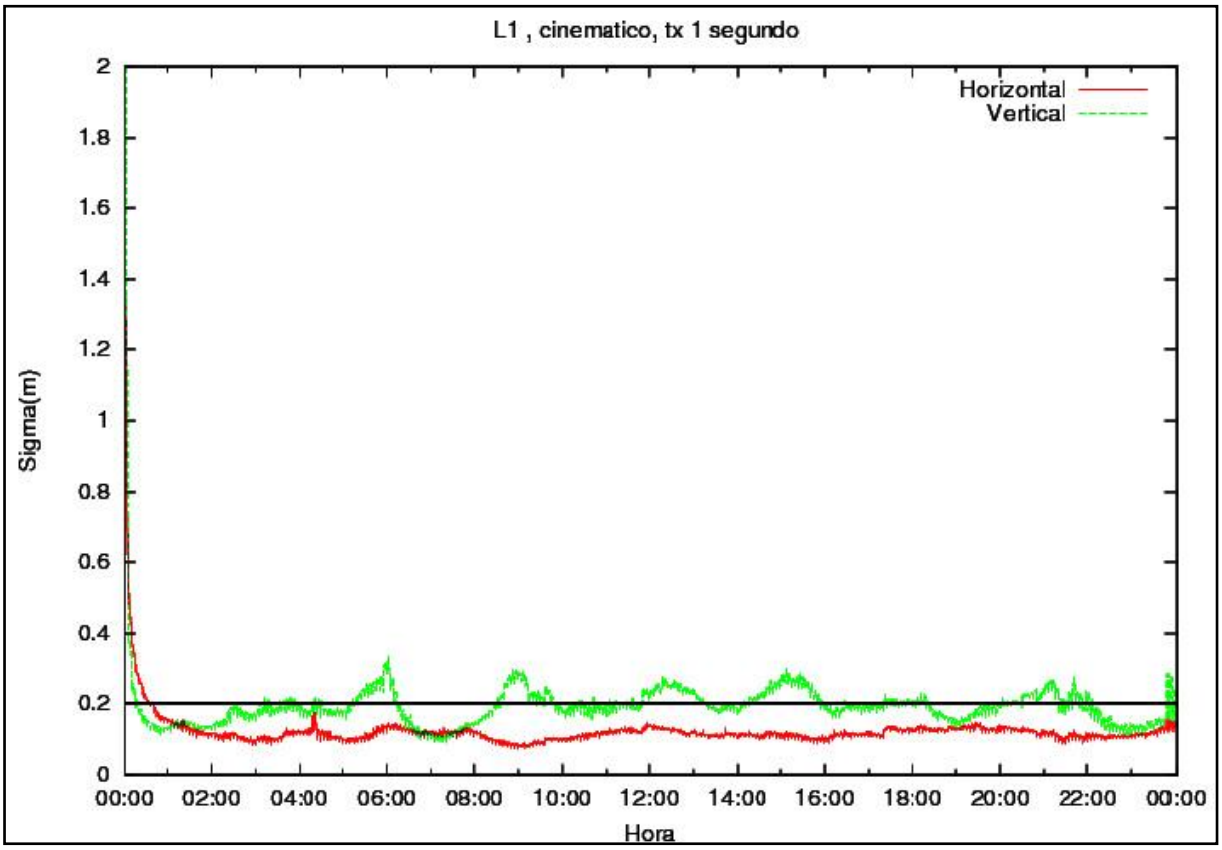


Gráfico4 – Precisão horizontal (linha vermelha) e vertical (linha verde) de um levantamento PPP obtidas no processamento realizado na opção cinemático em C1&L1. (fonte: fonte: www.ibge.gov)

No gráfico 4 os resultados mostram que a precisão do posicionamento horizontal (vermelho) com equipamentos de simples frequências em menos de 1 hora atinge a precisão de 20 cm, na componente horizontal (linha vermelha) e que a componente vertical (verde) oscila em torno de 20 cm de precisão, chegando a esse patamar em menos de um hora.

Os resultados obtidos foram validados por métodos usualmente adotados para aferir equipamentos com a realização de levantamentos de marcos geodésicos

cujas coordenadas são conhecidas com precisão de mm. Realiza-se o levantamento em um ponto conhecido e verifica-se o desvio.

As efemérides precisas são fornecidas pelo IGS e possuem três tipos de dados com correções para o relógio dos satélites: (fonte: www.igs.org)

- IGS, resultado de combinação as órbitas produzidas pelo IGS, ou seja, efemérides precisas, estando disponível após cerca de 13 dias, apresentando acurácia melhor que 5 cm no posicionamento e 0,1 ns na correções dos relógios satélites;
- IGR, resultado da combinação das órbitas rápidas produzidas pelos centros de análise, estando disponível 17 horas após o levantamento com qualidade similar ao das efemérides IGS possuindo acurácia de 5cm no posicionamento e 0,1 ns para correção dos relógios dos satélites; e
- IGU conhecido como órbitas ultra-rápidas, sendo compostas de dados observados e dados preditos. A primeira estando disponível em três horas e a segunda em tempo real. A acurácia da primeira parte da ultra-rápida é da ordem de 50 cm em posição e 150 ns nas correções dos relógios. Já a parte predita tem acurácia de posição da ordem de 10 cm e de 0,5 ns nas correções dos relógios. (Fonte: IGS)

Uma das desvantagens do PPP é o fato de os usuários que desejam melhores precisões, terem de aguardar 13 dias. Entretanto, a facilidade do processamento e a não obrigatoriedade de ter sempre um receptor GNSS como base para um posicionamento de qualidade podem compensar essa demora, que é aceitável em diversos projetos. Comumente se espera para utilizar a IGS, para garantir o resultado, e não se aconselha utilizar dados da IGU.

O uso do PPP para obtenção do posicionamento do levantamento aéreo foi adaptado no presente trabalho. Normalmente o processamento dos dados GNSS e IMU do sensor são compatibilizados utilizando-se bases GNSS na superfície terrestre para uma determinação posicional mais precisa (método diferencial). É o que se convencionou chamar de voo apoiado como mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Esquema de Posicionamento Método Diferencial.

Entretanto, como apontado é possível utilizar uma das técnicas PPP para a realização do processamento dos dados GNSS, sem que seja necessário um receptor GPS fixo num ponto de coordenadas conhecidas.

É que, apesar do próprio nome ser “por ponto”, ele pode processar vários pontos sequencialmente, ou seja, uma trajetória, podendo registrar as coordenadas precisas de um objeto em movimento, sendo conhecido neste caso como PPP cinemático (Leandro et al 2010).

Por outro lado, quando se faz a utilização de uma ou mais bases GNSS em solo, estas ficam coletando dados durante todo o intervalo do vôo. Para garantir a solução da ambigüidade no posicionamento do sensor nesse tipo de processamento devem-se considerar uma distância máxima de 30 km entre a base e a aeronave pois o método supõe que as condições da atmosfera sejam semelhantes (provocando erros de mesma ordem e grandeza). Isso impõe certa limitação de abrangência para o local a ser levantado (distância à estação base), sendo necessário um pré-planejamento para definir, na área a ser levantada, a posição do receptor GNSS em solo. Geralmente esses receptores em solo são posicionados em

pontos com coordenadas geodésicas conhecidas; entretanto em algumas situações será necessário realizar o transporte de coordenadas para áreas mais remotas, desse modo, o uso do PPP é sugerido pois não há restrição quanto a distância e não há a necessidade de existir um operador em solo com um receptor GPS.

O uso do PPP cinemático dispensa a base de referência, uma vez que os dados são contínuos e estão diretamente relacionados com os satélites visíveis no momento da tomada aérea.

A metodologia de processamento PPP cinemático será utilizada no presente trabalho e comparada com o método diferencial, sendo que assim se poderá verificar a melhoria ou não de precisão com o uso dessa nova técnica.

2.8 Modelo Gravitacional da Terra 2008 – EGM08 no PPP

Em um posicionamento a qualidade das altitudes não pode ser desprezada. O uso das informações geodésicas e de modelos geoidais disponíveis possibilita ao usuário de GPS converter as altitudes geodésicas (referidas ao elipsoide) em ortométricas, referidas ao nível médio do mar.

O levantamento por PPP utiliza o modelo geopotencial disponível para a determinação da altitude ortométrica dos pontos a serem calculados.

Segundo o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) o geopotencial é o trabalho realizado para elevar uma massa de ar de 1kg do nível médio do mar até uma área em qualquer ponto da atmosfera. A partir desta grandeza deriva-se a altura geodésica, que é medida em metro geopotencial (mgp), obtida pelo distúrbio do geopotencial pelo valor médio da aceleração da gravidade no nível médio do mar (9,80665 m/s2) ou do local em que se está trabalhando. Assim, pode-se determinar a altura dos níveis de pressão atmosférica num dado local, tendo como referência o nível médio do mar e não uma elevação arbitrária do local utilizando gravimetros.

O Geóide, segundo o IBGE, é limitado por uma superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra que coincide com o nível médio não perturbado dos mares. Em cada ponto o vetor gravidade será perpendicular à superfície terrestre. Para estimar a forma do geoide é introduzido um campo ou superfície de referência, conhecido como elipsoide de revolução com dimensões e características matematicamente definidas (Figura 17).

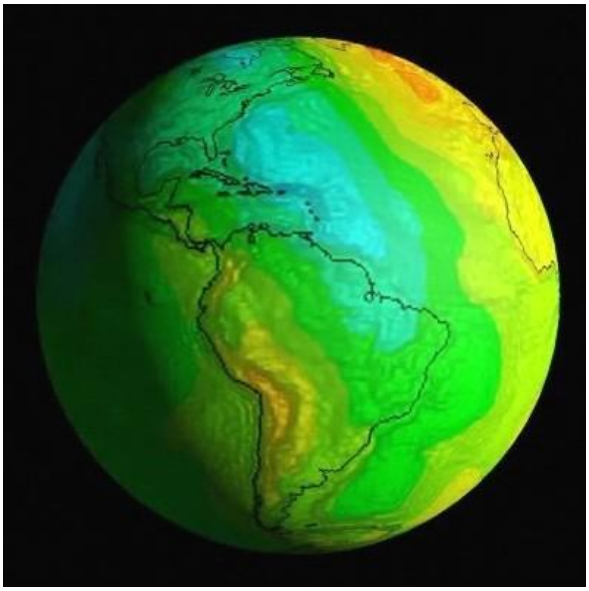


Figura 17- Primeiro geóide gerado a partir de dados GOCE – 2010 (imagem: ESA).

O Geóide é um corpo com uma distribuição não–homogênea de massas. Por isso a superfície do Geóide não é regular, e tem por característica ser uma superfície equipotencial, o seja, o potencial gravimétrico é igual em todos os seus pontos, e a direção do vetor gravidade é perpendicular à sua superfície, mas não passa pelo centro da Terra. Esta “perpendicular” é chamada Vertical do Lugar e a sua intersecção com a Normal do Elipsóide forma o ângulo "i" chamado Desvio da Vertical.

O Modelo Gravitacional da Terra – Earth Geoidal Model de 2008 (EGM2008), que era o disponível na data do processamento, foi lançado publicamente pelo Nacional Geospatial Agency Intelligence (NGA) e Equipe de Desenvolvimento EGM. Este modelo gravitacional, denominado completo, tem o grau e a ordem harmônica esférica de 2159, e contém coeficientes adicionais estendendo-se até o grau e ordem 2190, 2159 respectivamente.

Ele fornece a Odulação Geoidal, que, através da equação $N \cong h - H$, é uma opção para calcular a altura ortométrica dos centros perspectivos das imagens durante o processamento por PPP. Durante o levantamento, todo o trajeto da aeronave tem seu posicionamento registrado com altitude geodésica (elipsoidal) tornando a transformação dessa altitude para ortométrica, sendo assim necessária a utilização do modelo geoidal.

Outra maneira de calcular a altura ortométrica é através do Modelo de Ondulação geoidal elaborado pelo MAPGEO10 (Figura 18 Modelo de Ondulação Geoidal), modelo utilizado no momento da pesquisa, atualmente substituido pelo MAPEGEO15.

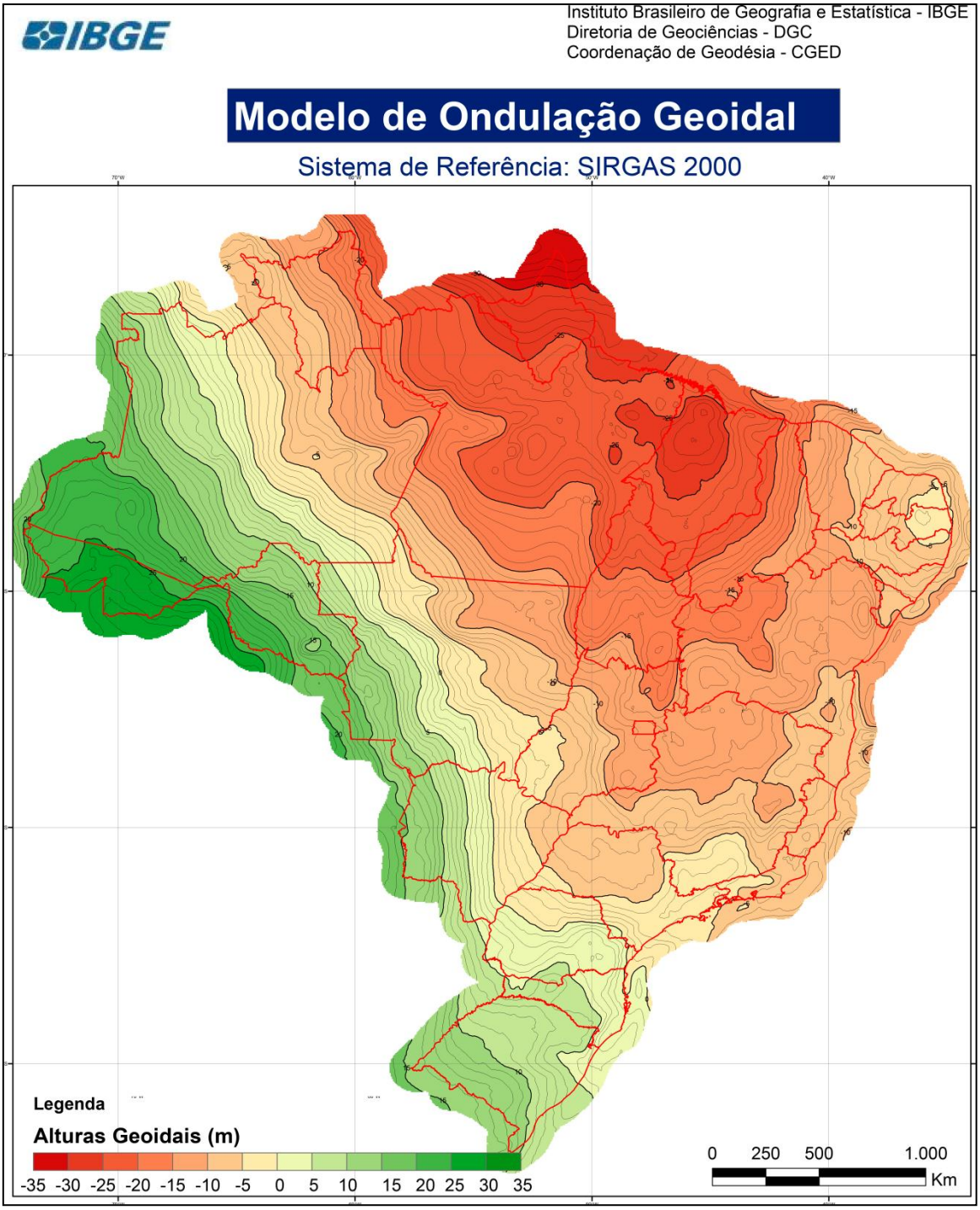


Figura 18 - Modelo Ondulação Geoidal Brasil MAPGEO 2008 (Imagem: IBGE).

A nova versão do Modelo de Ondulação Geoidal do Brasil foi calculada com aproximadamente 950.000 estações gravimétricas terrestres na América do Sul, sendo 450.000 dentro do Brasil. Entre estas, 18.485 correspondem a novas estações medidas no território brasileiro desde a divulgação da versão anterior MAPGEO2010. (IBGE)

A informação altimétrica utilizada na redução dos valores de gravidade foi obtida do modelo digital de terreno (MDT) SAM3s_v2, o mesmo adotado na versão anterior do MAPGEO, que se baseia no SRTM - Shuttle Radar Topography Mission. O modelo geopotencial global utilizado para o tratamento dos longos comprimentos de onda do campo da gravidade foi o European Improved Gravity model of the Earth by New techniques - EIGEN-6C4, até o grau e ordem 200, elaborado pelo GFZ/Potsdam e GRGS/Toulouse. Este é um modelo completo derivado da combinação dos dados das missões gravimétricas/modelos LAGEOS, GRACE, GOCE, EGM2008 e DTU. (IBGE)

A metodologia geral de obtenção das anomalias segue a linha canadense e utiliza o pacote computacional Stokes-Helmert Geoid Software (SHGEO) para a sua determinação através do uso do método de condensação de Helmert, que considera as massas topográficas substituídas por uma lâmina infinitesimal condensada sobre a superfície do geoide (Ellmann, A., 2005). Com o uso desta metodologia, a determinação do modelo geoidal pode ser resumida em basicamente cinco etapas (Blitzkow et al., 2015):

1. Cálculo das anomalias ar livre pontuais através de dados gravimétricos terrestres (coordenadas, altitude ortométrica e aceleração de gravidade);
2. Cálculo das anomalias de Bouguer completa, para posterior obtenção das anomalias ar livre médias em quadrículas de 5’. Para esses cálculos são necessárias as anomalias ar livre pontuais e um modelo digital de terreno;
3. Cálculo das anomalias de gravidade de Helmert na superfície da Terra que são obtidas adicionando a anomalia ar livre média, o efeito direto topográfico, o efeito atmosférico direto e o efeito topográfico indireto secundário;
4. Integração de Stokes com a utilização da técnica ”remover-calcular-repor”;
5. Adição do efeito indireto topográfico primário nas alturas geoidais referidas a um “geoide fictício”, denominado cogeoide, para obtenção das alturas geoidais finais.

Vale a pena acrescentar que as constantes do WGS 84 usadas para definir o elipsóide de referência, e o campo de gravidade e as ondulações do geóide são:

• a = 6.378.137,00 m (semi-eixo maior do elipsóide WGS 84)

• f = 1/298.257223563 (achatamento do elipsóide WGS 84)

• GM = 3,986004418 x 1014 m3-2 (produto da massa da Terra e da constante gravitacional)

• ω = 7292115 x 10-11 radianos / seg (velocidade angular da Terra)

2.9 Efeito BoreSight e sua correção

Geralmente os sensores (câmera fotográfica na área do visível) são montados junto com os dois equipamentos de posicionamento (IMU + GNSS) que normalmente são acoplados ao mesmo platô ou base. Esta configuração, se não for bem elaborada, leva a problemas, como o duplo registro de pixels e o estrabismo do campo de visão, conhecido como o *efeito boresight* (fonte: Inertial Explorer Guide - NovAtel Inc).

A palavra é originalmente militar que significa uma metodologia de calibração da mira em armas de disparo. Com um colimador acoplado à arma, é feito um ajuste na mira da mesma, garantido que o alvo atingido seja o previsto na mira. Quando o mesmo termo é associado à fotogrametria, nosso alvo é centro perspectivo da imagem, e a calibração em sistemas multi sensores se faz necessário.

A determinação dos parâmetros de orientação de uma imagem é possível graças à combinação de um sistema de medição inercial (IMU) e um sistema de posicionamento global (GNSS). A diferença de posição entre a IMU e a antena GPS associada à imagem causa um erro de orientação, o chamado *efeito boresight*. Qualquer pequena mudança na correção da orientação interna afeta o registro posicional das imagens. A correção do efeito *boresight* é uma tarefa fundamental e deve ser realizada pelos usuários de sistemas integrados para melhorar a posição de um determinado pixel.

O efeito *boresight* é considerado um erro sistemático e um problema que precisa ser corrigido antes de qualquer coleta de dados. Seus valores podem ser

obtidos no processo de calibração do sistema e não devem ser ignorados uma vez que têm uma forte influência no resultado final dos parâmetros de orientação das imagens coletadas.

Na realização de levantamentos aerofotogramétricos é fundamental o conhecimento dos parâmetros que permitem a reconstrução da geometria do sistema da câmara no momento da tomada da foto. O certificado de calibração fornecido pelo fabricante HasselBlad não supre a necessidade de tal processo pois ele depende da posição relativa entre o centro dos dois sistemas: câmara e GPS/INS (INS- Inertial System). Desse modo, para o presente trabalho foi encomendada e executada uma calibração em um campo de prova pela empresa Frontier Geomatics - Ontário/Canadá.

Através dessa calibração foram obtidas a distância focal (C) e as coordenadas do ponto principal (PPA x,y) no referencial principal.

Outro fator importante obtido na calibração foi o valor de correção dos ângulos do *BoreSight*. Esses dados são utilizados no processamento dos dados, possibilitando cálculos mais acurados ao final do processo. Esses dados estão resumidos na Tabela 04.

Tabela 04 - Distância Focal, Ponto Principal, Calibrados e Correção do *Boresight.*

Parâmetros de ajuste da câmera	
Distância Focal (C)	49,947 mm
Ponto Principal – PPA (x)	0,025 mm
Ponto Principal – PPA (y)	0,350 mm
Correção *Boresight* Omega	-0,612 deg
Correção *Boresight* Phi	-2,563 deg
Correção *Boresight* Kappa	-1,892 deg

Os parâmetros da distorção radial simétrica ($k1$, $k2$, $k3$) e os da distorção descentrada ($P1$, $P2$) não apresentaram valores significativos, não sendo, portanto, utilizados no processo.

É necessário ainda conhecer a diferença de alinhamento ou posição: as coordenadas da origem local do sistema IMU com relação ao centro de fase da antena GPS, ou seja, as medidas que são definidas a seguir e estão representadas como:

- X: a distância medida no eixo X entre a IMU e a antena GNSS.
- Y: a distância medida ao longo do eixo longitudinal Y da aeronave entre a IMU e a antena GNSS;
- Z: a distância medida na vertical a partir do IMU até a antena GNSS, ao longo desse eixo.

Essas distâncias são conhecidas como *LeverArms* (“braços distanciais”) estão representadas na Figura 19.

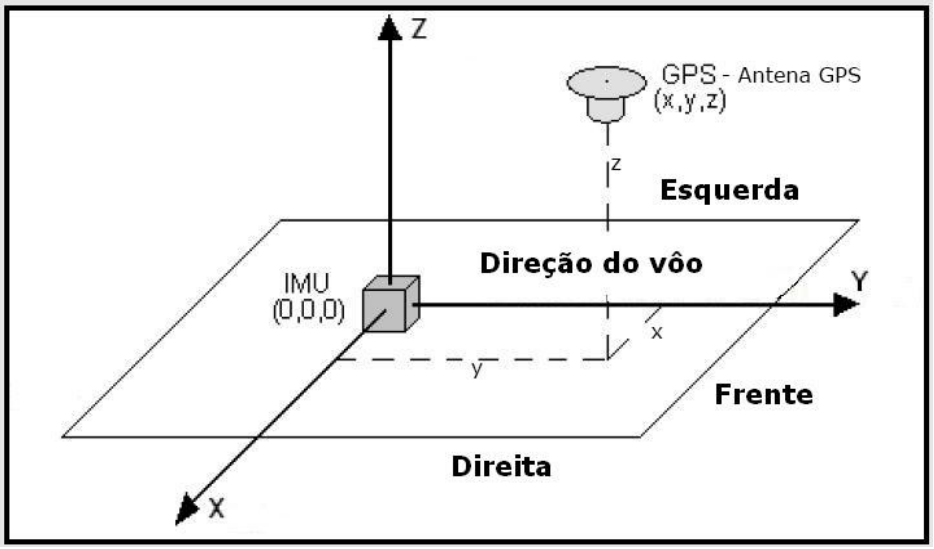


Figura 19 - Distância do centro de fase da antena GNSS até o centro de gravidade do inercial.

A medição dessas distâncias, que deriva da montagem mecânica dos equipamentos permite fazer a correção durante o processamento, permite calcular a posição exata da imagem no momento da tomada aérea, através também dos dados do *boresight*, ou seja, além da diferença de alinhamento dos braços distanciais. Também é necessário conhecer a diferença entre o centro de fase da antena GPS e o centro perspectivo (CP) da imagem, cujas medidas são definidas a seguir e são representadas por:

- Xcp: a distância medida no eixo X entre a CP da imagem e a antena GNSS.

- Ycp: a distância medida ao longo do eixo longitudinal Y da aeronave entre o CP da imagem e a antena GNSS;
- Zcp: a distância medida na vertical a partir do CP da imagem até a antena GNSS.

Essas medidas por serem feitas de forma manual, não apresentam precisão.

Para obter valores precisos deve ser feito um voo de calibração, com pontos suficientes em campo e introduzindo esses parâmetros (distâncias) como incógnita no ajustamento.

Essas distâncias estão representadas na figura 20.

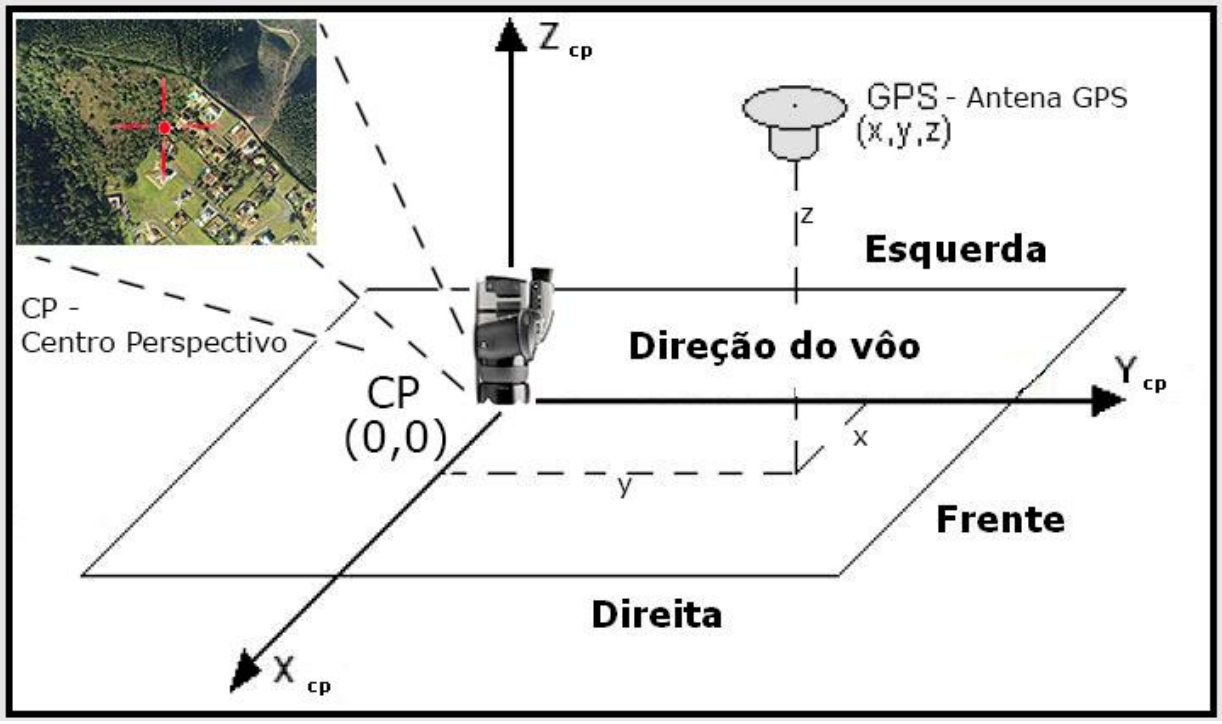


Figura 20 - Centro Perspectivo/Centro de fase da antena

Muitas instalações de IMU são feitas com a superfície do equipamento diretamente ligada ao piso da aeronave de modo que o quadro do sensor da IMU e a estrutura do corpo do veículo estejam quase alinhados. Nestas instalações todo o movimento em φ, ω e K referentes à rolagem, picagem e guinada do veículo são diretamente sentidos pela IMU. Algumas IMU´s são instaladas em uma posição inclinada com relação à estrutura do corpo da aeronave. Se a inclinação entre o quadro IMU e a estrutura do corpo é conhecida, o *InertialExplorer* realiza a compensação para que a informação produzida e a atitude em relação à estrutura

do veículo sejam as mesmas do quadro do sensor. A ordem das rotações empregada é Rx, Ry e Rz, ou seja, as matrizes de rotação em torno desses eixos, consistindo nos ângulos φ, ω e κ.

CAPÍTULO 03

PROGRAMAS, MODELOS E CORREÇÕES

Este capítulo descreve algumas questões da teoria envolvida como navegação inercial e filtro de Kalman, e Programas empregados como o Inertial Explorer, o DVP e o MAPGEO, na versão utilizada no presente trabalho.

3.1 NAVEGAÇÃO INERCIAL

A navegação inercial é possível integrando um conjunto de sensores para calcular a posição, velocidade e atitude de um determinado objeto. Os sensores utilizados são os giroscópios e os acelerômetros. Os giroscópios medem a velocidade angular, e os acelerômetros medem a aceleração linear, ambos em relação a um referencial inercial. A integração do ponto de vista teórico é um processo simples, as dificuldades aparecem à medida que surgem erros nos sensores e ruídos sistemáticos. Fonte: Basic Inertial Navigation, Stovall (1997)

Para facilitar o entendimento, primeiro pode-se calcular o problema em termos mais simples, assumindo uma Terra plana e restringindo a navegação para essa superfície 2D. Para indicar o posicionamento, deve-se estabelecer um sistema de coordenadas adotando uma direção sobre a superfície como o Norte verdadeiro e outra perpendicular a ela, o Este. Para ter um sistema orientado a direita, adota-se a terceira direção perpendicular à superfície para baixo (Regra de Fleming). Para o sistema de navegação no veiculo adota-se o eixo longitudinal como X e para o eixo transversal Y. O eixo Z é para baixo para termos um sistema destrógiro, onde as coordenadas (XYZ) movem-se com a aeronave, e é fixado no centro perspectivo da câmera conforme mostrado na figura 21. Esse sistema de navegação está girando sobre o sistema de coordenadas de um azimute ψ.

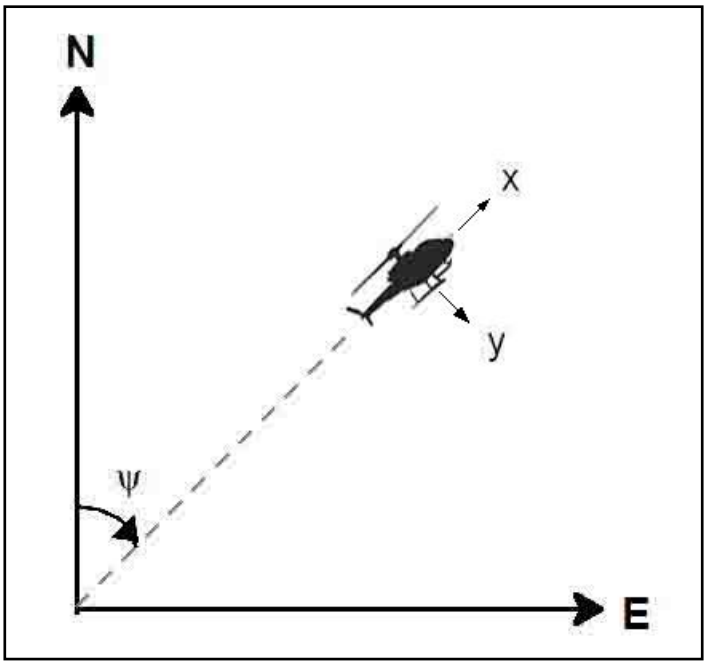


Figura 21 – Sistema de navegação 2D. Stovall (1997)

Como dito, assume-se inicialmente o eixo x orientado ao Norte, e o eixo y para Leste. Para o monitoramento do movimento em relação ao sistema de coordenadas, é montado um acelerômetro no eixo x e outro sobre o eixo y. Essa é a posição que os sensores inerciais são fixos em relação ao corpo do sistema de navegação. Se assumirmos que o sistema de coordenadas E e N é uma referencia para o inercial, os acelerômetros vão medir a aceleração em relação ao sistema, mas o dado obtido será em xyz. Portanto, será necessário conhecer o azimute para navegar pela malha. Pode-se sentir a mudança no azimute com um giroscópio montado sobre o eixo z. A saída desse giroscópio é dado por $\omega z = d\psi/dt$. Como o azimute ψ inicial é zero, a integral de ωz nos dá ψ em função do tempo.

Para efeitos didáticos, assumem-se inicialmente os sensores como perfeitos. Uma vez obtido ψ pode-se transferir (projetar) as saídas dos acelerômetros para o sistema de coordenadas N, E (Eq. 1).

$$\begin{pmatrix} a_N \\ a_E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} \qquad (1)$$

Através da 1ª integral de aN e aE obtém-se a velocidade no sistema, e integrando novamente obtém-se posição (a_x,a_y) . Do ponto de vista prático, deve-se ter algum meio para conhecer / determinar a posição, velocidade e atitude iniciais (como se sabe, integrações exigem conhecer valores nas condições iniciais). Quando se está em repouso, sabe-se que a velocidade é zero e pode-se determinar a posição inicial. Por outro lado, para o modelo de terra plana, um alinhamento estacionário inicial deve ser realizado por meio de medições externas. Se a plataforma está se movendo com uma velocidade constante, também se deve dispor de uma medição externa de velocidade. Se não houver um movimento acelerado, não há sensibilidade para os erros do sistema. A sensibilização significa que existe alguma condição que excita um ou mais dos sensores (acelerômetros) do sistema e faz com que se obtenha resposta mensurável. Dessa maneira, quanto mais movimentação da aeronave durante a o voo, melhores respostas poderão ser obtidas. Stovall (1997)

Suponha se a seguir que há uma plataforma de co-movimento, ou seja, a plataforma (Inercial) e uma plataforma de referência (GNSS) ligadas e sincronizadas no tempo e no espaço com precisão. As informações a partir deste sistema de referência são usadas para alinhar a plataforma, isto é, os dois sistemas sensores. Este processo é a transferência de alinhamento, sendo que o principal alinhamento / correspondência é o da velocidade. Em um alinhamento de correspondência de velocidade, comparamos a velocidade do sistema com a velocidade de alguma referência externa. Se ocorre um erro de alinhamento isso deve traduzir-se em um ΔV. Note-se que a sensibilidade pode depender das condições sob as quais o alinhamento está sendo realizado, bem como do tipo de alinhamento.

Ao aplicar uma aceleração angular ao sistema, qualquer erro no azimute se torna observável.

Desse modo se terá uma estimativa de azimute, onde ψ é ângulo do azimute verdadeiro e $\delta\psi$ é o erro dessa estimativa. (Eq. 2).

$$\hat{\psi} = \psi + \delta\psi \tag{2}$$

Obtém-se a alteração na velocidade devido à aceleração da equação (Eq. 3).

$$\begin{aligned}
\Delta\vec{V}_m &= \int_{t_1}^{t_2} \begin{pmatrix} \cos\hat{\psi} & -\sin\hat{\psi} \\ \sin\hat{\psi} & \cos\hat{\psi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} dt \\
&\cong \begin{pmatrix} 1 & -\delta\psi \\ \delta\psi & 1 \end{pmatrix} \int_{t_1}^{t_2} \begin{pmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} dt \\
&= \begin{pmatrix} 1 & -\delta\psi \\ \delta\psi & 1 \end{pmatrix} \Delta\vec{V}
\end{aligned} \tag{3}$$

Onde

$\Delta\vec{V}$ = mudança real de velocidade no sistema de coordenadas.

$\Delta\vec{V}_m$ = medida da mudança na velocidade no sistema de coordenadas.

Com o uso da equação (1) e as aproximações temos:

$$\cos(\psi+\delta\psi) \cong \cos\psi - \delta\psi\sin\psi$$

e

$$\sin(\psi+\delta\psi) \cong \sin\psi + \delta\psi\cos\psi$$

Conhecendo o ΔV do nosso sistema de referência, temos uma medida direta do erro do azimute. Caso nenhum ruído esteja presente no sistema, podemos determinar com precisão como ψ satisfatório com apenas uma medição tomando expansões de ordem superior das funções trigonométricas na equação (3) (assumindo que poderíamos resolver os polinômios de ordem n, resultando em δψ).

Se houver ruído no sistema, devem ser utilizadas técnicas de filtragem para aumentar a precisão do alinhamento. O método mais comum de filtragem em sistemas de navegação é o filtro Kalman, Note que a equação 3 é super determinada, há duas equações conhecidas e uma incógnita. Assim se fosse para estimar $\delta\psi$ a partir de um levantamento com ruído, deve-se usar a técnica dos mínimos quadrados.

Até aqui se considerou somente um sistema bidimensional. Esses modelos exibem de maneira limitada as características de um sistema de navegação por inércia.

O próximo nível de complexidade a considerar é o movimento tridimensional removendo a restrição de bidimensionalidade. Para remover essa restrição, deve-se considerar um campo gravitacional normal ao plano norte leste. Este campo de gravidade produz uma aceleração média de 9,81456 m/s² para baixo. Uma pequena digressão é necessária neste momento para explicar como um acelerômetro mede a aceleração gravitacional. Não importa como um acelerômetro é construído, mas pode-se pensar como ilustrado figura 22.

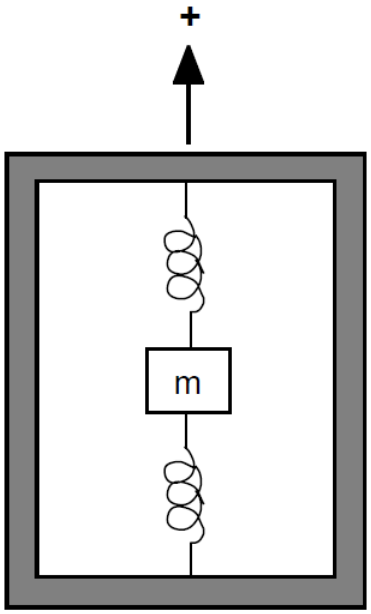


Figura 22. Acelerômetro. Stovall (1997)

O acelerômetro composto por uma massa de prova, m, suspensa, no caso, por um par de molas. A seta indica o eixo da força exercida. Uma aceleração ao

longo deste fará com que a massa seja deslocada da sua posição de equilíbrio. Este deslocamento será proporcional à aceleração. A quantidade de deslocamento a partir da posição de equilíbrio é detectada pelo sensor e é um indicador da aceleração na direção deste eixo. A posição de equilíbrio da massa é calibrada para aceleração zero. Uma aceleração no sentido positivo (para cima) vai fazer com que a massa do copo de prova se mova para baixo. Esse movimento descendente indica aceleração positiva.

Agora imagine se que o acelerômetro está estacionado em um campo gravitacional. Nesse caso a massa é novamente deslocada para baixo em relação a posição inicial, o que indica aceleração positiva. No entanto, nesse caso a aceleração da gravidade é descendente. Portanto, a saída de um acelerômetro, devido a um campo gravitacional é de sinal contrário ao do campo de aceleração.

Essa saída do acelerômetro é chamada de uma força (aceleração) especifica e se expressa pela (Eq. 4):

$$f = a - g \tag{4}$$

onde

f = força especifica (aceleração)

a = aceleração em relação ao sistema inercial

g = aceleração gravitacional

Essa relação é a causa de muita confusão. A maneira fácil de entender essa relação é considerar que o acelerômetro no primeiro momento está estacionado em um campo gravitacional em repouso. A força sobre o acelerômetro é a força normal do campo gravitacional sobre a massa, nesse caso g negativo. Ao largar o acelerômetro no vácuo, o f é zero e a aceleração efetiva é a = g. Para navegar em relação ao referencial inercial precisamos de uma aceleração a, que por isso nas equações de navegação é convertido na saída dos acelerômetros de f para a com adição de g.

Agora retornando a considerar o movimento tridimensional sobre a Terra, a atitude da plataforma já não pode ser especificada apenas pelo ângulo de azimute. É necessário especificar, a arpagem e a rolagem (Phi e Omega), como mostrado na figura 23, que se referem a plataforma nos eixos do corpo do sistema a serem alinhadas. Estes eixos são os mesmos do sistema de coordenadas XYZ definidos anteriormente.

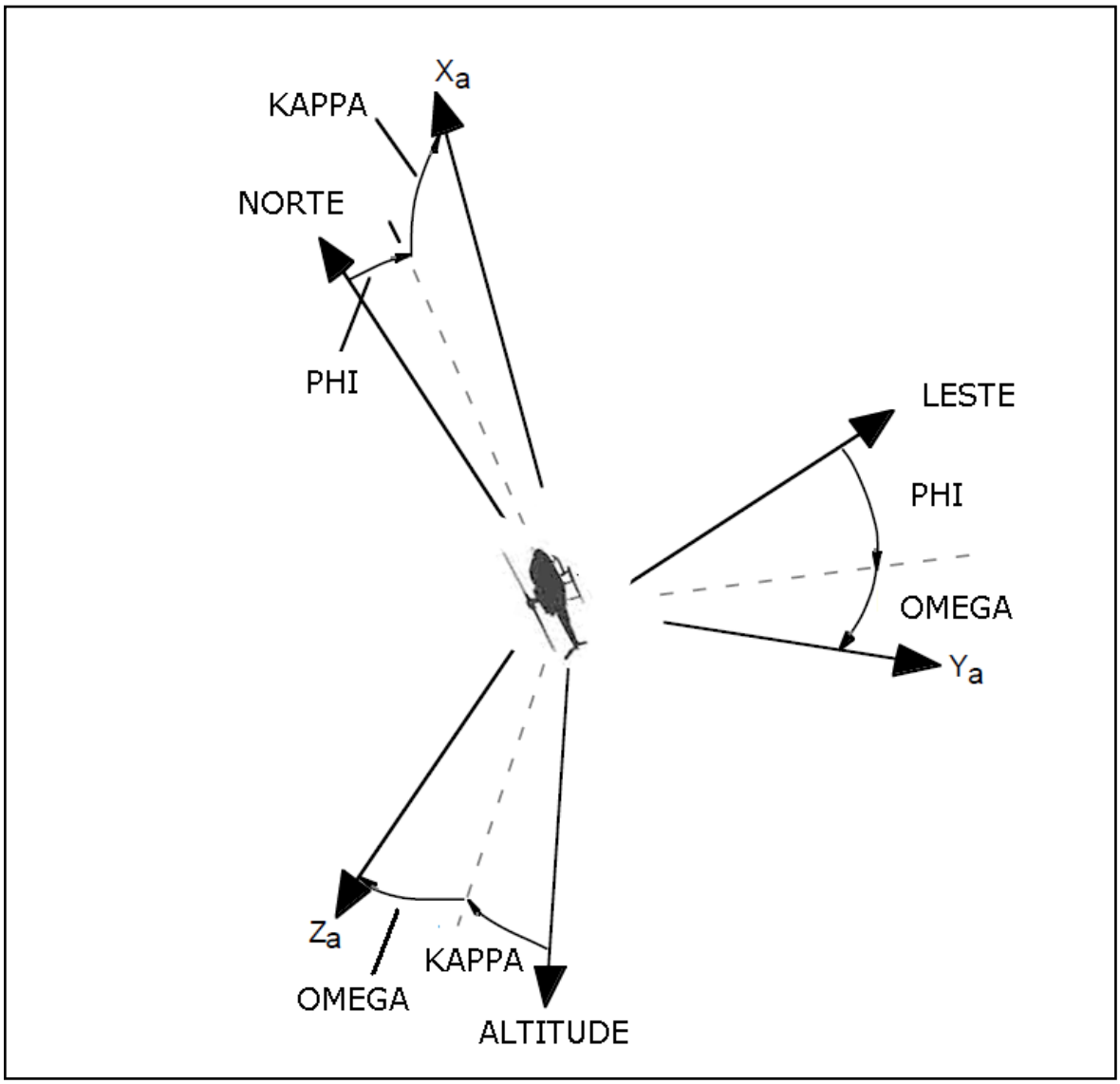


Figura 23. Eixos de orientação do vôo. Stovall (1997)

Condições de ortogonalidade na transformação reduzem os números de elementos independentes na matriz de transformação. Isto significa que se pode escrever os elementos da matriz como função de apenas três parâmetros. Há muitas maneiras de fazer isso, entretanto, uma das formas mais comuns de parametrização da matriz de transformação é através da utilização de ângulos de Euler. Há muitas

convenções para especificar os ângulos de Euler, mas para sistema de navegação de aeronaves, é quase sempre feito da seguinte forma (Eq. 5):

$$C_N^B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Onde

ψ= azimute

θ = omega

ϕ = phi

Esta matriz (equação 5) pode ser considerada como uma transformação de coordenadas, em vez de uma rotação de vetor. Pois a matriz multiplica os componentes de um vetor expresso no sistema de coordenadas, que produz os componentes do mesmo vetor, expresso num sistema fixo com relação à estrutura do corpo em movimento.

Possuindo três graus de liberdade, necessita-se de um acelerômetro no eixo z e giroscópios nos eixos x e y. Ou seja, mede se tanto a aceleração como a velocidade angular sobre cada eixo da aeronave.

No caso em que o corpo se encontra em repouso em algum ponto conhecido do sistema de coordenadas, para alinhar a plataforma do equipamento, devem ser determinados o três ângulos, omega, phi e kappa, O alinhamento não significa girar fisicamente a plataforma, somente determinar a sua atitude com relação ao sistema de referência. Depois disso é possível determinar omega e phi.

Para a analise 3D, adota se para a análise uma Terra esférica (ou elipsoidal) em rotação. Define-se um novo sistema de coordenadas chamado de sistema de coordenadas inercial (*x, y, z*). Ignorando inicialmente o movimento orbital da Terra, considere-se a orientação deste sistema de coordenadas fixo em relação à esfera celeste. O sistema de coordenadas inercial está definido para ser coincidente com o

centro da Terra e fixado com inicio no Meridiano de Greenwich. Note se que agora o sistema de navegação move-se sobre a superfície da Terra. O sistema de coordenadas é definido como tendo sua origem no centro de massa da Terra, com o eixo z, orientado para o Polo Norte (na realidade o IRP), o eixo x para o Meridiano de Greennwich (IRM), o eixo y para completar o sistema dextrógiro (figura 24). A transformação desse sistema para o sistema de coordenadas (cartesiano tridimensional), para o sistema sobre a esfera, resulta na latitude e longitude (e mais uma altura sobre o elipsoide de referência).

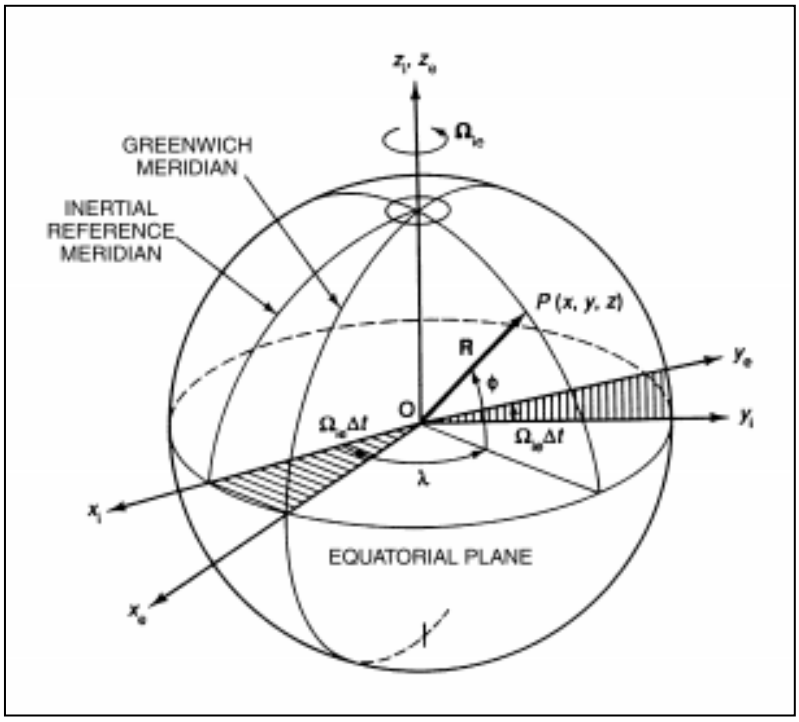


Figura 24. Sistema dextrógiro. Stovall (1997)

A partir da adoção desse sistema, a aceleração gravitacional não pode mais ser considerada como uma constante. A aceleração gravitacional diminui inversamente com a distância a partir do centro da Terra, portanto, g é função da altitude. Isto leva à instabilidade na solução da navegação na direção vertical. Um erro de altitude positiva nos leva a calcular (para a aceleração da gravidade) um valor menor do que o valor real. Uma vez que este componente residual de gravidade aparece como uma aceleração para cima, ela irá causar um erro de velocidade no sentido ascendente que, por sua vez, aumenta o erro da altitude, que crescendo de forma exponencial. Desse modo, navegadores requerem algum meio

externo de estabilização da vertical. Esta estabilização pode ser feita através de uma medida externa de altitude como o GNSS.

Os giroscópios e acelerômetros medem a taxa de aceleração angular e linear do corpo da plataforma com relação ao referencial inercial. Pela integral da velocidade angular obtém-se a transformação inercial para o corpo, o inverso desta transformação é usado para obter a força de aceleração especifica das coordenadas inerciais.

Deve-se adicionar a gravidade para obter a aceleração do corpo em relação ao espaço inercial. A integral deste termo é a taxa de variação do vetor de posição em relação ao espaço inercial. Isto não é uma velocidade de navegação. As velocidades de navegação são em relação ao sistema de coordenadas fixas na Terra. Devem assim ser corrigidos os efeitos de rotação para obter a velocidade do sistema de coordenadas da Terra. O restante da solução de navegação segue o vetor de posição em relação ao sistema cartesiano tridimensional de coordenadas fixo na terra que é convertido em latitude, longitude e altitude.

3.2 FILTRO DE KALMAN

O filtro de Kalman é um algoritmo criado para calcular, no caso concreto da aplicação do presente trabalho, correções de um sistema baseado em medições externas. Essas correções são ponderadas com uma estimativa dos dados filtrados dos erros estatísticos do sistema. Fonte: Basic Inertial Navigation, Stovall (1997).

A derivação das equações de filtro requerem algum conhecimento de álgebra linear e processos estocásticos. As equações dos filtros podem ser complicadas do ponto de vista algébrico. Neste item, baseado em Stovall (1997) procura se fornecer uma explicação em termos mais simples. O que é necessário é uma compreensão das diversas medidas estatísticas.

Começa-se com o conceito de um de estado de vetor, que é a base para a formulação dos algoritmos de filtro. Um estado de vetor é um conjunto de valores

que se escolhe para descrever o “estado” de um sistema. Para um sistema de navegação, o estado é naturalmente descrito por posição, velocidade, atitude, erros do sistema de navegação, e seus valores respectivos. O filtro irá procurar corrigir os erros do sistema de navegação, isto é, dessas variáveis.

Qualquer valor pode ser descrito em termos do seu valor verdadeiro mais algum erro desconhecido.

Para qualquer estado arbitrário de x, nossa estimativa será dada pela (Eq. 6):

$$\hat{x} = x + \delta x \tag{6}$$

Onde X é o valor verdadeiro e δx é o erro na estimativa. O objetivo do filtro é estimar os estados de erro (δX) e usá-los para corrigir as estimativas de $\hat{X}$. estado

Assume-se que todas as equações do sistema e equações de medição podem ser expandidas em uma série de Taylor em função de dx. Uma vez que estes estados de erro são considerados pequenos, mantém-se apenas os termos de primeira ordem. Portanto, as equações são lineares.

Para ilustrar os princípios básicos do filtro, pode-se começar por fazer suposições simples. Por exemplo, supor que a média de todos os estados de erro é zero. Também se pode assumir um sistema de um estado, onde o erro do estado será δX. Tem-se assim uma estimativa a priori do desvio padrão inicial (σ) do estado presente de erro. Para manter a notação de acordo com a literatura, pode se chamar a variância do estado de erro de σ^2.

O comportamento do erro será, em geral, descrito através de uma equação diferencial. Para começar, pode-se assumir a equação (Eq. 6).

Filtros de Kalman são úteis no processamento de medições quando ocorrem de ruídos, tanto no sistema de medição, como no próprio sistema. Eles

proporcionam uma maneira de incorporar as medições de forma otimizada. As medições são necessárias em sistemas de navegação inercial para alinhar o sistema e amarrar os erros do sistema ao longo do tempo. Estas medidas podem ser feitas de várias formas, utilizando medições Doppler de velocidade, medições de GPS, ou qualquer sistema externo que forneça uma medida de um ou mais parâmetros de navegação.

O alinhamento pode ser por auto alinhamento, com o uso de giroscópio e bússola, ou alinhamento de alguma fonte externa. Quando a fonte externa é um outro sistema inercial, o processo é geralmente referido como alinhamento de transferência. As medições usadas no processo de alinhamento de transferência podem ser com base nos valores de saída do acelerômetro ou de saída do giroscópio.

A posição GPS e as medições de velocidade são utilizadas para alinhar um sistema estando sujeito aos erros das tecnologias envolvidas. Portanto, esse alinhamento muitas vezes inclui a calibração dos sensores, para possibilitar resultados mais precisos.

3.3 INERTIAL EXPLORER 2.30

Este é um software que processa dados GPS e integra esses dados com os dos sensores IMU. O software utiliza os dados dos acelerômetros (Δv) e a velocidade angular ($\Delta\theta$) para produzir informações de atitude a partir de uma ampla variedade de IMU's (Sistemas Inerciais) disponíveis no mercado.

Ele corrige um conjunto de dados ruins ou falhos do GNSS com um dado inercial bom, através de um processamento que usa o IMU durante os períodos em que o rastreamento via satélite é limitado ou variável (por exemplo, em situações com menos de 4 satélites visíveis). Isto ocorre, por exemplo, nos momentos em que existe perda de sinal GPS: ai entram as medições inerciais por um período curto de tempo, até que se reestabeleça a conexão dos sinais GPS. A sincronização adequada é vital. Caso contrário, não será possível utilizar os dados de posição. No

sistema NovAtel, os dados da IMU são automaticamente sincronizados pelo software de processamento e o decodificador do InertialExplorer os extrai automaticamente.

O InertialExplorer é capaz de combinar direções obtidas do sensor no processamento e de executar uma suavização através de um filtro de Kalman aplicado à trajetória inercial: este é um estimador bayesiano, não tendencioso, consistente, eficiente e de variância mínima (CAMARGO, 1992). O resultado final é que a combinação das direções mais o filtro permitem obter com precisão a trajetória. Esta opção requer que os dados inerciais já estejam processados, podendo assim realizar um ajustamento que fornece resultados mais precisos, nas situações em que tenha havido um problema com o sinal GPS. Ao utilizar este ajuste, os erros de posição, velocidade e atitude podem ser corrigidos ou minimizados. Também se pode ajustar a precisão da posição e da velocidade mesmo quando não há perda do sinal, mas ocorrem valores anômalos.

Para processar as medições feitas em um referencial inercial, a estrutura do corpo do sensor inercial precisa ser reorientada de forma a torná-lo coincidente com a câmera. Alguns equipamentos já possuem essa configuração integrada estando a IMU acoplada e orientada pela câmara. Entretanto, existem equipamentos em que a IMU está posicionada de forma independente, sendo necessário conhecer seu posicionamento e orientação em relação a ela, integrando os giroscópios e acelerômetros para obter o alinhamento da plataforma.

Além disso, somente as componentes devidas ao movimento do helicóptero são de interesse. Assim, a gravidade, a rotação e a curvatura da Terra detectada pelos giroscópios e acelerômetros devem ser eliminadas para garantir que apenas a dinâmica do veículo seja registrada. Caso essas acelerações ao longo de um eixo não sejam eliminadas, elas acabarão sendo processadas erroneamente influenciando no resultado, gerando uma diferença direta na posição.

3.4 DVP (Digital Video Plotter) 6.4

O DVP 6.4 é um software de fotogrametria digital, mapeamento profissional e GIS da companhia canadense DVP-GS. Foi utilizado para a realização da aerotriangulação, o que permitiu a geração de Ortofotos. Com a adição de toponímia e elementos vetoriais de interesse (hidrografia, vias, malha de coordenadas, etc. de acordo com a especificações da aplicação), dão origem ao produto principal, a Ortofotocarta.

Através desse programa foi realizada a coleta das informações E, N e H dos pontos de controle, que serviram para a comparação com os dados de campo (levantados por GPS diferencial) desses mesmos pontos. Com a utilização do DVP é possível criar o modelo orientado de duas fotos aéreas de regiões homólogas e coletar com precisão as coordenadas dos pontos do terreno (Gagnon, 1995). Isso é importante para fazer a verificação de qualidade da carta, comparando essas coordenadas às dos mesmos pontos obtidos em campo com a utilização de equipamentos coletores de dados GNSS dupla frequência L1/L2. Esse controle de qualidade será detalhado oportunamente mais adiante.

A partir das imagens orientadas geometricamente o programa trabalha por correlação de imagens, em um processo automático, que varre as áreas de superposição entre as imagens, sendo necessário escolher e apontar pontos homológos, isto é, presentes e identificáveis nas duas imagens (Figura 25). Essa imagem já dá uma ideia do nível de detalhe que pode ser visto e identificado nas fotos, mostrando de alguma forma o potencial dessas imagens.

Figura 25 - Imagens Orientadas Geometricamente por Correlação.

Após a correlação de duas imagens o programa calcula os dados de posição e rotação entre as imagens, e com eles e com as coordenadas de pixels homólogos nas imagens é possível determinar as coordenadas cartesianas tridimensionais (X, Y, Z) de pontos no espaço objeto. Isso permite a geração de feições (compostas de pontos) com seus dados tridimensionais. Entretanto, em altimetria há uma perda de precisão, o que implica quando se deseja obter a cota de um determinado ponto com maior precisão, a necessidade da leitura do mesmo por um operador em um ambiente digital 3D (DVP), com uma estação fotogramétrica e óculos especiais.

3.5 MAPGEO2010

O MAPGEO2010 é uma versão anterior de um aplicativo disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), desenvolvido pela Coordenação de Geodésia (CGED) juntamente com a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP que visa a obtenção de dados gravimétricos e altimétricos para a melhoria das alturas geoidais do Brasil.

Embora já esteja disponível o MAPGEO2015, no momento do experimento prático desta pesquisa, contava-se com o modelo MAPGEO2010, e por isso

descreve-se essa versão. Através dele, os usuários podem obter a ondulação geoidal (N) em um ponto ou conjunto de pontos, havendo as opções de referencial: SIRGAS2000 e SAD69 (www. ibge.gov.br).

O software é gratuito e está disponibilizado pelo IBGE. Ele permite aos usuários conhecer a altitude ortométrica (H) a partir da altitude geodésica (h) obtida através dos receptores GNSS, graças ao uso dessas ondulações (N). Na prática aplica-se a equação simplificada $H \cong h - N$, conforme o esquema da Figura 26, sendo que se considera que a normal e a vertical estão alinhadas.

A componente N representa a altitude (ou ondulação) geoidal fornecida pelo programa. A altitude geoidal será de valor positivo se o geóide estiver acima do elipsóide e negativo se estiver abaixo. A componente h representa a altitude geodésica obtida com a utilização do receptor GNSS. A componente H representa a altitude ortométrica, que se quer conhecer.

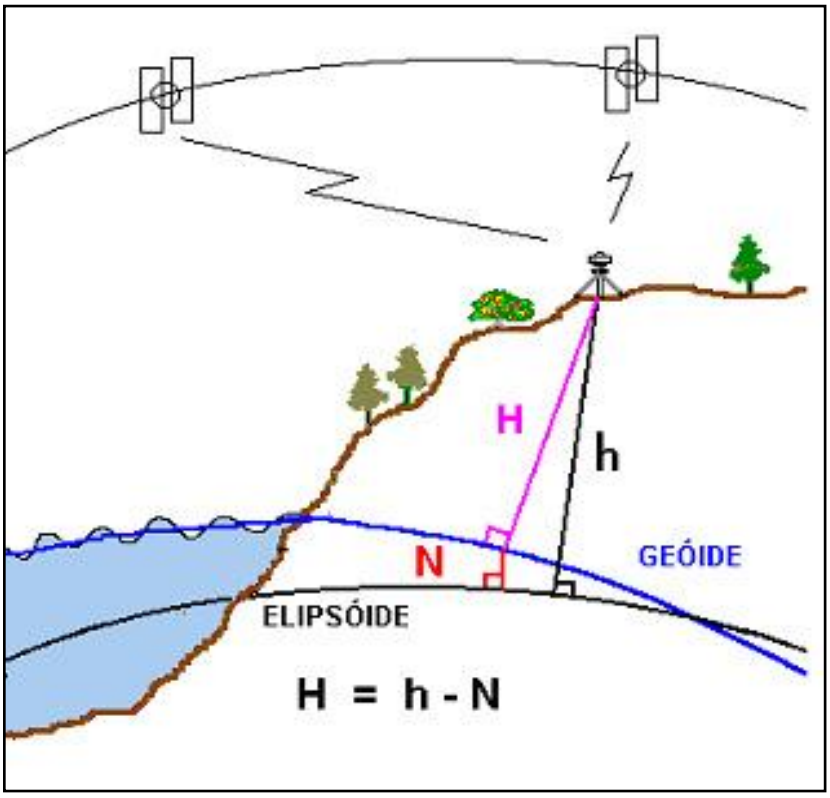


Figura 26 - Esquema para o Cálculo Altitude Ortométrica.

O modelo geoidal utilizado no presente trabalho foi calculado utilizando mais de 928.000 pontos de gravimetria terrestre na América do Sul. Para o Brasil 13.057

novos pontos gravimétricos foram introduzidos recentemente sendo todos devidamente validados em relação ao modelo geoidal anterior.

A determinação do geoide foi realizada em 5 etapas :

1º Etapa: Cálculo das anomalias ar livre pontuais através de dados gravimétricos terrestres (coordenadas, altitude ortométrica e aceleração de gravidade);

2º Etapa: Cálculo das anomalias de Bouguer completa, para posterior obtenção das anomalias ar livre médias em quadrículas de 5'. Para esses cálculos são necessárias as anomalias ar livre pontuais e o modelo digital do terreno;

3º Etapa: Cálculo das anomalias de gravidade de Helmert na superfície da Terra, obtidas adicionando à anomalia do ar livre média, o efeito topográfico direto, o efeito atmosférico direto e o efeito topográfico indireto secundário. Os efeitos topográfico e atmosférico são obtidos utilizando o MDT;

4º Etapa: Integração de Stokes, que utilizou a técnica da Transformada Rápida de Fourier (FFT). O modelo geopotencial EGM2008, até o grau e ordem 150, foi usado como referência para remover a componente de longo comprimento de onda da anomalia média de Helmert e para repor no final a mesma componente na altura geoidal, no que é denominado de técnica "remover-calcular-repor".

5º Etapa: Adição do efeito indireto topográfico primário nas alturas geoidais referidas a um "geoide fictício" denominado co-geoide, para obtenção das alturas geoidais do MAPGEO2010.

Para o cálculo das anomalias ar livre pontuais são utilizados levantamentos gravimétricos terrestres possuindo coordenadas, altitude ortométrica e aceleração de gravidade desses pontos. A Figura 27 mostra a distribuição dos levantamentos realizados pelo IBGE através de um convênio de cooperação cientifica com a Escola Politécnica da USP, com objetivo de refinamento do mapa de ondulação geoidal brasileiro.

.

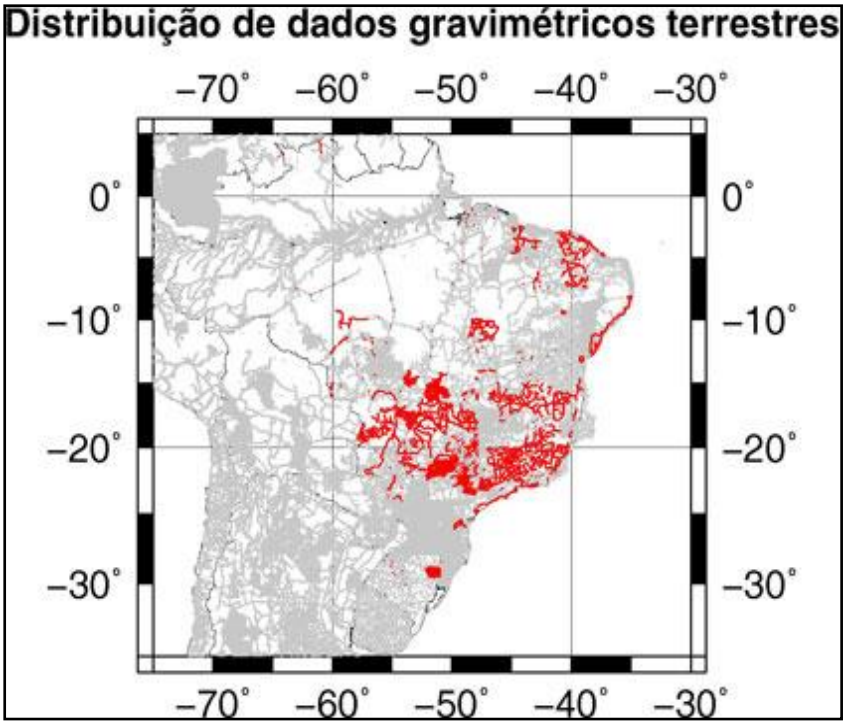


Figura 27 - Distribuição dos pontos gravimétricos. (Fonte: www.ibge.gov.br)

A distribuição dos pontos gravimétricos apresentada na figura 27, mostra que pela imagem que existe uma carência de pontos em determinadas áreas, principalmente na região amazônica. Entretanto, o aplicativo têm-se mostrado bastante satisfatório na grande maioria do território nacional.

CAPÍTULO 04

CASO PRÁTICO: DESCRIÇÃO E LEVANTAMENTO DE CAMPO

4.1 Descrição da Aplicação: Levantamento de Linha de Transmissão

Depois de realizados todos os testes de calibração e aferição do equipamento foram colocados em prática o levantamento de informações georreferenciadas de subestações, linhas de transmissão e torres de telecomunicações da companhia de transmissão de energia elétrica de São Paulo (CTEEP).

Foram estabelecidos pela contratante os requisitos técnicos para a realização dos serviços de georreferenciamentos de suas instalações (subestações, linhas de transmissão, usinas hidrelétricas, pontos singulares associados às linhas subterrâneas e torres de telecomunicações), sendo que as informações se destinavam à atualização cadastral.

Para isso foi necessário o levantamento das coordenadas das instalações da transmissão paulista, o que poderia ser feito por GNSS, ou outro tipo de recurso terrestre ou aéreo, mas a empresa resolveu optar pelo levantamento aerofotogramétrico alternativo, tal como o proposto neste trabalho. O autor da presente pesquisa, além de participar de todos os trabalhos, procurou coletar pontos de campo e controlar os procedimentos para sua avaliação, para que servissem para verificar a qualidade do produto.

4.2 Escopo e precisão do produto

Para o levantamento em questão, com relação às coordenadas (E, N e H) dos pontos do terreno, os usuários definiram previamente que deveriam obedecer ao PEC A na Escala do mapeamento, que seria 1:2.000. Todas as estruturas levantadas deveriam ser georrefenciadas, com o uso de processos de correção, de tal modo a atender a precisão preconizada.

As alturas ortométricas foram referenciadas ao sistema oficial do IBGE (marégrafo de Imbituba), também sendo necessário identificar o município em que se localiza cada instalação de interesse.

Foram levantadas 105 subestações, 12.144 km de estruturas de linhas de transmissão, 18.495 km de circuitos, 30.386 torres de sustentação da linha, 180 pontos singulares associados às linhas subterrâneas e 168 torres de telecomunicações.

Para a medição das coordenadas da estrutura ficou definido o ponto central da base da torre, correspondente à intersecção das diagonais definidas pelos “pés” opostos como mostrado na Figura 28.

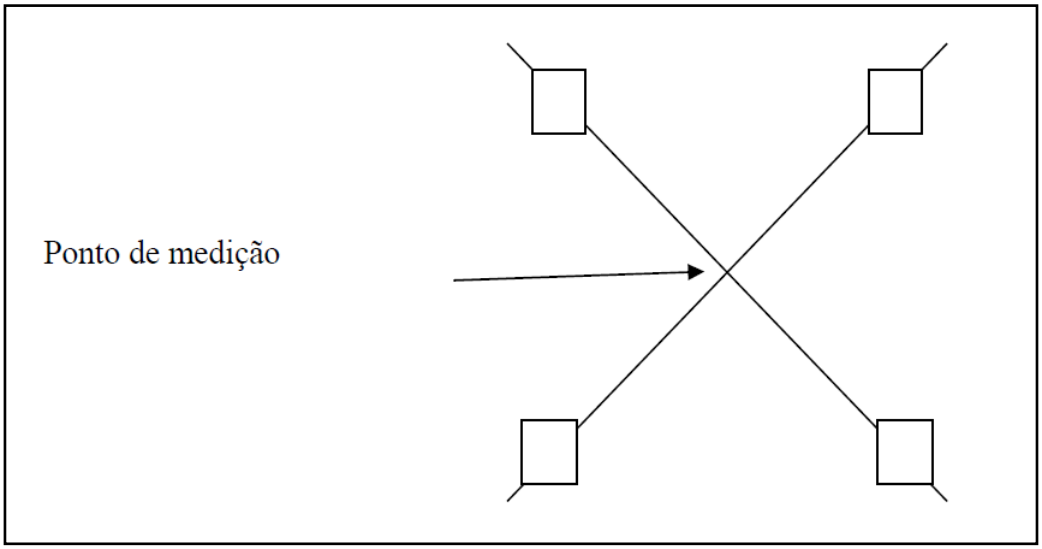


Figura 28 - Posição para medição da coordenada da torre de transmissão. Fonte: CTEEP

As estruturas são diferentes conforme o tipo de voltagem da energia que é transmitida na linha, como se ilustra na Figura 29, mostrando o tipo de torre associada à tensão na linha, para sua identificação na ortofotocarta e definição do centro.

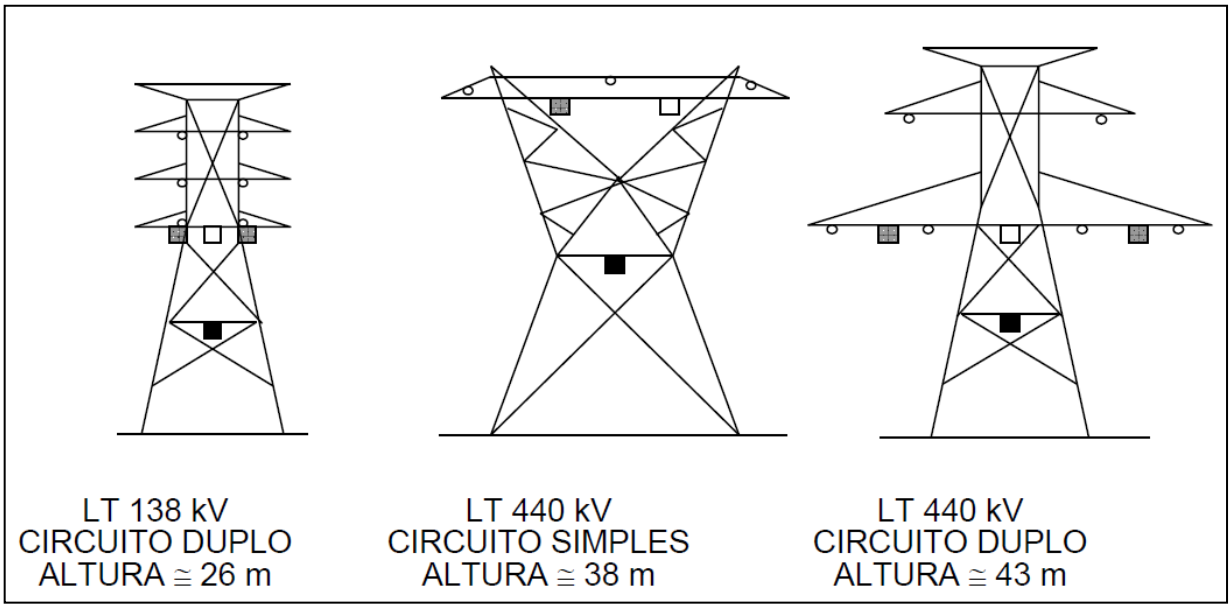


Figura 29 - Formato e tensões das torres de transmissão. Fonte: CTEEP

A identificação do tipo da estrutura é necessária para evitar a confusão inadvertida com outras linhas, tomando assim o cuidado nas situações em que existem linhas paralelas em uma mesma faixa, podendo ao longo da faixa ocorrer um afastamento e desdobramento entre elas (afastamento relativo), devendo-se evitar a confusão de uma com a outra, ou seja, o levantamento da linha incorreta.

4.3 Produtos

Após o levantamento aéreo, processamento dos dados, restituição e edição, foram entregues ao cliente os produtos descritos na sequencia:

- Relatório técnico de procedimento com indicação, na forma tabular, de nome e número da instalação amostrada, coordenadas associadas, município de localização, demais informações pertinentes, precisão da coordenada associada (N, E e H) e demais informações que mostrem a qualidade do dado.

- Para as subestações no formato *.shapefile e Excel contendo o nome da

subestação, suas coordenadas, potência instalada, níveis de tensão, município de localização e precisão do levantamento (Figura 30).

Exemplo:

```
Subestação São José do Rio Preto
Estado SP - FUso 22
Municipio- São José do Rio Preto-SP

Elemento     E          N          H

SE SJRP  669296.00  7694348.00  533.10
```

Figura 30 – Subestação de São José do Rio Preto/SP, com coordenada definida no centro das instalações.

- Para as linhas de transmissão: nome da linha de transmissão, tensão da linha

de transmissão, número da estrutura, coordenadas e faixa de domínio.

Exemplo:

```
Linha de Transmissão Ilha Solteira - Pereira Barreto
Estado SP - FUso 22
Municipio- Ilha Solteira-SP

Elemento     E          N          H

Torre 01 461297.62  7745924.23  278.20
Torre 02 461446.10  7745564.56  278.25
Torre 03 461612.94  7745156.13  278.30
```

- Para as torres de telecomunicações: nome da localidade, coordenadas,

município de localização e precisão do levantamento.

- Aplicativo SIG (Sistema de Informação Geográfica), apresentando capacidade

de edição nas ferramentas de auxilio na vetorização de elementos gráficos por entrada (X,Y), distância e direção, azimutes e rumos, elementos paralelos a outra geometria, perpendicular a outro elemento e ferramentas de offset. E também operações como permitir desfazer e refazer (undo e redo), apagar, agrupar, dividir, copiar, mover, mudar cores, rotacionar e expandir. Inserção de imagens Geotiff e validação topológica.

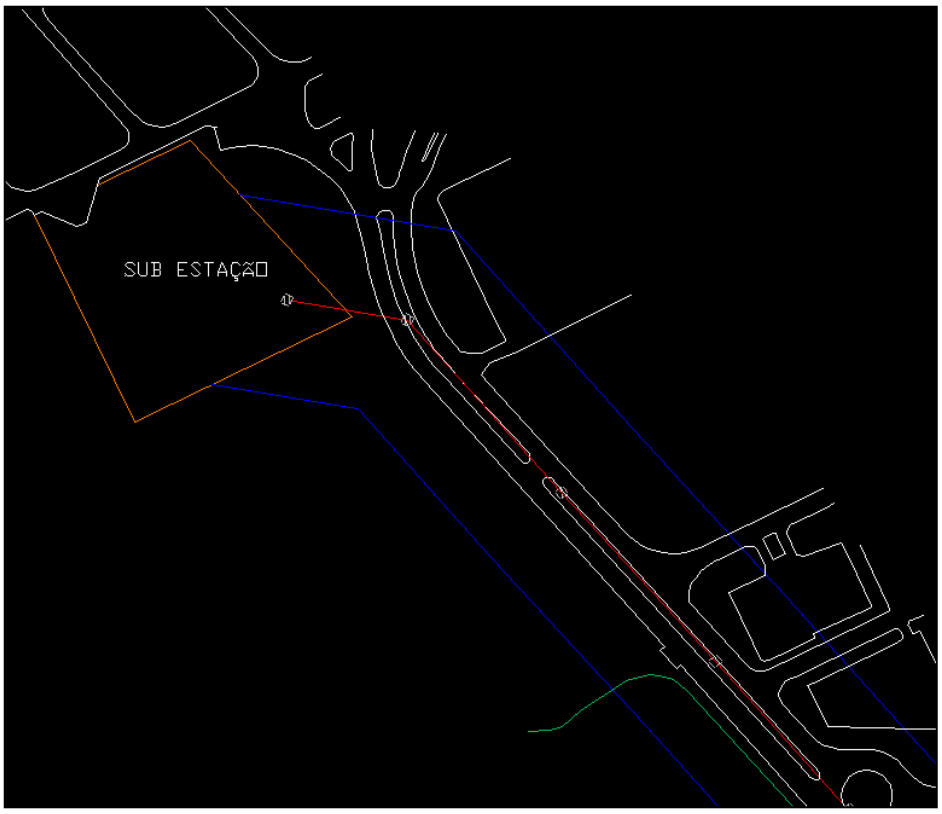


Figura 31 – Sistema de Informação Geográfica, mostrando uma planta produzida a partir da ortofoto.

- Para observação dos elementos em campo, foram geradas as Ortofotocartas,

como previsto, de todo o trecho levantado.

A Figura 32 mostra uma torre de transmissão ortorretificada, podendo-se identificar nessa foto: as linhas de transmissão (cada um dos fios), centro da torre

(que pode ser determinado também pelo cruzamento das diagonais), outras linhas de transmissão na parte inferior da imagem, além de detalhes do ambiente circundante: vegetação, cercas, edificações, caminhos e outros.

Figura 32 – Torre em detalhe com projeção ortoretificada. A sombra da torre permite determinar seu tipo.

4.4 Objetivo dos Produtos

Todo trabalho realizado deveria permitir ao usuário final visualizar o caminhamento das linhas de transmissão georreferenciadas e apresentadas na tela do computador e visualização de outras informações de interesse do usuário.

Deveria ainda permitir coletar distâncias entre pontos singulares ou tomados ao longo de uma poligonal ou entre pontos associados a elementos levantados como subestações, torres de telecomunicações, instalações, linhas subterrâneas ou usinas hidroelétricas. Também deveria permitir o lançamento sobre o desenho de áreas especiais como áreas de preservação permanentes, áreas não construtivas, áreas de alagamento e reservas florestais. O aplicativo desenvolvido deveria possibilitar a edição os dados levantados, com possibilidade de alteração das informações associadas com a possibilidade de inclusão de novos dados, ainda com a possibilidade de edição da escala e a plotagem do produto ortofoto carta no

tamanho da planta desejada, como no exemplo da Figura 33. Nela se pode ver como foi possível desenhar com precisão a posição das linhas, a delimitação da faixa de domínio, a posição das subestações e detalhes do entorno, como por exemplo, veículos e até as linhas demarcatórias de campos de tênis.

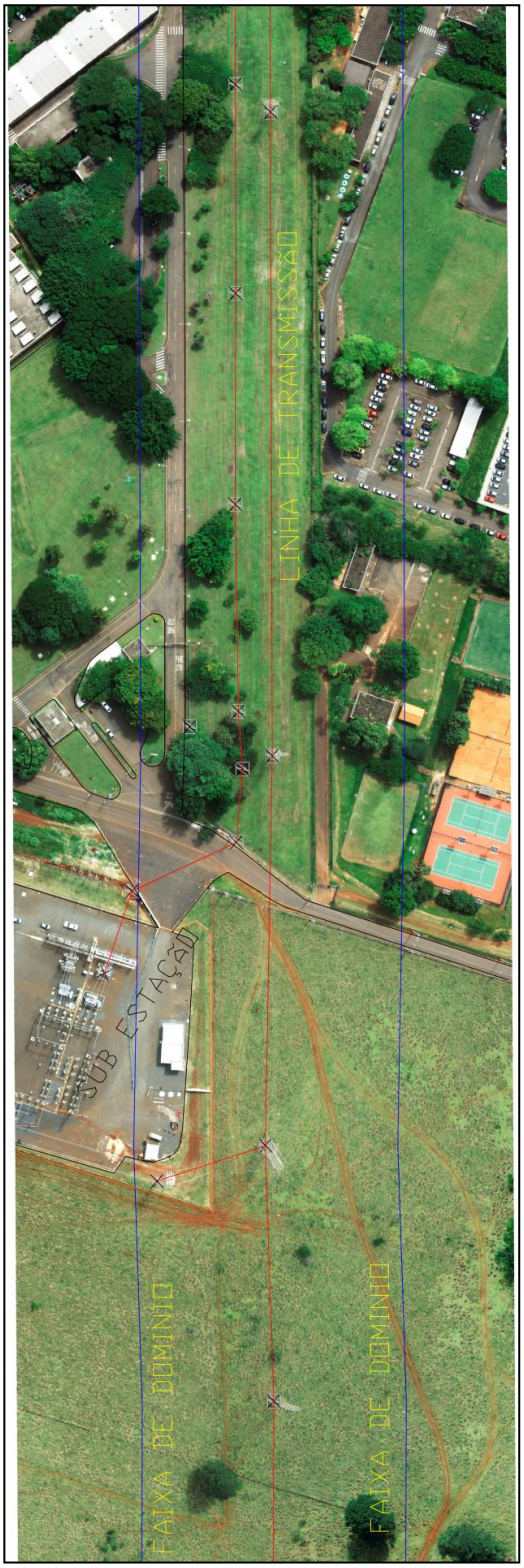


Figura 33 – Ortofoto carta.

4.5 Levantamento de dados

4.5.1 Preparação do equipamento

Essa etapa consistiu na montagem do sistema de imageamento sobre uma plataforma fixa a bordo de uma aeronave (helicóptero) da empresa Fototerra. Quando se trata de aerolevantamento, todas as etapas são baseadas na otimização do sistema. A meta principal é que a câmara seja acoplada à aeronave, sem sofrer deslocamentos laterais. Outra preocupação é a total desobstrução da mesma.

Assim, foi preparado em oficina, uma plataforma, em que tanto a câmera como a plataforma estivessem bem fixadas e geometricamente imutáveis entre si, com suas distâncias conhecidas, como também bem fixadas com relação à aeronave. O esquema implantado, tal como descrito em capitulo anterior, é o mostrado na Figura 34.

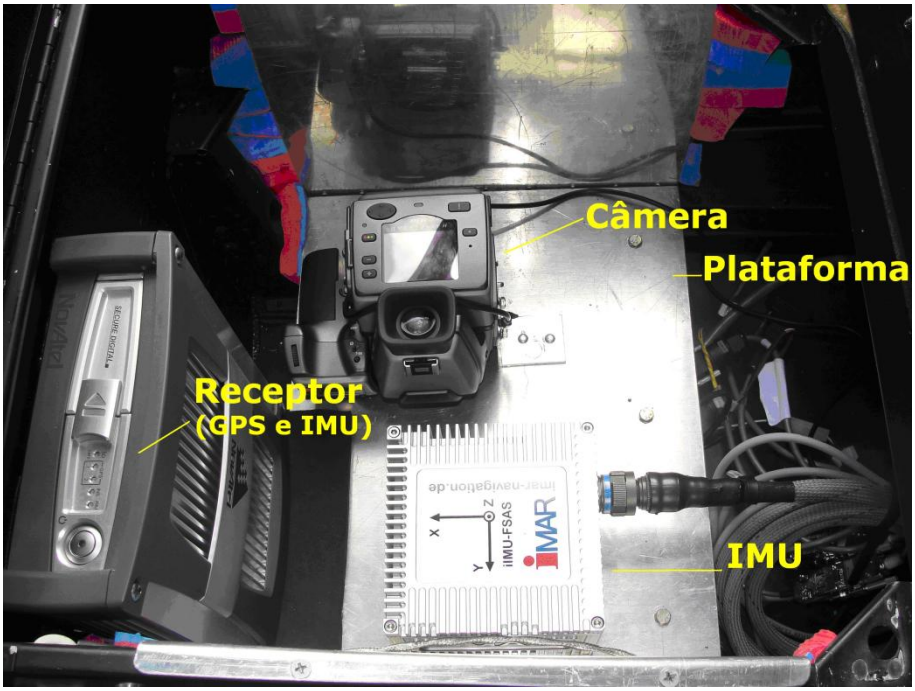


Figura 34 – Câmera, Receptor e IMU, montados sobre a plataforma fixa.

Após a fixação da câmara, o próximo passo foi à implantação do sistema, que é composto basicamente pela antena e receptor dos dados GNSS/IMU e a IMU (Unidade de Medição do Inercial).

4.5.2 Tomada Aérea de Calibração

A execução da tomada aérea para calibração do equipamento foi feita sobre um campo de prova em região rural, não havendo nenhuma obstrução vertical de relevância para o sinal GPS como árvores de grande porte, edifícios ou viadutos, num esquema como o da Figura 35. O campo de calibração contém pontos foto identificáveis bem definidos no solo, que foram levantados e processados separadamente. A aeronave manteve a altitude uniforme resultando na escala aproximada 1:12.000, única para toda região;

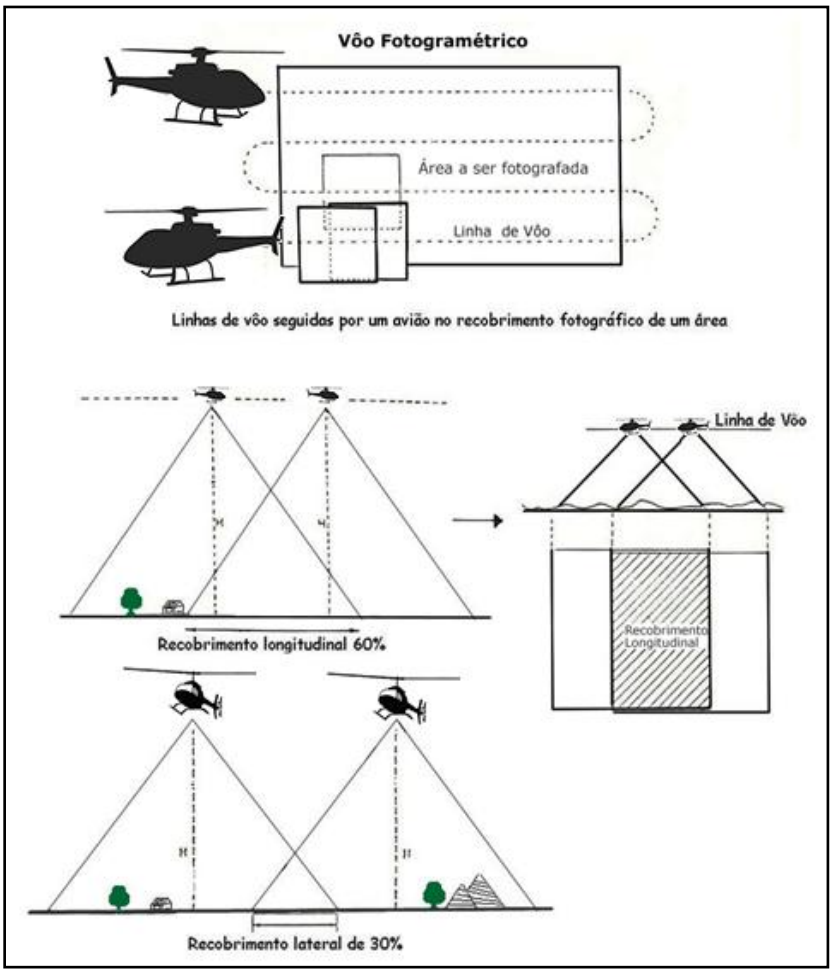


Figura 35 – Tomada aérea.

4.5.3 Apoio de Campo

Foi feito um trabalho de campo para obter pontos de controle do levantamento, principalmente as informações das coordenadas planialtimétricas dos elementos físicos sobre a superfície da Terra, naturais e artificiais. Essas coordenadas serviram para a análise de qualidade posicional dos diferentes produtos gerados.

Os pontos naturais são aqueles pontos foto-identificáveis que naturalmente estariam presentes nas fotos, sem a necessidade de uma pré-sinalização antes da realização do voo. Esses pontos ocorrem principalmente em áreas urbanas, por exemplo, em faixas de trânsito, calçadas, cruzamentos de ruas e canto de culturas em área rurais, como se ilustra nas Figuras 36 e 37.

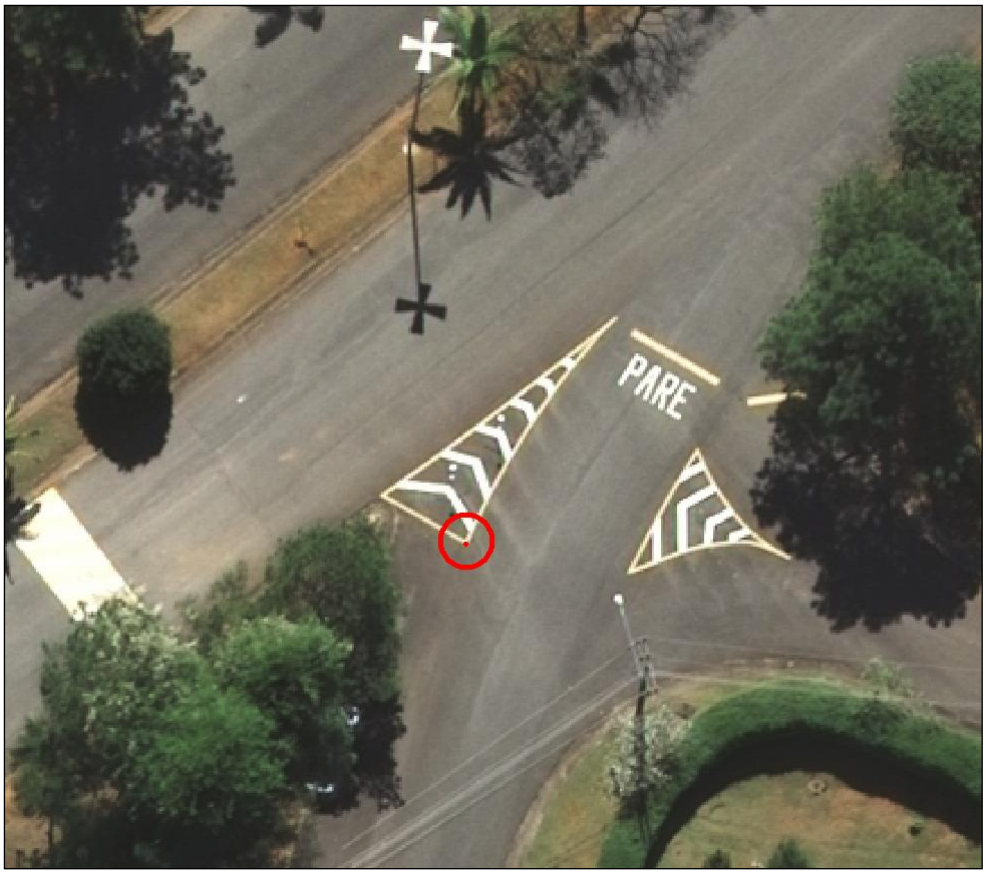


Figura 36 - PAF- Ponto de Apoio Fotogramétrico em estrutura antrópica, considerado *natural*, por não exigir pré-sinalização em campo.

Figura 37 - PAF- Ponto de Apoio Fotogramétrico *Natural*.

Os pontos artificiais são alvos em forma de figuras geométricas implantados antes da realização do vôo na superfície do local de interesse, e devem ser foto-identificáveis, e possuírem um diâmetro de 3 a 5 vezes maior que o tamanho do pixel no terreno (Figura 38).

Figura 38 – PAF- Ponto de Apoio Fotogramétrico Artificial – Pré Sinalizado.

Definidos os pontos de apoio, é feito o planejamento de ocupação desses alvos levando em consideração a precisão desejada, os equipamentos a serem usados, a logística, a equipe técnica e os veículos disponíveis. Como se sabe, o apoio é parte fundamental em um projeto, e deve ser bem executado garantindo resultados capazes de definir o sistema fotogramétrico, fornecendo subsídios para a orientação fotogramétrica como mostra a Figura 39.

Figura 39 - PAF- Ponto de Apoio Fotogramétrico.

Após o levantamento do apoio e de seu processamento, os dados foram disponibilizados no formato monográfico contendo informações relevantes como dados geográficos, a acurácia, a visualização do ponto, e croquis ou fotos para facilitar a chegada ao ponto e sua localização. A monografia contendo os dados do ponto está em inglês, pois a calibração foi realizada no Canadá, encomendada pela Fototerra, à empresa Frontier Geomatics Inc. (www.frontiergeomatics.com).

Esses pontos, ou parte deles serviram no presente trabalho, para verificar a qualidade do produto elaborado de acordo com a metodologia proposta, isto é, voo sem apoio de campo. Isso foi feito através da comparação das coordenadas

conhecidas como referência (GPS de campo) com aquelas fornecidas pelo novo método de levantamento.

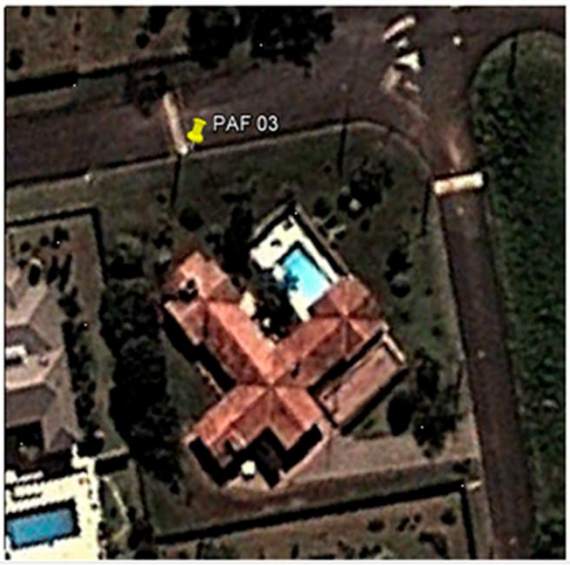
POINT AEROCONTROL PHOTOGRAMETRIC	
Name of Point : **PAP-003**	CITY/UF: **BRAGANÇA/SP**
Geodesics Coordinates Θ	
SAD - 69	**WGS - 84**
φ = 22°51'37,03086" σ = 0,001 m	Φ = 22°51'38.79170" σ = 0,001 m
λ = 46°32'10,72016" σ = 0,001 m	λ = 46°31'51.14665" σ = 0,001 m
Height Elipsoidal (h) = 835,842 m	**Height Elipsoidal (h)** = 828,404 m
Coordinates UTM	
SAD - 69	**WGS - 84**
N = 7471122,8296 m	**N** = 7471076,9374 m
E = 342984,4934 m	**E** = 342940,1126 m
MC: - 45 **Ortometric Height (H) = 831,452** m σ = 0,001 m	
Map	**Photo**
	
	Descrition: Corner of the spine.

Figura 40 - Monografia de Ponto de Apoio Fotogramétrico Natural.

Foram levantados 31 pontos com acurácia para o apoio fotogramétrico e seus dados figuram na tabela 05.

Tabela 05 - Pontos de Apoio Fotogramétrico.

Point	Longitude (wgs84)	Latitude (wgs 84)	h. (elipsoidal wgs84l)	E(m)wgs84	N(m)wgs84	N(ondulação)	H (ortometric)	Rms e	Rms n	Rms u
2	46°32'12.31703"W	22°51'41.14127"S	870,563	342337,438	7470998,394	4,38	866,183	0,001	0,001	0,001
3	46°31'51.14665"W	22°51'38.79170"S	828,404	342940,113	7471076,937	4,39	824,014	0,001	0,001	0,001
5	46°31'37.69450"W	22°51'40.46614"S	860,315	343324,077	7471029,413	4,40	855,915	0,001	0,001	0,001
6	46°32'20.99482"W	22°51'44.30563"S	871,024	342091,109	7470898,487	4,37	866,654	0,001	0,001	0,001
7	46°32'12.71510"W	22°51'53.51909"S	874,186	342330,061	7470617,569	4,38	869,806	0,001	0,001	0,002
8	46°31'51.62950"W	22°51'50.58991"S	824,505	342930,118	7470713,916	4,39	820,115	0,001	0,001	0,001
9	46°31'37.60227"W	22°51'51.24411"S	869,446	343330,140	7470697,941	4,40	865,046	0,002	0,004	0,008
11	46°31'49.41665"W	22°51'56.07232"S	825,916	342994,941	7470545,948	4,39	821,526	0,001	0,001	0,002
12	46°31'40.54923"W	22°51'57.53812"S	865,844	343248,150	7470503,486	4,40	861,444	0,002	0,003	0,008
13	46°32'03.14272"W	22°51'48.06940"S	848,779	342601,154	7470788,028	4,38	844,399	0,001	0,001	0,001
14	46°31'43.19913"W	22°51'45.93232"S	854,567	343168,921	7470859,663	4,40	850,167	0,002	0,004	0,008
16	46°31'55.19049"W	22°52'04.93535"S	814,051	342833,206	7470271,637	4,39	809,661	0,002	0,004	0,008
17	46°32'01.14142"W	22°51'53.40322"S	850,381	342659,903	7470624,569	4,39	845,991	0,001	0,001	0,001
18	46°31'42.28797"W	22°52'06.05325"S	861,550	343201,308	7470241,071	4,40	857,150	0,003	0,005	0,007
19	46°32'22.27169"W	22°53'11.17768"S	861,071	342082,628	7468226,163	4,36	856,711	0,002	0,002	0,005
23	46°32'10.71678"W	22°51'58.55817"S	869,893	342388,633	7470463,175	4,38	865,513	0,001	0,001	0,001
24	46°32'00.25839"W	22°52'17.04896"S	831,893	342692,637	7469897,555	4,39	827,503	0,003	0,006	0,009
25	46°31'48.75095"W	22°52'11.77954"S	840,538	343018,930	7470063,036	4,39	836,148	0,002	0,004	0,008
27	46°31'58.38205"W	22°52'25.08831"S	834,782	342748,687	7469650,843	4,39	830,392	0,002	0,005	0,013
28	46°31'55.91481"W	22°52'38.93367"S	852,179	342823,433	7469225,731	4,39	847,789	0,003	0,006	0,017
29	46°31'43.04818"W	22°52'34.65514"S	796,001	343188,765	7469361,135	4,40	791,601	0,183	0,170	0,161
30	46°31'53.43934"W	22°52'58.61496"S	806,819	342900,276	7468621,123	4,39	802,429	0,003	0,008	0,013
31	46°32'02.63672"W	22°52'46.24509"S	862,120	342634,201	7468998,859	4,38	857,740	0,006	0,012	0,014
32	46°32'08.42907"W	22°52'56.14865"S	862,069	342472,297	7468692,533	4,38	857,689	0,005	0,009	0,014
33	46°31'49.50901"W	22°53'11.15664"S	792,822	343016,293	7468236,541	4,39	788,432	0,009	0,013	0,022
34	46°32'14.51044"W	22°52'45.73153"S	861,119	342295,641	7469011,127	4,37	856,749	0,001	0,001	0,003
35	46°31'58.51994"W	22°53'03.94612"S	841,164	342757,192	7468455,646	4,38	836,784	0,006	0,015	0,019
36	46°32'13.76883"W	22°53'01.43151"S	886,048	342321,815	7468528,460	4,37	881,678	0,005	0,009	0,014
37	46°31'44.98885"W	22°52'43.63976"S	796,758	343136,324	7469084,220	4,39	792,368	0,003	0,008	0,012
38	46°32'22.77001"W	22°51'34.17127"S	878,282	342037,256	7471209,663	4,37	873,912	0,001	0,001	0,002
39	46°31'28.58155"W	22°51'41.58009"S	894,522	343584,180	7470997,839	4,41	890,112	0,018	0,022	0,045

Nesta tabela 05, a primeira coluna contém a identificação do ponto e na sequência suas coordenadas geodésicas, longitude, latitude e a altura elipsoidal. A seguir estão as coordenadas planas UTM (E e N). Na sétima coluna está a ondulação geoidal obtida com MAPGEO10 e na oitava coluna, a altura ortométrica (H) de cada ponto. E nas últimas três colunas, o desvio padrão nas três coordenadas (E, N e H) de cada ponto.

CAPÍTULO 05

PROCESSAMENTO DOS DADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Após o levantamento aéreo realizado no dia 14 de setembro de 2011, os dados foram copiados, como usual, através de um sistema de Backup para garantir a segurança dos dados. Os dados gerados no levantamento foram:

- Imagens brutas no formato *.raw;
- Dados do sistema inercial e do GNSS;

A seguir descreve-se o processamento dos diversos dados:

5.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS DO SISTEMA INERCIAL

Os dados GNSS e do Inercial foram descarregados do equipamento na volta da missão, as efemérides precisas (13 dias depois) foram obtidas (baixadas) via internet através do site do NOAA, no endereço http://www.ngs.noaa.gov/orbits/ no momento do processamento. Nesse instante o software conectou-se com esse site, que disponibilizou os dados necessários para o processamento.

Após o levantamento aéreo, no receptor do sistema INS + GNSS foi gerado um arquivo com extensão *.log. Nesse arquivo estão contidas todas as informações referentes ao voo, bem como os dados inerciais e do GNSS.

Os dados podem ser descarregados através de uma porta USB, conectando o receptor a um computador para fazer o download dos dados e direcionar os dados para a pasta desejada.

Ao iniciar o software InertialExplorer, deve-se informar o nome do projeto e o tipo de processamento que será realizado por uma das duas opções oferecidas pelo

aplicativo, ou seja, o usuário deverá informar se irá fazer uso do PPP ou se utilizará uma base terrestre de referência.

O aplicativo é simples na sua utilização, e após informar a opção desejada, sua funcionalidade é semi-automática. No caso do uso do PPP, o usuário deve indicar o local onde se encontra o arquivo *.log. O aplicativo irá transformar os dados GNSS e INS desse arquivo para o formato de linguagem do software. A seguir ele acessa automaticamente o link do IGS buscando as efemérides referentes à data do vôo; desse modo o computador que estiver realizando o processamento deverá estar conectado à internet. A Figura 41 mostra o resultado do voo e o deslocamento da aeronave.

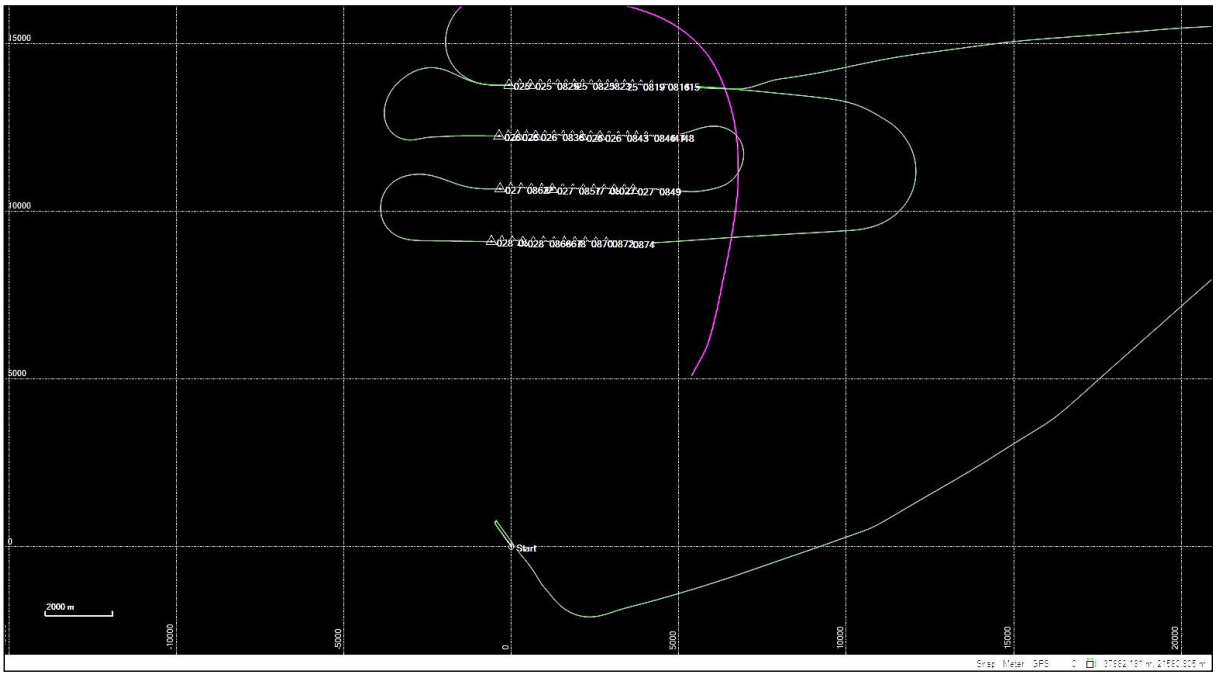


Figura 41 – Deslocamento da aeronave – Software InertialExplorer. Elaborado pelo autor.

No caso da utilização de uma base GNSS terrestre, o usuário informa o local onde os dados estão armazenados, sendo necessário informar também as coordenadas geodésicas (λ, φ e h) da estação base utilizada.

Em ambos os casos, é necessário informar o valor das correções angulares do BoreSight, o fuso, as distâncias entre o centro de fase da antena GNSS e o centro perspectivo do sensor, o sistema de projeção e o datum de saída, informações que são configuradas durante o processo. Após o processamento o software gera um relatório contendo os dados de atitude da câmara no momento da

tomada do voo, contendo a identificação das fotos (Id), o número do evento de forma seqüencial, o tempo GPS, as componentes X, Y e Z, as rotações φ, θ e κ e coordenadas geográficas de cada ponto coletado. A Tabela 06 mostra esses dados para uma faixa de voo.

Tabela 06 – Resultado do processamento da IMU. Elaborado pelo autor.

Faixa-ID	E(m)	N(m)	H(m)	Phi(Dgr)	Omega(Dgr)	Kappa(Dgr)
604_0001	291674.208	7150128.469	3953.232	-0.77759	0.67663	-85.35966
604_0002	291733.651	7149137.574	3961.007	-0.98093	-0.61296	-86.08079
604_0003	291791.372	7148148.387	3979.141	-1.32199	1.20509	-85.82852
604_0004	291870.050	7147160.279	3989.858	-0.45503	-0.41681	-85.93970
604_0005	291944.220	7146170.802	3983.429	0.34886	-0.44158	-85.80315
604_0006	292021.113	7145184.007	3985.671	0.10976	-2.42655	-86.24286
604_0007	292077.601	7144194.143	3987.493	-0.33451	-2.03927	-85.96100
604_0008	292129.872	7143202.493	3979.913	0.52648	-1.22459	-86.30161
604_0009	292195.666	7142213.370	3969.431	0.57673	1.03373	-35.69653
604_0010	292278.197	7141226.417	3963.193	0.37418	-0.68664	-86.07641
604_0011	292340.782	7140236.396	3951.562	0.38523	-0.80744	-86.06165
604_0012	292399.036	7139247.216	3951.517	-0.46077	2.62346	-85.68652
604_0013	292484.277	7138259.679	3955.545	-0.53134	1.24734	-85.98905
604_0014	292537.943	7137269.624	3948.126	0.12854	-0.71117	-86.68888
604_0015	292597.006	7136280.562	3951.136	-0.79149	3.09347	-85.88990
604_0016	292669.188	7135291.611	3954.440	-0.46486	-0.09003	-85.82662
604_0017	292742.075	7134303.728	3951.021	-0.14364	1.63323	-85.89265
604_0018	292816.019	7133313.530	3950.759	-0.12467	-2.15830	-86.28473
604_0019	292858.088	7132322.849	3949.943	-0.13723	0.77482	-85.90640
604_0020	292920.001	7131333.860	3950.560	-0.12508	1.87097	-85.69382
604_0021	293010.404	7130357.718	3948.693	0.15108	-2.46107	-86.58760
604_0022	293073.611	7129370.035	3950.115	-0.38093	-0.47980	-86.10465
604_0023	293132.719	7128388.263	3953.901	-0.32543	0.31643	-86.18574
604_0024	293195.480	7127414.264	3951.957	-0.22855	0.53776	-86.23386
604_0025	293260.241	7126443.811	3945.080	-0.00409	-0.19532	-86.03663
604_0026	293325.764	7125461.140	3967.634	-2.56733	-0.48030	-85.94844
604_0027	293390.957	7124482.958	3959.210	0.32128	-0.39165	-86.08657
604_0028	293444.120	7123493.345	3963.210	-0.40719	-1.31603	-86.11517
604_0029	293494.613	7122505.130	3965.243	-0.21108	1.34187	-85.81412
604_0030	293570.331	7121517.428	3949.708	0.83274	0.31145	-35.65380
604_0031	293652.705	7120530.460	3953.809	-0.75786	-0.00358	-85.91777
604_0032	293731.580	7119541.815	3965.987	-0.78754	-0.15159	-85.72720
604_0033	293796.514	7118552.688	3958.660	0.04259	-1.13182	-86.03180
604_0034	293857.181	7117563.985	3954.738	-0.00154	1.24469	-85.69159
604_0035	293941.913	7116575.074	3953.632	-0.42647	0.66595	-85.68716
604_0036	294034.756	7115589.286	3950.392	-0.13486	0.00724	-85.97393

Na primeira coluna temos a respectiva faixa e o número seqüencial das imagens tomadas em vôo, na seqüência temos as coordenadas E, N e H no sistema SIRGAS2000, em sistema de projeção UTM. Por último, a orientação de cada imagem representada pelos ângulos φ (Phi), ω (Ômega) e κ (Kappa) no exato momento da tomada aérea sincronizada com a posição. Esses dados permitem a orientação direta dos modelos fotogramétricos.

5.3 Processamento das Imagens

Outra etapa executada foi o processamento das imagens. A imagem no seu estado bruto é gerada no formato *raw para ocupar menor espaço de gravação. Por sua vez, o formato utilizado no processo de aerotriangulação é o *tif. A câmera HasselBlad disponibiliza um conversor de formato de arquivo, simples de usar.

5.4 Aerotriangulação

No mapeamento aerofotogramétrico, a aerotriangulação é uma etapa cuja precisão tem grande influência na qualidade final do trabalho. Todo o processo é fundamentado na transformação de coordenadas entre referenciais da imagem e do terreno, através da relação de coordenadas entre os sistemas através de um modelo matemático. Isso permite determinar as coordenadas de pontos fotogramétricos estando o sistema associado a um referencial geodésico, e também às coordenadas de terreno.

No presente trabalho, utilizou-se a aerotriangulação de modo a orientar as imagens digitais, permitindo a leitura das coordenadas dos pontos observados em campo, e assim gerar o produto georreferenciado (ortofoto). O processo de aerotriangulação consistiu na medição dos pontos de Gruber, nos casos em que foram utilizados pontos de apoio, e depois o ajustamento do bloco. No ajustamento da aerotriangulação obteve-se um baixo desvio padrão, como se pode ver no relatório de processamento, estando dentro do resultado esperado (Figura 42), tanto para os valores máximos como para os médios.

```
Sigma naught:     3.0 [micron] =    0.3 [pixel in level 0]

End of Post Processing: Mon Dec 22 08:41:50 2010

max  standard deviations of terrain points
        x          0.106 [meter] at point              30000478
        y          0.264 [meter] at point              20000207
        z          0.478 [meter] at point              20000207
mean standard deviations of terrain points
        x          0.052
        y          0.061
        z          0.171
```

Figura 42 – Resultado fechamento aerotriangulação.

5.5 Medição dos Pontos para Controle

Para levantar as coordenadas dos pontos observados em campo, no ambiente digital, foi necessário a utilização de uma estação fotogramétrica, em que é possível carregar as imagens orientadas advindas do processo de aerotriangulação. Uma vez carregadas as imagens, isso permite ao operador trabalhar em um ambiente 3D e obter as coordenadas (E, N e H) dos pontos desejados.

Essas coordenadas foram coletadas e serviram para comparação aos pontos levantados em campo por GNSS. A partir das diferenças obtidas, foram feitas as análises sobre os produtos gerados.

5.6 Usos do produto em Projetos

A técnica, a metodologia e o produto desenvolvidos ao longo da presente pesquisa foram utilizados no mapeamento de torres de alta tensão, linhas de transmissão e torres de telecomunicações no estado de São Paulo pela Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista – CTEEP. Os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que permitiu a determinação do posicionamento das torres.

O produto criado ainda no ambiente digital (não impresso) permite fazer simulações para criação de novas linhas. Ainda permite aos técnicos verificar as estradas de acessos e a situação das áreas das linhas e torres de transmissão, podendo, por exemplo, verificar a existência de residências não autorizadas na faixa de servidão.

Produtos similares (ortofotos na mesma escala) também vêm sendo utilizados nas companhias relacionadas da área de celulose como Aracruz Celulose e Ripasa S/A Celulose Papel, que têm utilizando quase que exclusivamente esse tipo de levantamento nas regiões Sudeste, Centro Oeste e Nordeste. A técnica e seu baixo custo permitem o revôo em intervalos temporais menores, possibilitando aos técnicos identificarem através das imagens, áreas que possuem crescimento irregular indicando problemas no solo como falta de nutrientes, irrigação insuficiente

ou mesmo a existência de minério no subsolo. O produto permite ainda uma projeção do quantitativo em metros cúbicos, para uma determinada área através de modelos matemáticos com o auxilio das ortofotocartas. Esse mapeamento também permite com um custo menor do que o processo aerofotogramétrico tradicional, um planejamento do transporte da safra, permitindo analisar acessos, caminhos e estradas principais, tornando o escoamento mais eficiente e barato.

Recentemente, os governos da Bahia e de Santa Catarina fecharam contrato para o mapeamento completo dos dois Estados com equipamento similar. **Fonte:** http://agencia.fapesp.br/11963. O trabalho utilizou-se de uma câmera digital de 22 megapixels de resolução sincronizada com o GPS e o INS sendo as imagens coletadas automaticamente a partir de um software que aciona o disparo ao passar pela posição pré determinada no plano de vôo. Pela estimativa da empresa envolvida, o projeto teve um custo de R$600 mil mais barato que o digital convencional quando analisado o combustível e operação aeroportuária em relação ao valor inicial total estimado em R$2 milhões.

CAPÍTULO 06

CONTROLE DE QUALIDADE DOS PRODUTOS GERADOS E RESULTADOS OBTIDOS

6.1 INTRODUÇÃO

A etapa final consistiu em examinar e avaliar a qualidade geométrica dos produtos através das diferenças entre os pontos de controle de campo obtidos com a utilização do GNSS e os pontos obtidos pelos 04 experimentos propostos e verificar qual deles dá o melhor resultado, para ser assim na metodologia recomendada.

O presente trabalho baseou seu controle de qualidade no Decreto nº 89.817 do dia 20 de Junho de 1984, seguindo as Normas Técnicas da Cartografia Nacional, que define que os produtos gerados obedecem ao Padrão de Exatidão Cartográfico (PEC).

Em resumo, esse Decreto estabelece que:

1 – Noventa por centro dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC Planimétrico estabelecido.

2 – Noventa por cento 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.

O PEC é um indicador estatístico de dispersão relativo a 90% de probabilidade, que define a acurácia de produtos cartográficos, e esse ponto na curva de Gauss corresponde a uma abscissa 1,6449 vezes o Erro-Padrão (PEC=1,6449*EP), e a partir dessa acurácia são classificados em A, B e C, de acordo com os critérios resumidos na Tabela 07. Os valores indicados (em mm)

devem ser multiplicados pelo módulo da escala da carta (coordenadas E, N) ou pela equidistância das curvas de nível (coordenada H).

Tabela 07 – Parâmetros para controle de qualidade geométrica.

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

Onde:

PEC = Padrão de Exatidão Cartográfica

EP = Erro padrão

Eq = equidistância das curvas de nível

Os produtos do presente trabalho foram gerados em ambiente digital, e assim, aplicou-se essa metodologia de forma análoga, isto é, supõem-se que os mesmos padrões sejam aplicáveis.

Por outro lado, pode-se aplicar também uma metodologia desenvolvida para o caso digital, o chamado PEC-PCD (Padrão de Exatidão Cartográfico dos Produtos Cartográficos Digitais), em que se verifica a Acurácia Posicional Absoluta (APA) e a Exatidão Cartográfica (EC).

Trata-se da Especificação Técnica para Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais (ET-PCDG), elaborado pelo Departamento de Ciência e Tecnologia do Exército Brasileiro. Esta foi inspirada no Decreto nº 89.817 e estabelece 4 classes (“A”, “B”, “C” e “D”), com base nos trabalhos de Merchant (1982), ASPRS (1989) e Ariza (2002), que vem resumidas na Tabela 08, que apresenta o PEC-PCD Planimétrico e o EP das diversas classes.

Em resumo, as classes “B”, “C” e”D” correspondem, nessa ordem, as classes “A”, “B”, “C” do PEC Planimétrico do Decreto nº 89.817, e foi criada uma nova classe, com parâmetros (limites) mais exigentes. Para evitar confusões, alguns autores mantém as classes A, B, C do decreto e denominam de classe A+, essa mais exigente.

Tabela 08 – Padrão de Exatidão Cartográfica da Planimétrica dos Produtos Cartográficos Digitais.

PEC[1]	PEC - PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
-	A[2]	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70	7,00	4,25	14,00	8,51	28,00	17,02	70,00	42,55
A	B[1]	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00	12,50	7,50	25,00	15,00	50,00	30,00	125,00	75,00
B	C[1]	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00	20,00	12,50	40,00	25,00	80,00	50,00	200,00	125,00
C	D[1]	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	25,00	15,00	50,00	30,00	100,00	60,00	250,00	150,00

Nessa tabela 08, a partir da bibliografia citada, foram definidos os valores para a classe “A+”, a classe adicional criada pela ET-PCDG.

PEC-PCD = 0,27 * Equidistância do produto cartográfico

EP = 1/6 * Equidistância do produto cartográfico

Já a Tabela 09, tirada dessa Especificação, é uma novidade, aplicando-se o PEC-PCD a Modelos Digitais de Terreno (MDT), de Elevação (MDE) e de Superfície (MDS) e para os Pontos Cotados.

Tabela 09 – Padrão de Exatidão Cartográfica da Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS.

PEC - PCD [3]	*1:1.000 (Eqd = 1 m)*		*1:2.000 (Eqd = 1 m)*		*1:5.000 (Eqd = 2 m)*		*1:10.000 (Eqd = 5 m)*		1:25.000 (Eqd = 10 m)		1:50.000 (Eqd = 20 m)		1:100.000 (Eqd = 50 m)		1:250.000 (Eqd = 100 m)	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84	2,70	1,67	5,50	3,33	13,70	8,33	27,00	16,67
B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,66	25,00	16,66	50,00	33,33
C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00

E por últimos tem-se a Tabela 10, em que o PEC-PCD Altimétrico e o EP das classes “A”, “B” e “C” correspondem às classes “A”, “B” e “C” do PEC Altimétrico previstas no Decreto nº 89.817, criando-se mais uma classe.

Tabela 10 – Padrão de Exatidão Cartográfica da Altimetria (curvas de nível) dos Produtos Cartográficos Digitais.

PEC[1]	PEC-PCD	*1:1.000 (Eqd = 1 m)*		*1:2.000 (Eqd = 1 m)*		*1:5.000 (Eqd = 2 m)*		*1:10.000 (Eqd = 5 m)*		1:25.000 (Eqd = 10m)		1:50.000 (Eqd = 20m)		1:100.000 (Eqd = 50m)		1:250.000 (Eqd = 100m)	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	A	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,67	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,67	25,00	16,67	50,00	33,33
B	B	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
C	C	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00
	D[4]	1,00	0,60	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	20,00	12,00	50,00	30,00	100,00	60,00

Para não criar confusões, resume-se o que foi visto na Tabela 11, semelhante à tabela Tabela 07, que será utilizada para a análise dos produtos.

Tabela 11 – Parâmetros para controle de qualidade geométrica.

Classe	PLANIMETRIA		ALTIMETRIA	
	PEC	EP	PEC	EP
A+	0,28 mm	0,17 mm	1/3 Eq	1/6 Eq
A	0,5 mm	0,3 mm	1/2 Eq	1/3 Eq
B	0,8 mm	0,5 mm	3/5 Eq	2/5 Eq
C	1,0 mm	0,6 mm	3/4 Eq	1/2 Eq

6.2 METODOLOGIA E PLANEJAMENTO DA APLICAÇÃO PRÁTICA

O presente capítulo descreve o planejamento da aplicação prática do trabalho.

Para a realização do experimento de validação do método e tecnologia foi escolhida uma área com uma boa quantidade de pontos fotoidentificáveis, com pouco trânsito para evitar vibrações no equipamento GPS de coleta de pontos. Para escolha do local do experimento, também se levou em consideração a proximidade do aeroporto que seria usado como base de atuação. A cidade escolhida foi Bragança Paulista, localizada na Latitude 22º57'07" Sul e Longitude 46º32'31" Oeste, altitude média de 817 metros. Sua localização no Estado de São Paulo pode ser vista na Figura 43.

Figura 43 - Bragança Paulista – SP – Local do experimento. (Fonte: www.ibge.gov.br).

De modo mais detalhado a Figura 44 mostra o local onde foram realizados os testes detalhados a seguir nesse trabalho.

Figura 44 – Campo de Prova - Bragança Paulista - SP. (Fonte: GoogleEarth).

O levantamento aéreo foi realizado pela empresa de aerolevantamento Fototerra Atividades de Aerolevantamentos Ltda, com sede na cidade de São Paulo.

A Fototerra é uma empresa especializada em sensores aerotransportados que trabalha em diversos segmentos de imageamento aéreo como sistema LIDAR, Hiperespectral, RGB e Infra-Vermelho (www.fototerra.com.br). Para avaliar a qualidade do produto gerado com a utilização de uma câmera não métrica de pequeno formato no aerolevantamento foi feito um vôo com helicóptero tomando os cuidados habituais como horário de vôo entre 10:00 h e 14:00 h, condição climática favorável sem nuvens ou chuva e um local favorável à identificação de pontos no terreno. Se não houvesse tal tipo de pontos seria necessário realizar uma pré-sinalização, isto é, demarcar em campo, antes do vôo, figuras geométricas (circulos, quadrados e triângulos), podendo ser elaborado com materiais como placas de alúminio ou cal de cor branca para que se destaque na imagem.

A sequência de operações, desenvolvida para os testes, vem resumida no fluxograma da Figura 45, havendo na realidade, 04 experimentos envolvidos, como indica nessa figura e se detalha mais adiante, para poder efetuar as comparações e testes da metodologia proposta.

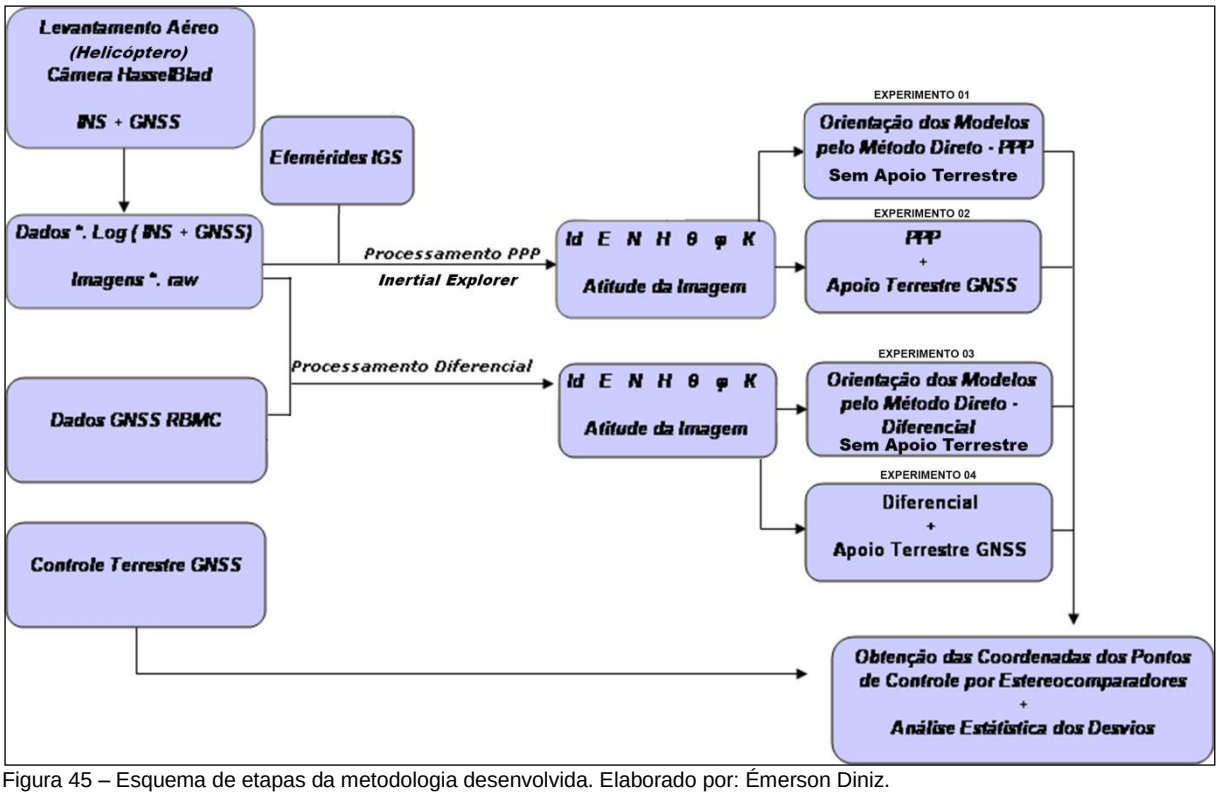


Figura 45 – Esquema de etapas da metodologia desenvolvida. Elaborado por: Émerson Diniz.

O conjunto de testes iniciou-se com o levantamento aéreo. Após o sobrevôo, foram obtidos os dados brutos das imagens *(*.raw*)* e os dados de navegação

(*INS+GNSS*). Em paralelo foi realizado o levantamento de pontos de controle terrestre por GNSS, método diferencial, utilizando a Estação Poli para obter as coordenadas desses pontos de controle do produto na área de interesse.

Para o processamento dos dados de navegação, foram utilizados dois processos. No primeiro deles foi utilizado o método PPP, utilizando as efemérides precisas, e no segundo caso, um processamento diferencial utilizando a RBMC.

Com os dados levantados e processados, foram realizados os seguintes experimentos:

Experimento 01: Foram utilizados os dados do processamento PPP (posição do ponto principal e atitude da imagem) para orientar os modelos no ambiente 3D. Também foi gerada uma nuvem de pontos altimétricas (DSM) e com isso foi obtida uma ortofoto com 0,20cm de resolução, valor possível devido à escala de vôo que foi 1:12.000 e a resolução (quantidade de pontos por polegadas) do sensor, permitindo uma ampliação de 6 vezes;

Experimento 02: Nesse experimento foram utilizados pontos, em adição ao PPP, de apoio de campo com o intuito de verificar como se comportam os modelos orientados a partir dos dados PPP (Experimento 01), com a inserção de pontos com coordenadas conhecidas, permitindo assim analisar se há ou não uma melhora nos resultados. Com os dados carregados, foi gerada uma nuvem de pontos altimétricos (DSM – Modelo digital de superfície) e com isso foi possível produzir uma ortofoto, no caso, com 0,20cm de resolução;

Experimento 03: Nesse caso foram utilizados somente os dados do processamento pelo método diferencial utilizando a Estação POLI da RBMC - para orientar os modelos no ambiente digital 3D. Com os dados carregados, foi gerada uma nuvem de pontos altimétricos (DSM) e com isso foi obtida uma ortofoto com 0,20cm de resolução;

Experimento 04: Nesse caso foram inseridos pontos de apoio com o intuito de verificar como se comportam os modelos orientados a partir dos dados do processamento pelo método diferencial (experimento 03), no ambiente digital 3D com a inserção de pontos com coordenadas conhecidas permitindo assim analisar se há uma melhora nos resultados. Com os dados carregados, foi gerada uma nuvem de pontos altimétricas (DSM) e com isso foi obtido uma ortofoto com 0,20cm de resolução, como nos casos anteriores.

Com os dados levantados foi possível realizar a verificação da média e do desvio padrão nos pontos escolhidos, e assim fazer uma análise estatística dos resultados dos diferentes experimentos e avaliar a solução proposta.

O vôo foi apoiado com sistema INS + GNSS integrado. Com os dados do vôos, foram realizados dois processamentos. O primeiro utilizando os dados do vôo e os dados do IGS (correção do relógio, correção da rotação da terra, modelo ionosférico e efemérides precisas) realizando a obtenção da atitude das imagens por PPP, com dados já precisos, 13 dias após a realização do levantamento.

A segunda opção de processamento foi o método diferencial utilizando os dados GNSS da estação POLI da RBMC, obtendo-se também as atitudes das imagens. Cada processamento gerou um relatório final com a atitude de cada foto tirada em campo. A Tabela 12 mostra um trecho.

Tabela 12 – Relatório final de ambos processamentos. Elaborado por: Émerson Diniz.

Faixa-ID	E(m)	N(m)	H(m)	Phi(Dgr)	Omega(Dgr)	Kappa(Dgr)
604_0001	291674.208	7150128.469	3953.232	-0.77759	0.67663	-85.35966
604_0002	291733.651	7149137.574	3961.007	-0.98093	-0.61296	-86.08079
604_0003	291791.372	7148148.387	3979.141	-1.32199	1.20509	-85.82852
604_0004	291870.050	7147160.279	3989.858	-0.45503	-0.41681	-85.93970
604_0005	291944.220	7146170.802	3983.429	0.34886	-0.44158	-85.80315
604_0006	292021.113	7145184.007	3985.671	0.10976	-2.42655	-86.24286
604_0007	292077.601	7144194.143	3987.493	-0.33451	-2.03927	-85.96100
604_0008	292129.872	7143202.493	3979.913	0.52648	-1.22459	-86.30161
604_0009	292195.666	7142213.370	3969.431	0.57673	1.03373	-85.69653
604_0010	292278.197	7141226.417	3963.193	0.37418	-0.68664	-86.07641
604_0011	292340.782	7140236.396	3951.562	0.38523	-0.80744	-86.06165
604_0012	292399.036	7139247.216	3951.517	-0.46077	2.62346	-85.68652
604_0013	292484.277	7138259.679	3955.545	-0.53134	1.24734	-85.98905
604_0014	292537.943	7137269.624	3948.126	0.12854	-0.71117	-86.68888
604_0015	292597.006	7136280.562	3951.136	-0.79149	3.09347	-85.88990
604_0016	292669.188	7135291.611	3954.440	-0.46486	-0.09003	-85.82662
604_0017	292742.075	7134303.728	3951.021	-0.14364	1.63323	-85.89265
604_0018	292816.019	7133313.530	3950.759	-0.12467	-2.15830	-86.28473
604_0019	292858.088	7132322.849	3949.943	-0.13723	0.77482	-85.90640
604_0020	292920.001	7131333.860	3950.560	-0.12508	1.87097	-85.69382
604_0021	293010.404	7130357.718	3948.693	0.15108	-2.46107	-86.58760
604_0022	293073.611	7129370.035	3950.115	-0.38093	-0.47980	-86.10465
604_0023	293132.719	7128388.263	3953.901	-0.32543	0.31643	-86.18574
604_0024	293195.480	7127414.264	3951.957	-0.22855	0.53776	-86.23386
604_0025	293260.241	7126443.811	3945.080	-0.00409	-0.19532	-86.03663
604_0026	293325.764	7125461.140	3967.634	-2.56733	-0.48030	-85.94844
604_0027	293390.957	7124482.958	3959.210	0.32128	-0.39165	-86.08657
604_0028	293444.120	7123493.345	3963.210	-0.40719	-1.31603	-86.11517
604_0029	293494.613	7122505.130	3965.243	-0.21108	1.34187	-85.81412
604_0030	293570.331	7121517.428	3949.708	0.83274	0.31145	-85.65380
604_0031	293652.705	7120530.460	3953.809	-0.75786	-0.00358	-85.91777
604_0032	293731.580	7119541.815	3965.987	-0.78754	-0.15159	-85.72720
604_0033	293796.514	7118552.688	3958.660	0.04259	-1.13182	-86.03180
604_0034	293857.181	7117563.985	3954.738	-0.00154	1.24469	-85.69159
604_0035	293941.913	7116575.074	3953.632	-0.42647	0.66595	-85.68716
604_0036	294034.756	7115589.286	3950.392	-0.13486	0.00724	-85.97393

6.3 ANÁLISE DOS PRODUTOS

Como descrito anteriormente na metodologia, foram utilizadas como referência as coordenadas do levantamento realizado com GNSS em campo (método relativo), comparando com esse padrão as coordenadas dos produtos obtidos, fazendo assim a avaliação de cada um deles (ortofotocartas geradas).

Os produtos gerados e analisados foram produzidos através do processo de aerotriangulação, utilizando as coordenadas dos centros perspectivos. Entretanto, essas coordenadas podem ser obtidas de diferentes maneiras, gerando quatro produtos com diferentes precisões, que foram comparados entre si, para gerar as recomendações de uso.

Em resumo, são quatro diferentes produtos em termos de precisão:

Experimento 01 – PPP, sem apoio terrestre. Na aerotriangulação foram utilizadas as coordenadas dos centros perspectivos obtidas por PPP, sem a utilização de apoio terrestre;

Experimento 02 – PPP com a utilização adicional de apoio terrestre. Na aerotriangulação foram utilizadas as coordenadas dos centros perspectivos obtidas por PPP e com a utilização adicional de apoio terrestre;

Experimento 03 – RBMC como apoio. Na aerotriangulação foram utilizadas as coordenadas dos centros perspectivos obtidas com uso da RBMC em conjunto com os dados do GPS da aeronave, sem a utilização de apoio terrestre; e

Experimento 04 – RBMC e outros apoios terrestres. Na aerotriangulação foram utilizadas as coordenadas dos centros perspectivos obtidas com uso de RBMC e com a utilização adicional de apoio terrestre.

Em paralelo, foram levantadas, com GPS, as coordenadas de 12 pontos de controle em campo, para poder auferir a precisão de cada produto.

Após a realização das 4 aerotriangulações pelos processos acima descritos e geração ortofoto-cartas, foi realizada a leitura, em cada produto, das coordenadas dos pontos correspondentes aos levantados em campo. Os resultados são apresentados a seguir.

6.4 EXPERIMENTO 01 - PPP SEM A UTILIZAÇÃO DE BASE NEM APOIO TERRESTRE

O primeiro teste consistiu na obtenção da posição e atitudes do centro perspectivo das imagens em cada tomada, pelo método direto a partir da utilização do PPP sem a utilização de bases e nem pontos GNSS no terreno, mas só com as

efemérides precisas (13 dias depois). Com esses valores, os estereopares foram orientados e foram obtidas as coordenadas dos pontos de controle, previamente levantados em campo, por estereoscopia, sendo essas coordenadas comparadas com as obtidas por GPS pelo método diferencial, com uma base fixa em campo. A Tabela 13 apresenta os resultados.

Tabela 13 - Desvios nas Componentes E, N e H - Experimento 01.

	Campo			Produto			Deltas		
Pontos	**E(m)**	**N(m)**	**H(m)**	**E(m)**	**N(m)**	**H(m)**	**ΔE (m)**	**ΔN (m)**	**ΔH (m)**
1	342940,113	7471076,937	824,014	342940,447	7471076,679	822,085	**0,334**	**-0,258**	**-1,929**
2	343330,140	7470697,941	865,046	343330,634	7470697,790	863,912	**0,494**	**-0,151**	**-1,134**
3	343248,150	7470503,486	861,444	343248,518	7470503,136	861,105	**0,368**	**-0,350**	**-0,339**
4	343168,921	7470859,663	850,167	343169,319	7470859,433	849,283	**0,398**	**-0,230**	**-0,884**
5	342659,903	7470624,569	845,991	342659,478	7470624,471	845,365	**-0,425**	**-0,098**	**-0,626**
6	342388,633	7470463,175	865,513	342388,69	7470463,45	865,115	**0,060**	**0,273**	**-0,398**
7	343018,930	7470063,036	836,148	343018,609	7470063,148	834,328	**-0,321**	**0,112**	**-1,820**
8	342823,433	7469225,731	847,789	342823,765	7469225,249	847,536	**0,332**	**-0,482**	**-0,253**
9	342900,276	7468621,123	802,429	342900,635	7468620,820	803,297	**0,359**	**-0,303**	**0,868**
10	342472,297	7468692,533	857,689	342472,650	7468692,404	857,937	**0,353**	**-0,129**	**0,248**
11	342295,641	7469011,127	856,749	342295,657	7469011,266	856,135	**0,016**	**0,139**	**-0,614**
12	342321,815	7468528,460	881,678	342322,202	7468528,177	883,356	**0,387**	**-0,283**	**1,678**
Média							**0,196**	**-0,146**	**-0,433**
Desvio Padrão							**0,299**	**0,222**	**1,026**

Nessa tabela 13 a primeira coluna identifica os pontos de controle. Foram planejados mais pontos, entretanto, alguns desses tiveram problema em seu processamento, e não foram utilizados. A seguir vêm as colunas de ΔE, ΔN e ΔH.

A Tabela 14 a seguir resume a análise estatística planimétrica e altimétrica para o experimento 01.

Tabela 14 – Análise estatística planimétrica/altimétrica - Experimento 01.

Estatísticas	Este	Norte	Altitude (m)
nº pontos	12	12	12
média	-0,196	0,1465	0,4336
desvio	0,2998	0,2226	1,0261
variância	0,090	0,050	1,053
RMS	0,3631	0,2701	1,1216
máximo	0,425	0,482	1,929
mínimo	-0,494	-0,275	-1,678
curtose	2,4272	1,9753	2,4016
assimetria	1,0085	-0,4616	-0,4232
soma	0,989	0,545	5,203

Foram feitas algumas simulações para verificar em qual escala o produto gerado atende a qualidade exigida pelo padrão de exatidão cartográfica e seu erro padrão tolerado mostrado na tabela 15.

Tabela 15 – Padrão do PEC e EP planimétrica - Experimento 01.

Classe	PEC (m) 1:1000	PEC (m) 1:2000	PEC (m) 1:2500	EP (m) 1:1000	EP (m) 1:2000	EP (m) 1:2500
A+	0,280	0,560	0,700	0,170	0,340	0,425
A	0,500	1,000	1,250	0.300	0,600	0,750
B	0,800	1,600	2,000	0,500	1,000	1,250
C	1,000	2,000	2,500	0,600	1,200	1,500

Foram feitos os cálculos, examinando as 3 últimas colunas da Tabela 11 e dividindo pelo módulo das escalas 1:1000, 1:2000 e 1:2500 e verificando a porcentagem de pontos que excede o PEC. Se inferior a 90% não atende à norma brasileira (Decreto nº 89.817), sendo esse teste o principal foco desse trabalho.

Do mesmo modo que na planimetria, foram feitas algumas simulações para verificar em qual escala o produto gerado atende a qualidade exigida para a altimetria.

O resultado vem na Tabela 16. Essa tabela vai dizer para cada escala, se cada uma das 2 coordenadas é aprovada ou não e a última coluna indica se o produto passou nos dois testes.

Tabela 16 – Classificação do produto planimétrico - Experimento 01.

Classe	90% Pontos < PEC 1:1000		90% Pontos < PEC 1:2000	
A+	16% E 66% N	Reprovado	100% E 100% N	Aprovado
A	100% E 100% N	Aprovado	100% E 100% N	Aprovado
B	100% E 100% N	Aprovado	100% E 100% N	Aprovado
C	100% E 100% N	Aprovado	100% E 100% N	Aprovado

Na tabela 17 a seguir está a classificação do produto do experimento 01 para a altimetria conforme a escala o produto gerado atende a qualidade exigida pelo padrão de exatidão cartográfica.

Tabela 17 — Classificação do produto altimétrico - Experimento 01.

Classe	90% Pontos < PEC 1:1000		90% Pontos < PEC 1:2000		90% Pontos < PEC 1:2500		90% Pontos < PEC 1:3000		90% Pontos < PEC 1:3500		90% Pontos < PEC 1:4000	
A+	16%	Reprovado	33%	Reprovado	50%	Reprovado	50%	Reprovado	66%	Reprovado	66%	Reprovado
A	33%	Reprovado	33%	Reprovado	75%	Reprovado	75%	Reprovado	83%	Reprovado	100%	Aprovado
B	33%	Reprovado	75%	Reprovado	75%	Reprovado	83%	Reprovado	100%	Aprovado	100%	Aprovado
C	50%	Reprovado	75%	Reprovado	91%	Aprovado	100%	Aprovado	100%	Aprovado	100%	Aprovado

90% Pontos < PEC 1:4500		90% Pontos < PEC 1:5000		90% Pontos < PEC 1:7000	
75%	Reprovado	75%	Reprovado	91%	Aprovado
100%	Aprovado	100%	Aprovado	100%	Aprovado
100%	Aprovado	100%	Aprovado	100%	Aprovado
100%	Aprovado	100%	Aprovado	100%	Aprovado

Existe uma diferença entre exatidão (acurácia) e precisão. A precisão é baseada na dispersão das observações em torno do valor médio, enquanto a acurácia é referente o quão próximo se está do valor real, sem a influência de erros sistemáticos. Galo (1994)

Desse modo foi realizado uma análise de tendência baseado em Merchant (1982).

O teste t é um teste de hipótese.

1) Calcula-se um t, onde temos:

Média $m = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$ =

Desvio = $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - m)^2}$

Sendo: **t =** $\frac{m}{\sigma}\sqrt{n}$

2) Compara-se com um valor tabelado função de alpha (0,90/0,10) e de n

3) Se abaixo, OK, não há tendência; se acima, existe.

De igual maneira foi realizado um teste de precisão (qui-quadrado), que consiste em calcular um qui-quadrado para a distribuição e comparar com um limite

tabelado. Caso o valor obtido estiver na região de aceitação da hipótese nula, aceita-se o resultado. O teste estatístico é dado por:

$$\chi_X^2 = (n-1).\frac{\sigma_{\Delta X}^2}{\sigma_{PEC}^2}$$

O resultado é mostrado na tabela 18 e 19 para a planimetria:

Tabela 18 – Teste de tendência planimétrico - Experimento 01.

Coordenada	t tabela	t calculado	Resultado
E	1,79	-2,26	Existe erro sistemático
N	1,79	2,27	Existe erro sistemático

Tabela 19 – Teste de Qui-quadrado Planimétrico - Experimento 01.

Classe	X² tab	X² E 1:1000	X² N 1:1000	Resultado	X² tab 1:2000	X² E 1:2000	X² N 1:2000	Resultado
A+	17,3	68,4	37,7	Reprovado	17,3	17,1	9,4	Aprovado
A		21,9	12,1	Reprovado		5,4	3,0	Aprovado
B		7,9	4,3	Aprovado		1,9	1,0	Aprovado
C		5,4	3,0	Aprovado		1,3	0,7	Aprovado

Nas tabelas 20 e 21 estão os resultados dos testes de tendência t e qui-quadrado para a altimetria.

Tabela 20 – Teste de tendência altimétrico - Experimento 01.

Coordenada	t tabela	t calculado	Resultado
H	1,79	1,46	Sem erro sistemático

Tabela 21 – Teste de Qui-quadrado altimétrico - Experimento 01.

Classe	X² tab	X² H 1:1000	Resultado	X² H 1:2000	Resultado
A+	17,3	416,7	Reprovado	104,2	Reprovado
A		104,2	Reprovado	26,0	Reprovado
B		72,3	Reprovado	18,0	Reprovado
C		46,3	Reprovado	11,5	Aprovado

X² H 1:3000	Resultado	X² H 1:4000	Resultado	X² H 1:5000	Resultado
46,3	Reprovado	26,0	Reprovado	16,6	Aprovado
11,5	Aprovado	6,5	Aprovado	4,1	Aprovado
8,0	Aprovado	4,5	Aprovado	2,8	Aprovado
5,1	Aprovado	2,8	Aprovado	1,8	Aprovado

Em resumo, o produto (01) atende ao usuário, que pedia classe A na Escala 1:2.000 (Tabela 16), mas somente em planimetria. Não atende em altimetria pelo teste da Norma Brasileira, pois passaria pelo teste χ^2. Essa discrepância deve-se ao tamanho da amostra.

Deve-se lembrar que, em qualquer dos experimentos, a tendência pode ser eliminada, correspondendo a um ajuste do produto.

6.5 EXPERIMENTO 02 - PPP COM A UTILIZAÇÃO DE APOIO TERRESTRE

O segundo experimento incluiu a realização da orientação dos pares estereoscópicos pelo método indireto com a inserção de 15 pontos de apoio de campo. Como no caso anterior, foram coletadas as coordenadas de 12 pontos de controle por estereoscopia, e o resultado está na Tabela 22:

Tabela 22 - Desvios nas Componentes E, N e H - Experimento 02.

	Campo			Produto			Deltas		
Pontos Verificados	**E(m)**	**N(m)**	**H(m)**	**E(m)**	**N(m)**	**E(m)**	**ΔE (m)**	**ΔN (m)**	**ΔH (m)**
1	342940,113	7471076,937	824,014	342940,135	7471076,361	824,014	0,022	-0,576	0,000
2	343330,140	7470697,941	865,046	343330,681	7470697,810	865,046	0,541	-0,131	0,000
3	343248,150	7470503,486	861,444	343248,707	7470503,298	861,291	0,557	-0,188	-0,153
4	343168,921	7470859,663	850,167	343169,274	7470859,524	850,015	0,353	-0,139	-0,152
5	342659,903	7470624,569	845,991	342659,377	7470624,578	845,956	-0,526	0,009	-0,035
6	342388,633	7470463,175	865,513	342388,807	7470463,215	865,520	0,174	0,040	0,007
7	343018,930	7470063,036	836,148	343019,013	7470063,161	835,179	0,083	0,125	-0,969
8	342823,433	7469225,731	847,789	342823,362	7469225,549	847,867	-0,071	-0,182	0,078
9	342900,276	7468621,123	802,429	342900,187	7468620,864	802,509	-0,089	-0,259	0,080
10	342472,297	7468692,533	857,689	342472,572	7468692,596	859,444	0,275	0,063	1,755
11	342295,641	7469011,127	856,749	342295,934	7469011,235	857,350	0,293	0,108	0,601
12	342321,815	7468528,460	881,678	342322,095	7468528,320	884,759	0,280	-0,140	3,081
Média							**0,157**	**-0,105**	**0,357**
Desvio Padrão							**0,301**	**0.195**	**1.061**

A seguir segue a realização da análise estatística de cada componente (Tabela 23).

Análise estatística planimétrica:

Tabela 23 – Análise estatística nas Componentes E, N e H - Experimento 02.

Estatísticas	Este	Norte	Altitude (m)
nº pontos	12	12	12
média	-0,1577	0,1058	-0,3578
desvio	0,301	0,1959	1,0616
variância	0,091	0,038	1,127
RMS	0,3431	0,2249	1,1254
máximo	0,526	0,576	0,969
mínimo	-0,557	-0,125	-3,081
curtose	2,7857	3,163	4,0762
assimetria	0,6607	0,8546	-1,3998
soma	0,996	0,422	-4,293

Tabela 24 – Classificação do produto planimétrico - Experimento 02.

Classe	90% Pontos < PEC 1:1000		90% Pontos < PEC 1:2000	
A+	50% E 91% N	Reprovado	100% E 91% N	Aprovado
A	91% E 91% N	Aprovado	100% E 100% N	Aprovado
B	100% E 100% N	Aprovado	100% E 100% N	Aprovado
C	100% E 100% N	Aprovado	100% E 100% N	Aprovado

Tabela 25 – Classificação do produto altimétrico - Experimento 02.

Classe	90% Pontos < PEC 1:2000		90% Pontos < PEC 1:2500		90% Pontos < PEC 1:3500		90% Pontos < PEC 1:4000	
A+	66%	Reprovado	75%	Reprovado	75%	Reprovado	83%	Reprovado
A	83%	Reprovado	83%	Reprovado	83%	Reprovado	91%	Aprovado
B	83%	Reprovado	83%	Reprovado	91%	Aprovado	91%	Aprovado
C	83%	Reprovado	91%	Aprovado	91%	Aprovado	91%	Aprovado

90% Pontos < PEC 1:6500	
91%	Aprovado
100%	Aprovado
100%	Aprovado
100%	Aprovado

Tabela 26 – Teste de tendência planimétrico - Experimento 02.

Coordenada	t tabela	t calculado	Resultado
E	1,79	-1,81	Existe erro sistemático
N	1,79	1,87	Existe erro sistemático

Tabela 27 – Teste de Qui-quadrado Planimétrico - Experimento 02.

Classe	X² tab	X² E 1:1000	X² N 1:1000	Resultado	X² E 1:2000	X² N 1:2000	Resultado
A+	17,3	68,9	29,2	Reprovado	17,2	7,3	Aprovado
A		22,1	9,3	Reprovado	5,5	2,3	Aprovado
B		7,9	3,3	Aprovado	1,9	0,8	Aprovado
C		5,5	2,3	Aprovado	1,3	0,5	Aprovado

Tabela 28 – Teste de tendência altimétrico - Experimento 02.

Coordenada	t tabela	t calculado	Resultado
H	-1,79	-1,65	Sem erro sistemático

Tabela 29 – Teste de Qui-quadrado altimétrico - Experimento 02.

Classe	X² tab	X² H 1:1000	Resultado	X² H 1:2000	Resultado	X² H 1:3000	Resultado	X² H 1:6000	Resultado
A+	17,3	446,1	Reprovado	111,5	Reprovado	49,5	Reprovado	12,3	Aprovado
A		111,5	Reprovado	27,8	Reprovado	12,3	Aprovado	3,0	Aprovado
B		77,4	Reprovado	19,3	Reprovado	8,6	Aprovado	2,1	Aprovado
C		49,5	Reprovado	12,3	Aprovado	5,5	Aprovado	1,3	Aprovado

Em resumo, esse produto (02) atende ao usuário em planimetria, mas não em altimetria, em função da Norma Brasileira; mas passaria pelo teste χ^2. Essa discrepância deve-se ao tamanho da amostra. Pela porcentagem de reprovação vê-se que bastaria eliminar um ponto para que ultrapassasse os 90% da NB (11/12*100% = 91,7%).

6.6 EXPERIMENTO 03 - ESTAÇÃO RBMC SEM A UTILIZAÇÃO DE APOIO TERRESTRE ADICIONAL

O terceiro experimento serviu-se de uma estação da RBMC, utilizando-se do método diferencial para o processamento dos dados INS + GNSS do helicóptero, sem utilizar nenhum ponto de apoio terrestre suplementar. Após o processamento com as imagens orientadas, foram coletadas as coordenadas dos 12 pontos de controle. O resultado figura na Tabela 30.

Tabela 30 - Desvios nas Componentes E, N e H - Experimento 03.

	Campo			Produto			Deltas		
Pontos Verificados	**E(m)**	**N(m)**	**H(m)**	**E(m)**	**N(m)**	**H(m)**	**ΔE (m)**	**ΔN (m)**	**ΔH (m)**
1	342940,113	7471076,937	824,014	342942,070	7471080,622	820,319	**1,957**	**3,685**	**-3,695**
2	343330,140	7470697,941	865,046	343333,781	7470699,926	868,180	**3,641**	**1,985**	**3,134**
3	343248,150	7470503,486	861,444	343251,768	7470499,936	864,413	**3,618**	**-3,550**	**2,969**
4	343168,921	7470859,663	850,167	343172,289	7470855,433	846,319	**3,368**	**-4,230**	**-3,848**
5	342659,903	7470624,569	845,991	342665,328	7470626,667	849,659	**5,425**	**2,098**	**3,668**
6	342388,630	7470463,200	865,513	342391,240	7470466,400	869,402	**2,610**	**3,234**	**3,889**
7	343018,930	7470063,036	836,148	343022,145	7470065,294	839,128	**3,215**	**2,258**	**2,980**
8	342823,433	7469225,731	847,789	342826,545	7469228,931	852,319	**3,112**	**3,200**	**4,53**
9	342900,276	7468621,123	802,429	342903,472	7468623,806	806,297	**3,196**	**2,683**	**3,868**
10	342472,297	7468692,533	857,689	342474,282	7468695,498	861,546	**1,985**	**2,965**	**3,857**
11	342295,641	7469011,127	856,749	342299,295	7469013,521	852,835	**3,654**	**2,394**	**-3,914**
12	342321,815	7468528,460	881,678	342325,193	7468531,343	886,356	**3,378**	**2,883**	**4,678**
Média							**-3.263**	**-1.630**	**-1.843**
Desvio Padrão							**0.900**	**2.630**	**3.455**

A seguir segue a realização da análise estática de cada componente com o uso da RBMC sem a utilização de apoio.

Análise estatística planimétrica e altimétrica (Tabela 31):

Tabela 31 – Análise estatística nas Componentes E, N e H - Experimento 03.

Estatísticas	Este	Norte	Altitude (m)
nº pontos	12	12	12
média	-3,2632	-1,6309	-1,843
desvio	0,9003	2,6304	3,4557
variância	0,811	6,919	11,942
RMS	3,5252	3,1338	3,9556
máximo	-1,957	4,23	3,914
mínimo	-5,425	-3,685	-4,678
curtose	3,5089	3,3731	1,9124
assimetria	-0,6469	1,4545	0,9423
soma	8,915	76,109	-22,116

Tabela 32 – Classificação do produto planimétrico - Experimento 03.

Classe	90% Pontos < PEC 1:3500		90% Pontos < PEC 1:4000		90% Pontos < PEC 1:4500		90% Pontos < PEC 1:5000	
A	100% E 83% N	Reprovado	100% E 83% N	Reprovado	100% E 83% N	Reprovado	100% E 83% N	Reprovado
B	100% E 83% N	Reprovado	100% E 83% N	Reprovado	100% E 91% N	Aprovado	100% E 91% N	Aprovado
C	100% E 83% N	Reprovado	100% E 91% N	Aprovado	100% E 100% N	Aprovado	100% E 100% N	Aprovado

90% Pontos < PEC 1:6500		90% Pontos < PEC 1:7000		90% Pontos < PEC 1:7500	
100% E 83% N	Reprovado	100% E 83% N	Reprovado	100% E 91% N	Aprovado
100% E 100% N	Aprovado	100% E 100% N	Aprovado	100% E 100% N	Aprovado
100% E 100% N	Aprovado	100% E 100% N	Aprovado	100% E 100% N	Aprovado

Tabela 33 – Classificação do produto altimétrico - Experimento 03.

Classe	90% Pontos < PEC 1:7500		90% Pontos < PEC 1:8000		90% Pontos < PEC 1:8500		90% Pontos < PEC 1:9000		90% Pontos < PEC 1:9500	
A	41%	Reprovado	83%	Reprovado	83%	Reprovado	83%	Reprovado	100%	Aprovado
B	83%	Reprovado	100%	Aprovado	100%	Aprovado	100%	Aprovado	100%	Aprovado
C	100%	Aprovado	100%	Aprovado	100%	Aprovado	100%	Aprovado	100%	Aprovado

Tabela 34 – Teste de tendência planimétrico - Experimento 03.

Coordenada	t tabela	t calculado	Resultado
E	1,79	-12,55	Existe erro sistemático
N	1,79	-2,14	Existe erro sistemático

Tabela 35 – Teste de Qui-quadrado Planimétrico - Experimento 03

Classe	X^2 tab	X^2 E 1:4500	X^2 N 1:4500	Resultado	X^2 E 1:5000	X^2 N 1:5000	Resultado	X^2 E 1:6000	X^2 N 1:6000	Resultado
A+	17,3	30,47	260,13	Reprovado	24,68	210,71	Reprovado	17,14	146,32	Reprovado
A		9,78	83,52	Reprovado	7,92	67,64	Reprovado	5,50	46,98	Reprovado
B		3,52	30,06	Reprovado	2,85	24,35	Reprovado	1,98	16,91	Aprovado
C		2,44	20,88	Reprovado	1,98	16,91	Aprovado	1,37	11,74	Aprovado

X^2 E 1:10000	X^2 N 1:10000	Resultado	X^2 E 1:17500	X^2 N 1:17500	Resultado
6,17	52,66	Reprovado	2,01	17,19	Aprovado
1,98	16,91	Aprovado	0,64	5,52	Aprovado
0,71	6,08	Aprovado	0,23	1,98	Aprovado
0,49	4,22	Aprovado	0,16	1,38	Aprovado

Tabela 36 – Teste de tendência altimétrico - Experimento 03.

Coordenada	t tabela	t calculado	Resultado
H	-1,79	-1,84	Existe erro sistemático

Tabela 37 – Teste de Qui-quadrado altimétrico - Experimento 03.

Classe	X² tab	X² H 1:5000	Resultado	X² N 1:6000	Resultado	X² H 1:7000	Resultado	X² N 1:9000	Resultado	X² N 1:17000	Resultado
A+	17,3	189,1	Reprovado	131,3	Reprovado	96,5	Reprovado	58,3	Reprovado	16,3	Aprovado
A		47,2	Reprovado	32,8	Reprovado	24,1	Reprovado	14,5	Aprovado	4,0	Aprovado
B		32,8	Reprovado	22,8	Reprovado	16,7	Aprovado	10,1	Aprovado	2,8	Aprovado
C		21,0	Reprovado	14,5	Aprovado	10,7	Aprovado	6,4	Aprovado	1,8	Aprovado

Em resumo, é um produto claramente inferior aos anteriores e não atende à precisão do usuário.

6.7 EXPERIMENTO 04 - ESTAÇÃO RBMC COM A UTILIZAÇÃO DE APOIO TERRESTRE

Este último experimento foi feito utilizando uma Estação RBMC e mais 15 pontos de apoio, e foram verificadas as coordenadas dos 12 pontos de controle. O resultado é mostrado na Tabela 38.

Tabela 38 - Desvios nas Componentes E, N e H - Experimento 04.

	Campo			**Produto**			**Deltas**		
Pontos Verificados	**E(m)**	**N(m)**	**H(m)**	**E(m)**	**N(m)**	**H(m)**	**ΔE (m)**	**ΔN (m)**	**ΔH (m)**
1	342940,113	7471076,937	824,014	342940,265	7471076,472	824,244	**0,152**	**-0,465**	**0,230**
2	343330,140	7470697,941	865,046	343330,555	7470698,255	865,231	**0,415**	**0,314**	**0,185**
3	343248,150	7470503,486	861,444	343248,607	7470503,874	861,757	**0,457**	**0,388**	**0,313**
4	343168,921	7470859,663	850,167	343169,374	7470859,958	849,715	**0,453**	**0,295**	**-0,452**
5	342659,903	7470624,569	845,991	342659,687	7470624,579	845,931	**-0,216**	**0,01**	**-0,06**
6	342388,633	7470463,175	865,513	342388,728	7470463,285	865,523	**0,095**	**0,110**	**0,010**
7	343018,930	7470063,036	836,148	343019,013	7470063,161	836,599	**0,083**	**0,125**	**0,451**
8	342823,433	7469225,731	847,789	342823,346	7469225,489	847,887	**-0,087**	**-0,242**	**0,098**
9	342900,276	7468621,123	802,429	342900,152	7468620,771	802,534	**-0,124**	**-0,352**	**0,105**
10	342472,297	7468692,533	857,689	342472,651	7468692,768	858,544	**0,354**	**0,235**	**0,855**
11	342295,641	7469011,127	856,749	342295,934	7469011,311	857,060	**0,293**	**0,184**	**0,311**
12	342321,815	7468528,460	881,678	342322,295	7468528,216	883,999	**0,480**	**-0,244**	**2,321**
Média							**0,196**	**0,030**	**0,364**
Desvio Padrão							**0,248**	**0,286**	**0,690**

A análise estática de cada componente com o uso da RBMC com a utilização de apoio está a seguir na Tabela 39.

Análise estatística planimétrica:

Tabela 39 – Análise estatística nas Componentes E e N - Experimento 04.

Estatísticas	Este	Norte	Posicional
nº pontos	12	12	12
média	-0,1962	-0,0298	0,3834
desvio	0,2476	0,2861	0,1606
variância	0,061	0,082	0,026
RMS	0,3214	0,2878	0,4315
máximo	0,216	0,465	0,5995
mínimo	-0,48	-0,388	0,1453
curtose	1,4301	1,5249	1,403
assimetria	0,3036	0,4128	-0,2293
soma	0,674	0,901	0,284

Tabela 40 – Classificação do produto planimétrico - Experimento 04.

Classe	90% pontos < PEC 1:1000	
A	100% E 100% N	Aprovado
B	100% E 100% N	Aprovado
C	100% E 100% N	Aprovado

Tabela 41 – Classificação do produto altimétrico - Experimento 04.

Classe	90% Pontos < PEC 1:1000		90% Pontos < PEC 1:2000	
A	83%	Reprovado	91%	Aprovado
B	83%	Reprovado	91%	Aprovado
C	83%	Reprovado	91%	Aprovado

Tabela 42 – Teste de tendência planimétrico - Experimento 04.

Coordenada	t tabela	t calculado	Resultado
di(E)m	1,79	-2,74	Existe erro sistemático
di(N)m	1,79	-0,36	Sem erro sistemático

Tabela 43 – Teste de Qui-quadrado planimétrico - Experimento 04.

Classe	X^2 tab	X^2 E 1:1000	X^2 N 1:1000	Resultado	X^2 E 1:2000	X^2 N 1:2000	Resultado
A+	17,3	40,6	62,3	Reprovado	11,6	15,5	Aprovado
A		14,9	20,0	Reprovado	3,7	5,0	Aprovado
B		5,3	7,2	Aprovado	1,3	1,8	Aprovado
C		3,7	5,0	Aprovado	0,9	1,2	Aprovado

Tabela 44 – Teste de tendência altimétrico - Experimento 04.

Coordenada	t tabela	t calculado	Resultado
H	1,79	-1,82	Existe erro sistemático

Tabela 45 – Teste de Qui-quadrado altimétrico - Experimento 04.

Classe	X² tab	X² H 1:1000	Resultado	X² H 1:2000	Resultado	X² H 1:4000	Resultado
A+	17,3	188,6	Reprovado	47,1	Reprovado	11,7	Aprovado
A		47,1	Reprovado	11,7	Aprovado	2,9	Aprovado
B		32,7	Reprovado	8,1	Aprovado	2,0	Aprovado
C		20,9	Reprovado	5,2	Aprovado	1,3	Aprovado

Em resumo, esse produto (04) atende às necessidades do usuário, classe A na escala 1:2.000, em altimetria e planimetria. E até atenderia um usuário que necessitasse classe A no 1:1.000, em planimetria.

6.8 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS DIFERENTES EXPERIMENTOS

Como se viu, o produto 03 (RBMC sem apoio) é claramente inferior aos demais e, portanto, não há razões para utilizar essa metodologia. O único produto que atendeu satisfatoriamente as exigências em planimetria e altimetria foi o 04 (RBMC com apoio).

Os outros dois (01 e 02, PPP sem e com apoio) são equivalentes em termos de precisão, sendo que o 01 dispensa o apoio de campo, o que o torna preferível ao 02. Assim, o produto 01 seria útil para usuários que, necessitando precisão classe A em planimetria na Escala 1:2.000, pudessem aceitar uma altimetria classe A na escala 1:4.000.

Faz-se a observação de que, observando os valores, os produtos 01 e 02, passam no teste americano X2 (atestando estatisticamente classe A na escala 1:2.000) e que não passam no teste do PEC brasileiro por só um ponto acima do limite, como se mostrou acima. Disso decorre a sugestão de, em trabalhos futuros, aumentar o tamanho da amostra, para pelo menos 20 pontos. No presente caso, isso não foi possível por terem acontecidos problemas no processamento dos pontos de verificação (não se resolveu a ambigüidade em função do comprimento da base São Paulo-Bragança: 80 km).

CAPÍTULO 07

CONCLUSÕES

Como se viu ao comentar diversas figuras, esse produto permite um grau de detalhamento que permite identificar feições de interesse para a aplicação: subestações, torres de alta tensão, as diversas linhas e todos os demais elementos.

Analogamente, pela análise dos produtos de outras aplicações, podem ser identificados elementos para uma classificação urbana com a identificação de construções, postes elétricos, árvores e orelhões por exemplo. Podem também ser utilizados em estudos de traçados de rodovias, estudos ambientais, mapeamento de dutos e outras aplicações para as quais seja suficiente a qualidade posicional apresentada pelo produto, como avaliado quanto à precisão. As encomendas de serviços nas diversas áreas mostram que os clientes estão satisfeitos com os resultados.

Dentre as opções testadas, o método que utiliza a RBMC com apoio (04) foi o que apresentou melhores resultados, contrariamente ao que se esperava, isto é, que o método PPP sem apoio (01) fosse melhor. Este tem a vantagem de não necessitar apoio de campo e por isso é mais econômico. No entanto, não se descarta esse método, do ponto de vista prático (usuários que menor necessidade em altimetria), nem se descartam testes futuros com mais pontos de controle, pois, como se mostrou, o tamanho relativamente pequeno da amostra (12 pontos) faz com que esse método seja aprovado para classe A em altimetria pelo teste do X2.

Com tudo isso, pode-se dizer que o produto (fruto de câmeras métricas de pequeno formato a bordo de helicóptero) foi validado, quanto à qualidade informativa e quanto à precisão necessária, em pelo menos uma metodologia. Foi obtido um produto que atende aos requisitos posicionais da escala 1:2.000, com boa precisão, sendo pelo menos equivalente aos produtos clássicos da aerofotogrametria.

E, pode-se dizer que o método PPP necessita de mais testes para assegurar com maior grau de confiança que atende aos requisitos (classe A, 1:1.000) em termos de altimetria.

Ou seja, esse produto é uma alternativa viável tecnicamente e de menor custo em cerca de 30% no levantamento (combustível/tempo de voo) e 90% em relação aos sensores quando comparado os valores das câmeras HasselBlad e DMC (Figura 02), para aplicações como estudos de impactos ambientais, manejo de floresta de eucaliptos, mapeamentos de culturas temporárias como cana de açúcar, e obras lineares como as apresentadas no presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR PHOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. **Manual of photogrammetry.** 5th ed. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004. 1151 p.

ASPRS - Accuracy Standards for Large Scale Maps 1989.

ARIZA, F. J. **Calidad en la Producción Cartográfica.** 1. ed. Madrid, Espanha, 2002ª. 389 p.

BARBOSA (1999)**, Geração de modelo digital do terreno por aproximações sucessivas utilizando câmaras digitais de pequeno formato.**

BLITZKOW, D.; Matos, A.C.O.C.; GUIMARÃES,G. N.; PACINO, M.C.; LAURÍA,E.A.; NUNES, M.; FLORES,F.; ECHALAR, A.; GUEVARA, N. O.; ALVAREZ, R.; HERNANDEZ, J.N (2015). **Estudios de gravedad y del modelo de cuasi-geoide para la América del Sur**. Simposio Sirgas 2015. Santo Domingos, Republica Dominicana, de 18 a 20 de Novembro de 2015.

CAMARGO, P. O. **Controle de qualidade aplicado ao filtro de Kalman, 1992.** 94p.

CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista

Departamento de Ciência e Tecnologia do Exército Brasileiro - **Especificação Técnica para Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais (ET-PCDG)**

ELLMANN, A. (2005). **SHGEO software packages – An UNB Application to Stokes-Helmert Approach for Precise Geoid Computation,** reference manual II, 43 p.

GAGNON, P-A., M BOULIANNE, J-P AGNARD, C NOLETTE and J COULOMBE. 1995. **Present status of DVP system**. Geomatica 49, 4, p 479-487.

GRÜN, A.. Semi-automated approaches to site recording and modeling. In: PROCEEDINGS OF THE 29TH INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 2000, Amsterdam. **Proceddings…** Amsterdam, 2000. p. 309-318.

HUTTON, J.; LITHOPOULOS, E.. Airborne photogrammetry using direct camera orientation measurements. **Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation**, 6, E. Schweizerbart´sche Verlagsbuchhandlung, Sttutgart, 1998. p. 363-370.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

LIMA, L. A. (2015), **Avaliação da técnica de georreferenciamento direto em mapeamento aerofotogramétrico.**

MARTINS, M. A. R. (2010)**, Geração de ortoimagens a partir de georreferenciamento digitais aéreas de pequeno formato com dados LIDAR**.

MERCHANT, D. C. (1982), **Spatial accuracy Standards for large scale maps**.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; McGLONE, J. C.. **Introduction to modern photogrammetry**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001. 479 p.

MITISHITA, E. A., JUBANSKI, J. J. e BÃHR, H. (2010)**, Análise do uso combinado de parâmetros de calibração convencionais e de calibração em serviço na aerotriangulação de aerofotos obtidas com câmera de baixo custo**.

MONICO, J. F. G.. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2000. 287 p.

Normas Técnicas da Cartografia Nacional - **Decreto Nº 89.817 de 20 de junho de 1984.**

RAMOS, A. M., HASEGAWA, J. K.. TOMMASELLI, A. M. G., GALO, M., e HENRIQUE, B. S. A. (2008), **Emprego de fotogrametria digital com imagens**

coletadas por helicópteros em apoio a determinação de linhas base das Ilhas Martim Vaz.

STOVALL (1997). **Basic Inertial Navigation**

TOMMASELLI, A. M. G.; HASEGAWA, J. K.; GALO, M.. Modernas tecnologias de aquisição de imagens em fotogrametria. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v.6, n.1, p. 49-64, 2000.

TOMMASELLI, A. M., 2004. Automação dos processos de Reconstrução e orientação de Modelos usando imagens digitais.

TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; HASEGAWA, J. K.; MENOSSI, R. C. e RUY, R. S, Fototriangulação com parâmetros adicionais para câmaras digitais: uma avaliação experimental, 2008.

WOLF, P. R. Elements of Fotogrametry, 1983.

REFERÊNCIAS CONSULTADAS

CENTENO, J. A. S.; et al.. Mapeamento da áreas permeáveis usando uma metodologia orientada a regiões e imagens de alta resolução. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n. 55/1, p. 48-56, jul. 2003.

FERREIRA, F. G. (2014), **Controle de qualidade em cartografia aplicado a modelos digitais de superfícies oriundos de sensores orbitais segundo PEC_PCD e com emprego de simulação.**

HEIPKE, C.; PAKZAD, K.; WILLRICH, F.. Integration of geodata and imagery for automatic refinement and update of spatial databases. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 58, p.127-128, 2004.

LEANDRO, R. F., M. C. SANTOS and R. B. LANGLEY (2010). **"Analyzing GNSS Data in Precise Point Positioning Software."**

RUY, R. S.. **Geração automática de estereomodelos a partir de imagens digitais georreferenciadas**. 2004. 133 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2004.

SILVA, I.; GALO, G.. Qualidade das imagens de alta resolução geradas por sensores aéreos digitais. **Revista Ambiência**, Guarapuava, v.2, Edição Especial 1, p. 43-54, 2006.