

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOMÁTICA**

**AEROTRIANGULAÇÃO POR FAIXA E EM BLOCO,  
POR APLICAÇÃO DE SOFTWARE ESPECIALISTA,  
COM MEDIÇÕES DE COORDENADAS  
FOTOGRAFICAS EM MESA DIGITALIZADORA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**André Bairros Peres**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2007**

**AEROTRIANGULAÇÃO POR FAIXA E EM BLOCO, POR  
APLICAÇÃO DE SOFTWARE ESPECIALISTA, COM  
MEDIÇÕES DE COORDENADAS FOTOGRÁFICAS EM  
MESA DIGITALIZADORA**

**por**

**André Bairros Peres**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geomática,  
Área de Concentração em Tecnologia da Geoinformação,  
da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS),  
como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Geomática.**

**Orientador: Professor Dr. José Américo de Mello Filho**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2007**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Geomática**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**AEROTRIANGULAÇÃO POR FAIXA E EM BLOCO, POR  
APLICAÇÃO DE SOFTWARE ESPECIALISTA, COM MEDIÇÕES DE  
COORDENADAS FOTOGRÁFICAS EM MESA DIGITALIZADORA**

elaborada por  
**André Bairros Peres**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Geomática**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. José Américo de Mello Filho**  
(Presidente/Orientador)

---

**Prof. Dr. Eno Darci Saatkamp**

---

**Prof. Dr. Gelson Lauro Dal' Forno**

Santa Maria, 11 de maio de 2007.

## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS, por me indicar este caminho...

Ao Professor José Américo de Mello Filho, primeiramente, pela oportunidade concedida, pela confiança depositada, pela orientação, amizade e pelo incentivo. Obrigado pela paciência e por estar sempre à disposição.

Ao Professor Argentino José Aguirre, pela co-orientação, pelo conhecimento transmitido não só durante as aulas, mas também durante todo o desenvolvimento deste e de outros trabalhos. Agradeço ao Professor pelas várias horas de estudo, pesquisa e trabalho de campo nos quais sempre esteve presente, pela paciência, incentivo, dedicação, amizade e também por estar sempre à disposição.

Ao Professor Eno Darci Saatkamp, pela ajuda no processamento dos dados levantados com GPS.

À minha família, pelo incentivo.

Aos professores, colegas e amigos do Programa de Pós-Graduação em Geomática.

E a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Geomática  
Universidade Federal de Santa Maria

### **AEROTRIANGULAÇÃO POR FAIXA E EM BLOCO, POR APLICAÇÃO DE SOFTWARE ESPECIALISTA, COM MEDIÇÕES DE COORDENADAS FOTOGRÁFICAS EM MESA DIGITALIZADORA**

Autor: André Bairros Peres  
Orientador: José Américo de Mello Filho  
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 11 de maio de 2007.

Na elaboração de mapas e cartas geográficas, um dos processos largamente empregados é o da restituição fotogramétrica. Mas, para realização deste processo, torna-se necessário possuir, sobre cada par estereoscópico, coordenadas terrestres de pontos. Como nem sempre é possível efetuar a mensuração destas coordenadas no campo, recorre-se a um método fotogramétrico de mensurações conhecido como Aerotriangulação. Neste trabalho realizou-se o processo de Aerotriangulação utilizando-se um *software* especialista. As coordenadas fotográficas foram medidas sobre fotogramas, com base de papelão, em uma mesa digitalizadora, em substituição aos equipamentos clássicos de Fotogrametria. Com os resultados obtidos fez-se análise de erros com o objetivo de averiguar a aplicação do método na confecção de bases cartográficas. Apresentou maior precisão planimétrica a aerotriangulação em bloco quando comparada com a aerotriangulação por faixa. Das aerotriangulações em bloco, a que apresentou maior erro foi no método com 9 pontos de apoio, enquadrando-se na elaboração de cartas de classe “A”, “B” e “C” para escala igual a 1:25.000 ou menores.

Palavras-chaves: Aerotriangulação, Mesa Digitalizadora, Fotogrametria.

## **ABSTRACT**

Master Dissertation  
Post-Graduate Course in Geomatics  
Federal University of Santa Maria

### **STRIP AND BLOCK AEROTRIANGULATION, BY APPLICATION OF SPECIALIST SOFTWARE, WITH MEASUREMENTS OF PHOTOGRAPHIC COORDINATES IN DIGITALIZER TABLE**

Author: André Bairros Peres  
Adviser: José Américo de Mello Filho  
Santa Maria, May 11<sup>th</sup>, 2007.

In the elaboration of maps, one of the processes broadly employed is the photogrammetric restitution. But for accomplishment of this process it becomes necessary to have, on each stereoscopic pair, terrestrial coordinates of points. However, not always it is possible to measure these coordinates in the field, it is fallen back upon a photogrammetric method of mensuration, known as Aerotriangulation. In this work Aerotriangulation process was realized using specialist software. The photographic coordinates were measured on photograms with cardboard base in a digitalizer table in substitution to the classic photogrammetry equipments. With the obtained results it was made an errors analysis with the objective of verifying the application of the method in the making of cartographic bases. The block aerotriangulation presented higher planimetric precision if compared with the strip aerotriangulation. Of the block aerotriangulations, the method with nine support points being framed in the elaboration of maps of "A ", B " and " C " class for scale 1:25.000 or lower, presented highest error.

**Key words:** Aerotriangulation, Digitalizer Table, Photogrammetry

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Parâmetros da projeção central de uma câmara métrica. ....	17
Figura 2 – Princípio de colinearidade.....	22
Figura 3 – Gráfico dos erros na coordenada X.....	24
Figura 4 – Gráfico dos erros na coordenada Y.....	25
Figura 5 – Gráfico dos erros na coordenada Z. ....	25
Figura 6 – Ponto pré-sinalizado.....	26
Figura 7 – Precisão em alvos.....	37
Figura 8 – Acurácia em alvos.....	38
Figura 9 – Localização das marcas fiduciais e pontos de verificação nos fotogramas da faixa 5 no modelo A1. ....	62
Figura 10 – Gráfico dos erros verdadeiros de $E$ em função de $E'$ .....	75
Figura 11 – Gráfico do erro absoluto de $E$ em função de $E'$ com função de ajuste.....	76
Figura 12 – Gráfico do erro verdadeiro de $N$ em função de $N'$ .....	77
Figura 13 – Gráfico do erro absoluto de $N$ em função de $N'$ com função de ajuste.....	78
Figura 14 – Gráfico dos erros verdadeiros de $h$ em função de $E'$ e $N'$ com função de ajuste espacial. ....	79
Figura 15 – Gráfico da quantidade de medidas em relação aos erros planimétricos máximos admitidos das principais escalas e classes cartográficas no método B5.....	82
Figura 16 – Gráfico da quantidade de medidas em relação aos erros planimétricos máximos admitidos das principais escalas e classes cartográficas no método B5 após ajuste..	82

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Exemplo de arquivo no formato CTL..	46
QUADRO 2 – Exemplo de arquivo de coordenadas de fotografia com extensão *.tri.....	47
QUADRO 3 – Exemplo de um arquivo de coordenadas de pontos com extensão *.XYZ.. ....	49
QUADRO 4 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A1 na faixa 5.....	53
QUADRO 5 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A2 na faixa 5.....	54
QUADRO 6 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A3 na faixa 5.....	55
QUADRO 7 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A4 na faixa 5.....	55
QUADRO 8 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A5 na faixa 5.....	56
QUADRO 9 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A1 na faixa 6.....	57
QUADRO 10 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A2 na faixa 6.....	58
QUADRO 11 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A3 na faixa 6.....	58
QUADRO 12 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A4 na faixa 6.....	59
QUADRO 13 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A5 na faixa 6.....	59
QUADRO 14 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos na faixa 7 com diferentes números de pontos de apoio. ....	61
QUADRO 15 – EMQ dos erros absolutos na AT por faixa para as coordenadas $E$ , $N$ , $h$ e erro planimétrico. ....	63



QUADRO 16 – Distâncias calculadas, verdadeiras e erro relativo de distâncias entre o ponto 2003 e os demais pontos de verificação da faixa 5 no método A3. ....	64
QUADRO 17 – Distâncias calculadas, verdadeiras e erro relativo de distâncias entre o ponto 2035 e os demais pontos de verificação da faixa 6 no método A2. ....	65
QUADRO 18 – Distâncias calculadas, verdadeiras e erro relativo de distâncias entre o ponto 2020 e os demais pontos de verificação da faixa 7 no método A1. ....	65
QUADRO 19 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método B1 na AT em bloco. ....	66
QUADRO 20 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método B2 na AT em bloco. ....	67
QUADRO 21 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método B3 na AT em bloco. ....	68
QUADRO 22 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método B4 na AT em bloco. ....	69
QUADRO 23 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método B5 na AT em bloco. ....	68
QUADRO 24 – EMQ dos erros absolutos na AT por bloco para as coordenadas $E$ , $N$ , $h$ e erro planimétrico. ....	69
QUADRO 25 – Distâncias calculadas, verdadeiras e erro relativo de distâncias entre o ponto 2015 (de maior $\Delta P$ ) e os demais pontos de verificação do bloco no método B1...71	71
QUADRO 26 – Distâncias calculadas, verdadeiras e erro relativo de distâncias entre o ponto 2002 (de menor $\Delta P$ ) e os demais pontos de verificação do bloco no método B5..72	72
QUADRO 27 – Pontos de maior e menor erro planimétrico em cada método de AT em bloco com suas respectivas médias de erro relativo de distâncias.....	73
QUADRO 28 – Valores dos erros verdadeiros de $E$ e $N$ e dos erros relativos de distâncias, antes e após ajuste. ....	78
QUADRO 29 – Valores dos erros verdadeiros de $h$ antes e após o ajuste.....	81
QUADRO 30 – Valores especificados e obtidos do PEC planimétrico e do erro médio quadrático em diferentes classes e escalas cartográficas no método B5.....	83
QUADRO 31 – Valores especificados e obtidos do PEC planimétrico e do erro médio quadrático em diferentes classes e escalas cartográficas no método B5 com novo ajuste.....	84

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Padrão de exatidão cartográfica (PEC) planimétrico em relação à escala em diferentes classes. ....	35
Tabela 2 – Erro padrão planimétrico em relação à escala em diferentes classes. ....	36

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>1.1 Objetivos</b> .....	13
<b>1.2 Justificativa</b> .....	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
<b>2.1 Restituição de imagens fotogramétricas</b> .....	15
<b>2.2 Orientação de par de fotografias para restituição</b> .....	15
2.2.1 Orientação Interior.....	16
2.2.1.1 Etapas do processo de orientação interior .....	17
2.2.2 Orientação Relativa .....	19
2.2.3 Orientação Absoluta .....	20
<b>2.3 Resseção espacial</b> .....	21
<b>2.4 Princípio de colinearidade</b> .....	21
<b>2.5 Aerotriangulação</b> .....	23
2.5.1 Classificação.....	23
<b>2.6 Pontos de Apoio</b> .....	25
<b>2.7 Sistema de Posicionamento Global – GPS</b> .....	26
2.7.1 Componentes do sistema GPS.....	27
2.7.2 - Métodos de observações GPS .....	28
<b>2.8 Sistemas de referência</b> .....	29
<b>2.9 Projeção Universal Transversa de Mercator</b> .....	31
<b>2.10 Cartas e mapas</b> .....	32
<b>2.11 Precisão cartográfica</b> .....	34
<b>2.12 Conceitos de erros no contexto de levantamentos</b> .....	36
2.12.1 Precisão e Acurácia (exatidão) .....	37
2.12.2 Erro Verdadeiro e Erro Absoluto.....	38
2.12.3 Erro Médio Quadrático.....	39
2.12.4 Erro Planimétrico.....	39
2.12.5 Erro Total.....	40
2.12.6 Erro Relativo .....	40

<b>2.13 Ajuste de funções</b> .....	40
2.13.1 Método dos Mínimos Quadrados .....	40
2.13.2 Ajuste polinomial .....	41
<b>3 MÉTODOS E TÉCNICAS</b> .....	43
<b>3.1 Materiais</b> .....	43
<b>3.2 Métodos</b> .....	43
3.2.1 Entrada de dados e formato de arquivos para aplicação do <i>software</i> de aerotriangulação .....	45
3.2.2 Avaliação de erros das aerotriangulações.....	49
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	52
<b>4.1 Aerotriangulação por faixa</b> .....	52
4.1.1 Erro Médio Quadrático (EMQ) das aerotriangulações por faixa .....	63
4.1.2 Erro Relativo de distâncias .....	64
<b>4.2 Aerotriangulação em bloco</b> .....	66
4.2.1 Erro Médio Quadrático (EMQ) das aerotriangulações por bloco.....	70
4.2.2 Erro Relativo de distâncias .....	71
<b>4.3 Ajuste dos erros</b> .....	74
4.3.1 Ajuste dos erros verdadeiros das coordenadas planimétricas.....	74
4.3.2 Ajuste do erro verdadeiro da altura .....	79
<b>4.4 Comparação dos resultados com o Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC</b> .....	81
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	85
<b>5.1 Recomendações</b> .....	86
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	87

# 1 INTRODUÇÃO

Para se efetuar a elaboração de bases cartográficas, ou seja, para a elaboração de cartas fidedignas em uma determinada escala, há necessidade de se equacionarem diversos fatores, tais como exatidão, relação custo/benefício e, portanto, produtividade, na sua execução. Um dos processos largamente empregados na confecção de mapas é o de restituição fotogramétrica.

A restituição fotogramétrica consiste na reconstrução de objetos a partir principalmente de pares de diapositivos fotográficos, formando modelos estereoscópicos. Para a reconstrução, transforma-se a projeção central ou cônica dos fotogramas em projeção ortogonal. A restituição fotogramétrica tem sua maior aplicação na elaboração de mapas, na maioria das vezes georreferenciados por meio de pontos de apoio.

Mas, para se realizar o processo de restituição aerofotogramétrica, na elaboração de mapas, torna-se necessário conhecer, em cada par estereoscópico, as coordenadas terrestres de pontos. A obtenção dessas coordenadas pode se dar por levantamentos no próprio terreno, ou em gabinete por meio do processo fotogramétrico de aerotriangulação.

Atualmente, o levantamento desses pontos está popularizado pela utilização do GPS. Porém, em algumas áreas, principalmente nas zonas rurais, chegar a um determinado ponto pode apresentar diversos inconvenientes, tais como a dificuldade de acesso e até mesmo a proibição de entrada em áreas particulares.

Como a aerotriangulação permite levantar esses pontos de apoio, baseados em alguns outros pontos de apoio levantados diretamente no terreno, o método ainda continua sendo largamente empregado pela Fotogrametria, para a orientação absoluta de modelos estereoscópicos.

A aerotriangulação apresenta a vantagem de se trabalhar em gabinete. Atualmente, visto que há disponibilidade de *softwares* especialistas para a sua realização, tem-se maior agilidade no trabalho e se melhora a relação custo/benefício na elaboração de mapas.

Geralmente os programas computacionais de aerotriangulação utilizam o princípio da fotogrametria analítica para calcular as coordenadas do terreno dos pontos necessários para a restituição, e as coordenadas nos fotogramas (coordenadas referidas ao sistema fiducial de eixos) são medidas por meio de monocomparadores ou estereocomparadores. Os

equipamentos citados são comuns em laboratórios que realizam rotineiramente processos de aerotriangulação, porém são relativamente de elevado custo.

A evolução da informática e da eletrônica tem facilitado de forma significativa a popularização de mesas digitalizadoras, as quais apresentam preços bem mais acessíveis quando comparados aos de um monocomparador ou estereocomparador. Como a mesa digitalizadora realiza também mensurações de coordenadas de pontos, ela poderia ser usada como auxiliar importante no processo de aerotriangulação e, desta maneira, reduzir os custos provenientes dos equipamentos clássicos de fotogrametria.

## **1.1 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo verificar a possibilidade de uso de uma mesa digitalizadora na medição de coordenadas de fotografias no processo de aerotriangulação, com o uso de *software* especialista.

## **1.2 Justificativa**

A elaboração de bases cartográficas nem sempre é um processo rápido e de baixo custo. Um dos métodos mais empregados na elaboração de cartas topográficas é o de restituição fotogramétrica.

O processo de restituição pode ser compreendido como um procedimento utilizado para se obter, a partir de fotografias aéreas ou terrestres, as feições planimétricas e/ou altimétricas de uma determinada área após restabelecer a equivalência geométrica entre o terreno e modelo estereoscópico. Mas, para a realização desta equivalência, devem-se ter pontos com coordenadas terrestres conhecidas (planimétricas e/ou planialtimétricas).

O levantamento dessas coordenadas, atualmente, pode ser feito de forma consideravelmente rápida empregando receptores GPS. O sistema GPS apresenta uma grande vantagem no levantamento de pontos de apoio, visto que permite georreferenciar a área levantada e, além disso, não é necessário que o operador seja um especialista em levantamentos topográficos. Estes são, entre outros, os motivos pelos quais os levantamentos

de pontos com receptores GPS têm se popularizado. Na restituição fotogramétrica pode-se utilizar também um sistema de coordenadas local.

Mas, mesmo com tantas facilidades no processo de obtenção de coordenadas de campo, há algumas restrições ao uso do GPS na elaboração de uma restituição fotogramétrica. Uma dessas restrições apresenta-se na coleta de pontos em áreas de difícil acesso e que são relevantes no processo de confecção de uma carta topográfica.

A aerotriangulação pode ser vista como uma técnica fotogramétrica para a determinação de coordenadas de pontos no terreno. Estas coordenadas são necessárias para realizar a orientação absoluta dos estereomodelos.

Para se fazer a orientação absoluta de um modelo, têm-se várias combinações de dados de coordenadas de pontos no terreno. Uma dessas combinações é que se tenham três pontos de coordenadas planialtimétricas conhecidas, em cada modelo. Sem a execução da aerotriangulação, os modelos teriam que ser orientados somente com os pontos levantados em campo para cada par de fotogramas.

Com a aplicação da aerotriangulação, são determinadas coordenadas de pontos no terreno, baseadas em alguns pontos levantados diretamente no terreno. Dessa forma, a aerotriangulação é capaz de diminuir sensivelmente os trabalhos de campo, resultando em uma redução significativa no tempo e no custo dos levantamentos.

Outro fator que torna oneroso o processo de elaboração de mapas com o uso de fotogramas é a utilização de equipamentos específicos de Fotogrametria, tais como o monocomparador e o estereocomparador, os quais servem para realização de mensurações de coordenadas de fotografia.

Com o objetivo de diminuir os custos e popularizar o processo de aerotriangulação, utilizou-se um *software* especialista de aerotriangulação, com a inovação do uso de uma mesa digitalizadora em substituição ao monocomparador ou estereocomparador para a mensuração das coordenadas de fotografia.

Geralmente, para fazer uma aerotriangulação, são utilizados diapositivos, devido ao seu baixo coeficiente de dilatação. No presente trabalho, com o intuito de trabalhar nas piores condições, foram utilizadas fotografias positivas com base de papelão.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Restituição de imagens fotogramétricas**

Segundo Andrade (1998), a restituição fotogramétrica pode ser compreendida como um processo de reconstrução do terreno fotografado a partir de suas fotografias. Para que a restituição tenha maior precisão, geralmente forma-se, com um par de fotogramas, o modelo óptico tridimensional, também denominado de estereomodelo ou modelo estereoscópico do terreno. Por meio do uso de ferramentas adequadas, podem-se executar medições no modelo estereoscópico como se fossem no próprio terreno. O resultado final da restituição é uma carta ou mapa do terreno fotografado.

De acordo com Brito e Coelho Filho (2002), a restituição objetiva a interpretação das diversas feições manifestas no terreno, extraíndo-as (coordenadas no espaço-objeto), de modo a compor a base cartográfica daquela região, em uma dada escala.

A base cartográfica é o conjunto de objetos geograficamente referenciados, pelo menos, a um determinado sistema de coordenadas. Estes objetos serão omitidos ou representados de diversas formas, de acordo com a escala empregada.

Para se efetuar mapeamento por restituição, é conveniente utilizar como suporte um sistema de coordenadas geral, associado a uma projeção cartográfica, para que o mapeamento fique georreferenciado. Conforme Brito e Coelho Filho (2002), no Brasil, usa-se principalmente a projeção UTM aplicada sobre sistemas geodésicos diversos.

### **2.2 Orientação de par de fotogramas para restituição**

Para efetuar a restituição é necessário realizar a orientação de pares de fotogramas. Essa orientação classifica-se em: orientação interior e orientação exterior. Esta última divide-se em relativa e absoluta.



### 2.2.1 Orientação Interior

De acordo com Aguirre (2005), por meio da orientação interior pretende-se reconstruir geometricamente, com a maior precisão possível, o feixe de raios luminosos captados pela câmara no momento da tomada do fotograma, ou seja, a orientação interna dos projetores define o feixe de raios captados pela lente da câmara. A maneira de realizar a orientação interior depende do método utilizado na restituição e foi evoluindo junto com as técnicas fotogramétricas. Inicialmente a orientação interior foi realizada de forma analógica, posteriormente de forma analítica e por último de maneira digital.

Geometricamente a orientação interna analógica consiste em:

1. Como o eixo óptico da câmara métrica é perpendicular ao plano imagem (negativo), os projetores substitutivos da câmara métrica satisfazem essa condição por construção;
2. A constante dos projetores deve ser igual à constante da câmara usada para a tomada dos fotogramas.
3. A centragem dos fotogramas com o auxílio das marcas fiduciais, teoricamente, faz que o eixo óptico do projetor passe pelo ponto principal do fotograma (diapositivo ou diafilme).

Conforme Hallert (1960), a projeção ortogonal do centro óptico sobre o plano do filme é chamada Ponto Principal do fotograma. A posição do ponto principal no plano da imagem é dada geralmente em relação ao centro de imagem, o qual é definido com a ajuda das marcas fiduciais. Estas marcas são cópias das marcas fiduciais da câmara métrica, que são transferidas diretamente para a imagem durante a obtenção do fotograma. As marcas fiduciais estão geralmente localizadas nas mediatrizes dos lados ou nos cantos do suporte do negativo da câmara (figura 1), e o centro de imagem é derivado diretamente do ponto de interseção entre as retas que conectam as marcas fiduciais opostas (centro fiducial). As retas das marcas fiduciais são chamadas de 'eixos fiduciais' e são usadas como eixos  $x'$  e  $z'$ . Geralmente, o ponto principal da câmara coincide com o centro fiducial.



Conforme Brito e Coelho Filho (2002), o restituidor analítico possui um conjunto de servo-mecanismos que executa a medição das coordenadas das marcas fiduciais em um sistema próprio do aparelho. O sistema final é expresso pelas coordenadas fotográficas das marcas fiduciais e pela distância focal calibrada, que constam do certificado de calibração da câmara. Um ajustamento é realizado para delimitar os coeficientes de transformação entre os dois e, a partir daí, qualquer ponto pertencente ao espaço-imagem poderá ser posicionado num sistema de eixos cartesianos.

Ainda de acordo com Brito e Coelho Filho (2002), na fotogrametria digital, procedimento muito semelhante ocorre, entretanto sem a presença dos servo-mecanismos. As correções são as mesmas aplicadas sobre imagens digitais armazenadas no computador, tendo como diferencial um novo sistema de eixos correspondente à imagem digital na tela do computador. Este sistema corresponde a coordenadas de *pixels* linha e coluna (sistema imagem no monitor) expresso por números inteiros. O próprio *software* de fotogrametria digital realiza as medições das coordenadas das marcas fiduciais no sistema de *pixel*, com ou sem intervenção do operador. A partir daí, o processo segue de forma semelhante à fotogrametria analítica, com a entrada dos valores constantes do certificado de calibração e o ajustamento para a definição dos parâmetros de transformação do sistema fotogramétrico para o sistema imagem, e vice-versa.

Algo que exige ser levado em consideração é que não se deve utilizar o sistema *pixel* diretamente relacionado ao sistema de terreno, sem o uso de um outro sistema intermediário, visto que o sistema fotográfico é expresso em milímetros, que são unidades métricas, e o objeto fotografado em geral também está expresso em unidades métricas (metros, por exemplo). Além disso, a transformação entre *pixels* e milímetros também serve para corrigir vários erros de aquisição das imagens, tais como a má colocação do diafilme no *scanner*, deformações no filme, efeitos atmosféricos não-modelados, distorção na digitalização via *scanner* ou aquisição da imagem digital via câmara, e que causam deformações na imagem digitalizada, tais como rotações, translações e fatores de escala.

De acordo com Tommaselli (1987), um procedimento muito conhecido para realizar essa tarefa é a aplicação da transformação afim no plano. Neste procedimento utilizam-se as coordenadas das marcas fiduciais, fornecidas pelo certificado de calibração da câmara, como coordenadas fixas.

O modelo matemático matricial, da transformação afim, é apresentado a seguir:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x'_0 \\ y'_0 \end{bmatrix}$$

onde:

$X$  e  $Y$  são as coordenadas calibradas das marcas fiduciais (fixas);

$x'$  e  $y'$  são as coordenadas das marcas fiduciais no fotograma;

$a_1, a_2, a_3, a_4, x'_0$  e  $y'_0$  são os parâmetros de transformação.

Segundo Aguirre (2005),  $a_1, a_2, a_3, a_4, x'_0$  e  $y'_0$  são inicialmente incógnitas que, uma vez calculadas, são os parâmetros de transformação. Os cálculos são realizados medindo-se as coordenadas das marcas fiduciais em ambos os sistemas.

Ainda de acordo com Tommaselli (1987), esse procedimento, além de absorver as componentes lineares do trabalho do filme, executa a transformação para o sistema fiducial e posteriormente para o sistema imagem.

No caso específico da Fotogrametria Digital, as imagens são obtidas a partir de um dispositivo CCD (*Charge Coupled Device*) sólido que, de acordo com Shortis e Beyer (1996) pode ser considerado plano, fato este que simplifica o procedimento de orientação interior, tornando necessárias apenas as translações em  $x$  e  $y$ , a transformação do sistema levógiro para o sistema dextrógiro e dois fatores de escala.

Segundo Wolf e Dewitt (2000 apud Amorim, 2000, p.15.), a etapa de orientação interior pode, ainda, considerar os efeitos dos erros sistemáticos, calculando-se os efeitos das distorções radial simétrica e descentrada, além da refração atmosférica e o arrastamento provocado pelo deslocamento da aeronave no caso de uma fotografia aérea. Esse procedimento é chamado de pré-refinamento das coordenadas.

### 2.2.2 Orientação Relativa

Fernandes (1991) afirma que a orientação relativa é uma etapa da operação de orientação exterior de um modelo estereoscópico, na qual se reproduzem os parâmetros que especificam as posições relativas que a câmara assumiu no instante da tomada de dois fotogramas consecutivos.

Conforme Andrade (1998) pode-se dizer que na orientação relativa um segundo projetor, contendo a segunda fotografia também orientada interiormente, pode ser inclinado e transladado até que assuma a mesma posição em relação à primeira fotografia que a câmara ocupava no momento da tomada da segunda fotografia. Esse processo é chamado de orientação relativa analógica.

De acordo com Aguirre (2005), o resultado final do processo de orientação relativa é a formação do modelo estereoscópico. A visão tridimensional obtida está livre de paralaxe vertical. O modelo estereoscópico possui paralaxe horizontal responsável pela diferença de altura entre os pontos.

### 2.2.3 Orientação Absoluta

Para Andrade (1998), o processo de orientação absoluta pode ser compreendido como um conjunto de operações necessárias para colocar o modelo estereoscópico, obtido pela orientação relativa, em posição, escala e altitude corretas em relação ao referencial cartográfico.

Ainda, de acordo com Andrade (1998), uma fotografia aérea estará orientada, segundo um referencial adotado, quando for conhecida a posição do ponto onde foi tomada a fotografia (centro de perspectiva), por meio de suas coordenadas, e quando forem conhecidos os ângulos que definem os movimentos de rotação da câmara no momento da tomada da fotografia, em torno dos eixos de coordenadas do sistema fotogramétrico.

Conforme Silva e Petraglia (1998), a orientação exterior de uma câmara é especificada por todos os parâmetros que determinam a posição da câmara em um determinado sistema referencial. Os parâmetros consistem da posição do centro de perspectiva e a direção do eixo óptico. A especificação da orientação exterior é feita a partir das coordenadas de alguns pontos de controle no terreno, cujas posições correspondentes na imagem são conhecidas, e resulta na obtenção de três ângulos de rotação e três parâmetros de translação e um fator de escala. A completa especificação da orientação de um par de câmaras é dada pela especificação dos parâmetros determinados pela orientação relativa e pela orientação absoluta.

### 2.3 Resseção espacial

Segundo Lugnani (1987), a aplicação da resseção espacial em um fotograma consiste no cálculo os parâmetros de orientação exterior da câmara a partir das fotocoordenadas de  $n$  pontos (sendo  $n > 3$ ), das coordenadas dos pontos correspondentes no espaço objeto, da constante da câmara ( $c$ ) e dos valores aproximados dos parâmetros incógnitos.

Ainda conforme o autor, cada ponto observado dá origem a duas equações. Desta forma três pontos resultariam em uma solução única. Entretanto, são utilizadas mais observações (superabundância de dados), objetivando a utilização do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).

De acordo com Amorim (2000), o relacionamento entre o espaço-imagem e o espaço-objeto é realizado a partir da equação de colinearidade.

### 2.4 Princípio de colinearidade

Conforme Amorim (2000), a geometria de um par de fotografias, com superposição adequada, permite a formação de um modelo estereoscópico, por interseção dos raios homólogos.

É com base nesse pressuposto que se desenvolve toda a teoria da Fotogrametria moderna.

Ainda de acordo com o autor, para a formação de um modelo tridimensional são utilizadas duas fotografias e, portanto, envolvem-se nesse processo dois sistemas fotogramétricos (cada um com origem em um centro de projeção) com dois conjuntos de parâmetros de orientação, sendo que os pontos de referência, no espaço-objeto, são comuns às duas fotos, como mostra a figura 2.

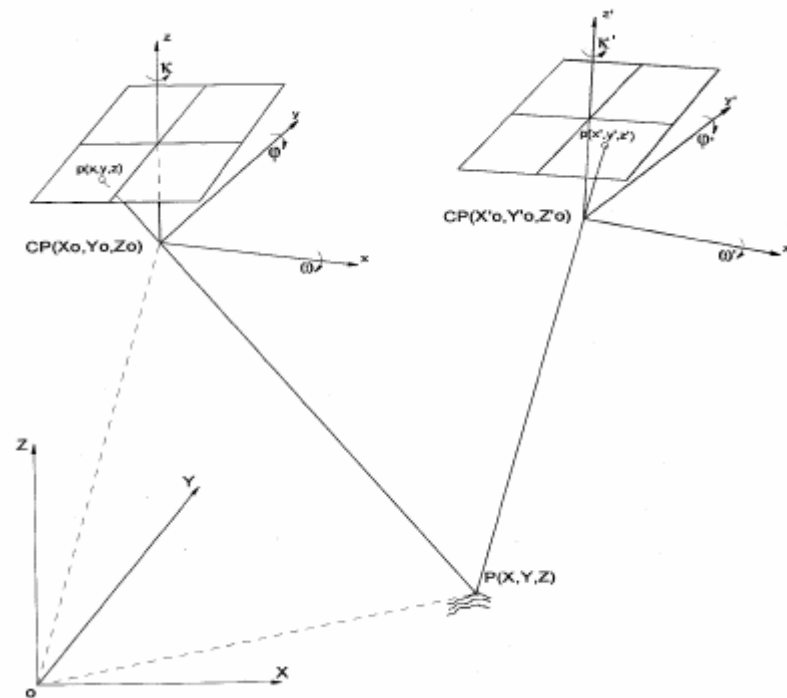


Figura 2 – Princípio de colinearidade. Fonte: Amorim, 2000.

O sistema de equações fornecido pelo princípio de colinearidade é resolvido aplicando-se o método paramétrico dos mínimos quadrados que, de acordo com Gemael (1994), sua expressão matricial assume a seguinte forma geral:

$$L_b + V = L_0 + APX$$

Onde:

$L_b$  = coordenadas da imagem;

$V$  = matriz dos resíduos;

$L_0$  = valores iniciais atribuídos às incógnitas;

$A$  = matriz das derivadas parciais, com relação às incógnitas, das equações de observação;

$P$  = matriz dos pesos;

$X$  = matriz das correções das incógnitas.

## 2.5 Aerotriangulação

Para Andrade (1998), a aerotriangulação é uma técnica fotogramétrica para determinação de coordenadas de pontos num referencial terrestre específico. A aerotriangulação, ou fototriangulação aérea como também é conhecida, tem como maior objetivo fornecer coordenadas precisas para pontos, necessários à realização da orientação absoluta de modelos fotogramétricos, para a restituição ou para a elaboração de ortofotos.

De acordo com Lugnani (1987), a aerotriangulação tem como objetivo gerar coordenadas precisas de pontos do espaço a partir de coordenadas medidas em fotografias ou em modelos estereoscópicos, valendo-se de um mínimo de informações do sensor e de outros pontos com coordenadas terrestres conhecidas.

Para que as coordenadas de pontos do espaço geradas sejam referidas a um sistema de coordenadas pré-definido, torna-se necessário tomar um mínimo de pontos de controle de campo. O não fornecimento desses pontos de controle de campo deixa indefinido o sistema de referência do espaço, dando origem a problemas de deficiência de posto da matriz dos coeficientes das equações normais.

### 2.5.1 Classificação

Conforme Arana (1994), o processo de aerotriangulação poder ser dividido em três casos, de acordo com o processamento das coordenadas dos pontos do terreno.

- Aerotriangulação Analógica: o processamento de coordenadas de pontos do espaço é feito analogicamente, isto é, com instrumentos fototrianguladores ópticos, mecânicos e/ou óptico-mecânicos;
- Aerotriangulação Analítica: o cálculo das coordenadas dos pontos do terreno é efetuado numericamente, a partir de coordenadas de pontos medidos nos fotogramas, restringindo a intervenção humana na participação instrumental e de observações.
- Aerotriangulação Semi-analítica: neste processo há a combinação de ambos os processamentos, o analógico para construir modelos estereoscópicos e o numérico para a concatenação dos modelos. Conforme Lugnani (1987), a aerotriangulação semi-analítica e a aerotriangulação por modelos independentes são erroneamente consideradas equivalentes.



De acordo com Aguirre (2005), na aerotriangulação analítica as coordenadas de máquina (coordenadas fotográficas) são medidas com monocomparadores ou estereocomparadores sobre diapositivos ou o próprio filme, por serem materiais com baixíssimo coeficiente de dilatação, quando comparados com fotogramas de base de papelão.

Conforme Andrade (2003), a aerotriangulação analítica, utilizando equações projetivas, permite o ajustamento por mínimos quadrados dos dados obtidos das fotografias que formam um bloco. A teoria em que está baseada a Aerotriangulação Analítica por Feixes de Raios Homólogos, conhecida em todo o mundo por “*Bundle Method*”, é muito avançada e permite o tratamento adequado de todos os erros sistemáticos, a eliminação de enganos (erros grosseiros) e a introdução de diversos tipos de injunções, resultando numa sistemática muito rica em possibilidades. É assim que dados de diversas naturezas tais como os da navegação pelo método diferencial com GPS, ou dos ângulos de Euler, podem participar do ajustamento de forma muito elegante.

Conforme Lopez-Cuervo Y Estevez (1980), os erros no processo de aerotriangulação são acidentais e sistemáticos, mas não é possível separá-los para tratá-los individualmente. Nos gráficos das figuras 3, 4 e 5 pode-se observar o comportamento dos erros das coordenadas X, Y e Z respectivamente representado por  $\Delta X = f(X)$ ;  $\Delta Y = f(X)$  e  $\Delta Z = f(X)$ .

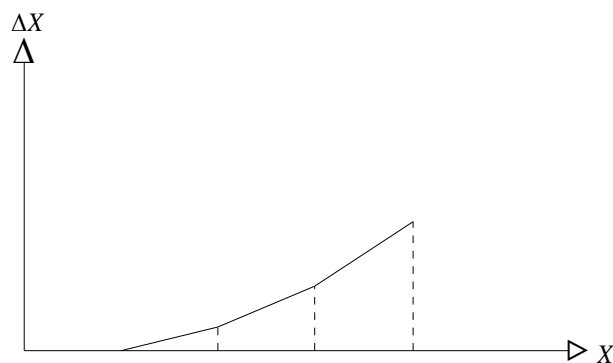


Figura 3 - Gráfico dos erros na coordenada X. Adaptado de Lopez-Cuervo Y Estevez, 1980.

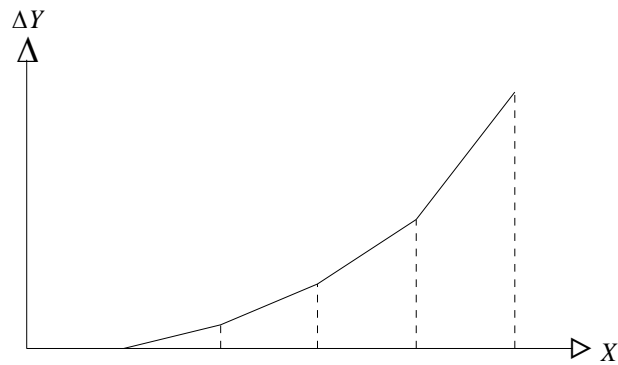


Figura 4 - Gráfico dos erros na coordenada Y. Adaptado de Lopez-Cuervo Y Estevez, 1980.

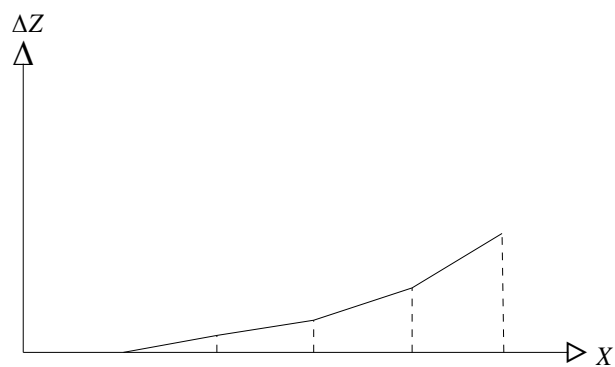


Figura 5 - Gráfico dos erros na coordenada Z. Adaptado de Lopez-Cuervo Y Estevez, 1980.

## 2.6 Pontos de Apoio

Os pontos do terreno com coordenadas conhecidas em um determinado sistema de referência, que podem ser claramente identificados na fotografia, recebem a denominação de pontos de apoio. Eles são utilizados para a orientação absoluta do modelo estereoscópico.

O levantamento dos pontos de apoio geralmente é feito depois da obtenção da fotografia. De acordo com Wolf e Dewitt (2000 apud Souza, 2001, p.42.), uma seleção preliminar dos pontos na fotografia pode ser feita em gabinete, mas a seleção final deve ser feita no campo, com as fotografias em mão. Isto possibilita que se possa certificar da adequabilidade do ponto, inclusive das condições de acesso, condições do terreno e conveniência do levantamento.

Andrade (2003) diz que a coleta de dados na forma tradicional é realizada nas proximidades dos pontos de Von Grüber\*. Tanto os pontos fotogramétricos quanto os pontos de apoio são definidos nesses locais – geralmente um ponto em cada local, o que resulta aproximadamente em 9 pontos em cada aerofoto.

Ainda, de acordo com Wolf e Dewitt (2000 apud Souza, 2001, p.42.), a realização de mapeamentos de grandes áreas implica em elevados custos no levantamento de pontos de apoio e, nessas situações, a aerotriangulação analítica é utilizada para estabelecer muitos dos pontos necessários, a partir de uma rede bem espaçada de pontos levantados no campo.

Segundo Souza (2001), em algumas áreas, tais como campinas, florestas e desertos, não existem pontos naturais adequados para o apoio fotogramétrico. Quando isso ocorre pode-se criar pontos artificiais no terreno antes da tomada da fotografia. Geralmente esses pontos proporcionam melhores imagens e são de fácil identificação e, por isso mesmo, são usados em trabalhos fotogramétricos mais precisos, existindo ou não pontos naturais. Na figura 6 pode-se ver um ponto pré-sinalizado para a realização de uma tomada fotográfica.



Figura 6 – Ponto pré-sinalizado. Fonte: Brito e Coelho Filho, 2002.

## 2.7 Sistema de Posicionamento Global – GPS

Conforme Araki (2004), na aerofotogrametria, as técnicas de posicionamento GPS podem também ser utilizadas como um auxílio na solução do problema de orientação exterior. O uso de GPS pode permitir a transformação direta de pontos da imagem em pontos no sistema de referência. Uma das principais vantagens deste método é a redução no cálculo

---

\* Os pontos de Von Grüber, também chamados de pontos de orientação, são pontos localizados estrategicamente, no modelo estereoscópico, nos quais ou na sua proximidade é eliminada a paralaxe vertical.

iterativo tradicionalmente usado para determinar os parâmetros de orientação exterior. Desta forma, não são necessários valores aproximados dos parâmetros de orientação exterior, e o número de pontos de controle é reduzido consideravelmente.

O GPS é um sistema de navegação por satélite que foi desenvolvido pela Força Aérea dos EUA durante as décadas de 70 e 80 e colocado em operação na década de 80. De acordo com Hofmann-Wellenhof *et al* (1997 apud Souza, 2001, p.25.), o GPS foi estabelecido basicamente para proporcionar ao usuário a capacidade de determinar a sua posição, expressa, por exemplo, pela latitude, longitude e altitude de forma praticamente instantânea. Conforme Segantine (1999), o sistema GPS tem se mostrado o melhor sistema de navegação implantado em nível mundial, tornando-se uma grande revolução na arte de posicionar qualquer objeto sobre ou próximo à superfície terrestre.

Para Hofmann-Wellenhof *et al* (1997 apud Souza, 2001, p.25.), o GPS pode ser compreendido como um sistema de medição de distâncias a partir da posição de um satélite no espaço até um ponto de posição não conhecida na superfície da terra, mar, ar ou espaço. Estas distâncias são medidas a partir de um sinal horário transmitido pelo satélite, que também transmite simultaneamente a sua posição estimada. As distâncias são derivadas da medida do tempo de deslocamento e velocidade ou da medida da fase do sinal emitido. Em ambos os casos, relógios no satélite e no receptor são utilizados e por não estarem perfeitamente sincronizados, é necessário levar em conta o "erro do relógio". Conseqüentemente, cada equação deste modelo compreende quatro incógnitas que são as três componentes das coordenadas e o erro do relógio. Assim, são necessários pelo menos quatro satélites para que o problema possa ter solução. Na verdade, o sistema GPS foi concebido de forma a manter "visíveis" quatro ou mais satélites durante as 24 horas do dia e em qualquer ponto da superfície terrestre.

### 2.7.1 Componentes do sistema GPS

São três os segmentos que constituem o sistema GPS. Estes segmentos se dividem em segmento espacial, de controle e de usuários.

- **segmento espacial:** de acordo com Segantine (1999), é composto por uma rede de satélites em órbitas quase circulares, com altitude de cerca de 20.200 km, com

período de aproximadamente 12 horas siderais, os quais estão dispostos em seis planos orbitais inclinados de 55 graus em relação à linha do equador.

- **segmento de controle:** o segmento de controle é constituído por um conjunto de estações terrestres, as quais são responsáveis pela operação do sistema GPS. Segundo Segantine (1999), essas estações têm como propósito rastrear os satélites GPS e fornecer suas posições periodicamente, além de corrigir as efemérides transmitidas e os erros dos relógios, determinar o tempo GPS, prever as efemérides e o comportamento dos relógios dos satélites e atualizar, periodicamente, a mensagem de navegação para cada satélite em particular;
- **segmento dos usuários:** esse segmento é formado por todos aqueles que utilizam o sistema para as variadas aplicações e fazem uso de receptores que permitem determinar a posição dos pontos observados.

### 2.7.2 - Métodos de observações GPS

Souza (2001) afirma que, enquanto na topografia medem-se diretamente ângulos e distâncias, com o GPS se obtêm matematicamente as coordenadas espaciais do centro da antena coletora, através da resolução de sistemas de equações que envolvem coordenadas, tempo e medida da fase do sinal emitido pelos satélites.

O levantamento com o sistema GPS pode ser feito no modo absoluto, quando se dispõe de um único receptor. Este modo apresenta uma precisão planimétrica de 5 a 20 metros.

Com o intuito de se minimizarem os erros, foram desenvolvidos métodos diferenciais que requerem no mínimo um par de receptores. Nesses métodos, um dos receptores deve estar estacionado em um ponto de coordenadas fixas (Referência ou Base) e, por meios estatísticos e matemáticos, determina o vetor espacial entre a antena do ponto base e a antena do segundo receptor.

De acordo com Leick (1995), com os valores das componentes espaciais do vetor, é possível determinar as coordenadas do segundo receptor. O método diferencial se divide em dois grupos:

- diferencial de código (DGPS): é um processo matematicamente mais simples e permite a obtenção da coordenada do segundo receptor de forma mais rápida e com precisão em torno de meio metro;

- método diferencial de fase da portadora: de acordo com Souza (2001), este método baseia-se na variação da fase da onda transmitida pelo satélite. É um método matematicamente mais complexo, porém permite se obter a coordenada do segundo receptor com precisão centimétrica. O segundo receptor pode ser operado no modo estático, isto é, permanece estacionário por um período de 10 minutos a várias horas. Devido à abundância de dados, é possível obter coordenadas com precisão subcentimétrica.

Conforme Souza (2001), o GPS pode ainda ser operado no modo cinemático, isto é, a antena do segundo receptor se encontrar em movimento. O modo cinemático é muito usado no método DGPS. No método diferencial de fase requerem-se mais cuidados no campo. Atualmente dispõe-se do método cinemático em tempo real, que combina diferencial de código e fase da portadora, em conjunto com um sistema de transmissão dos dados do receptor da base para o receptor móvel e um processamento em tempo real.

## 2.8 Sistemas de referência

Pode-se definir referencial como um conjunto de elementos que permite determinar, de forma unívoca, a posição tridimensional de objetos. Com relação aos referenciais geodésicos, de acordo com Andrade (2003), eles podem ser divididos em três tipos: cartesiano, elipsoidal e cartesiano local.

- Referencial Geodésico Cartesiano: este referencial é formado por três eixos ortogonais dextrógiros, com origem no centro do elipsóide. O eixo OX é definido pela intersecção do plano equatorial do elipsóide com o plano do meridiano origem. O eixo OY está contido no plano equatorial; e o eixo OZ coincide com o semi-eixo menor do elipsóide, e é positivo para a direção do pólo norte. A posição de um ponto fica definida pelas coordenadas  $\{X,Y,Z\}$ .

- Referencial Geodésico Elipsoidal: é constituído por dois planos fundamentais e uma superfície. Os planos fundamentais são definidos pelo plano do equador e o plano de semi-meridiano origem. A superfície fundamental é a do elipsóide. A posição de um ponto fica definida pela longitude e a latitude.

A longitude é o ângulo medido sobre o equador com origem no semi-meridiano origem até o semi-meridiano que contém o ponto, positivamente para leste de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  e negativamente de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  para oeste. A latitude é o ângulo que forma a normal ao ponto

com sua projeção sobre o plano do equador, variando de  $0^\circ$  a  $+90^\circ$  para pontos localizados no hemisfério norte, e de  $0^\circ$  a  $-90^\circ$  para pontos localizados no hemisfério sul. A altitude geométrica ou elipsoidal do ponto é a distância do elipsóide até o ponto. Esta distância deve ser considerada ao longo da normal ao elipsóide.

- Referencial Geodésico Cartesiano Local: é constituído por um sistema tri-ortogonal de eixos dextrógiros, com origem num ponto arbitrário da superfície do elipsóide, dado por suas coordenadas elipsoidais. O eixo OZ é normal ao elipsóide e positivo para fora; os eixos OX e OY formam um plano tangente ao elipsóide e perpendicular ao eixo OZ. O eixo OY é orientado positivamente para o norte e o eixo OX é orientado positivamente para leste. A posição de um ponto é dada por suas coordenadas  $\{X,Y,Z\}$

Cabe ressaltar que estes não são os únicos sistemas referenciais utilizados nos processos aerofotogramétricos. Existem outros sistemas de referência que são utilizados na Fotogrametria e que são de suma importância no desenvolvimento de trabalhos voltados à aerofotogrametria. Conforme Andrade (2003), dentre eles se destacam o Sistema Referencial Fiducial e o Sistema Referencial Fotogramétrico.

- Referencial Fiducial – trata-se de um sistema de duas coordenadas (x,y) materializado pelas marcas fiduciais. As coordenadas dessas marcas são medidas num processo de calibração e materializam o referencial, que geralmente é definido como tendo origem na intersecção de retas que ligam marcas fiduciais diametralmente opostas. Quando o eixo OX está orientado na direção de vôo, e o eixo OY, perpendicular ao mesmo, formam um sistema dextrógiro, o sistema de eixos denomina-se Normal.

- Referencial Fotogramétrico – Praticamente, todos os problemas em Fotogrametria são tratados neste referencial. Consiste de três eixos ortogonais que formam um sistema dextrógiro. A sua origem situa-se no ponto nodal anterior do sistema de lentes da câmara métrica. O eixo OZ é perpendicular ao plano do negativo e orientado positivamente neste sentido. Os outros dois eixos são paralelos aos seus homônimos do Referencial Fiducial. Nos fotogramas aéreos o eixo  $x$  é horizontal e segue aproximadamente a direção da linha de vôo.

## 2.9 Projeção Universal Transversa de Mercator

De acordo com Aguirre e Mello Filho (2007), a União Geodésica e Geofísica Internacional (UGGI) recomendou em 1951 esta projeção para ser aplicada no mundo inteiro. Esta recomendação foi seguida pelo Brasil em 1955 pela diretoria do Serviço Geográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o mapeamento sistemático nacional.

Conforme os autores, partindo-se do princípio construtivo, esta projeção é classificada como analítica. Segundo a superfície adotada ela é classificada por desenvolvimento, sendo a superfície desenvolvível um cilindro transversal secante ao elipsóide; e, segundo a propriedade que conserva, é classificada como conforme. O eixo do cilindro transversal pertence ao plano do Equador, e por ser secante, o cilindro tem seu diâmetro menor que o do modelo e, conseqüentemente, gera duas linhas de contato entre o cilindro e o modelo.

Em sua obra os autores evidenciam algumas características principais desta projeção:

- 1) O elipsóide é dividido em Fusos de  $6^\circ$  de amplitude em longitude (sentido leste-oeste), resultando portanto em 60 fusos.
- 2) A latitude de origem é o equador
- 3) A longitude de origem é o Meridiano Central do fuso.
- 4) A projeção UTM é aplicável entre as latitudes de  $84^\circ$  norte e  $80^\circ$  sul.
- 5) As transformadas do equador e do meridiano central de cada fuso são linhas retas na projeção, enquanto que as dos paralelos são curvas convexas com suas convexidades orientadas para a linha do equador. As transformadas dos meridianos (exceto do meridiano central) são curvas côncavas com sua concavidade orientada para o meridiano central. A transformada de uma linha geodésica é também uma curva com a concavidade orientada para o meridiano central do fuso.
- 6) A origem da coordenada plana *E* (do inglês *East*, que corresponde à coordenada X do sistema cartesiano) é o meridiano central do fuso. Por convenção, atribui-se ao meridiano central do fuso a constante 500.000 m visando não se trabalhar com coordenadas negativas dentro do fuso.
- 7) A origem da coordenada plana *N* (do inglês *North*, que corresponde à coordenada Y do sistema cartesiano) é a linha do equador. Para o hemisfério sul a linha do equador tem o valor de *N* igual a 10.000.000 m, o que evita se trabalhar com coordenadas negativas. No hemisfério norte, na linha do equador, o valor de *N* é igual a zero metro.



- 8) Tendo em vista que as coordenadas planas ( $E, N$ ) repetem-se em cada fuso, quando se localizar um ponto, por meio dessas coordenadas UTM, deve-se indicar a que fuso pertence este ponto, para evitar ambigüidade.
- 9) O coeficiente de deformação linear ( $k_0$ ), também chamado de fator de escala, pode ser obtido através da fórmula:  $k_0 = 1 - \frac{1}{2.500}$ . O valor do fator de escala para projeção UTM no meridiano central é  $k_0 = 0,9996$ .
- 10) O fator de escala para uma determinada região pode ser calculado pela fórmula:

$$k = k_0 \left( 1 + \frac{E'^2}{2.R^2} \right)$$

onde,

$k$  = fator de escala para uma determinada região,

$k_0 = 0,9996$  fator de escala no meridiano central do fuso,

$E'$  = distância na projeção existente entre o ponto e o meridiano central,

$R$  = raio médio da Terra.

- 11) O elipsóide é dividido em zonas UTM, as quais podem obedecer a um dos dois critérios existentes para este fim: um adotado para a Carta ao Milionésimo e o outro desenvolvido para o uso no levantamento de pontos por meio do Sistema de Posicionamento Global (GPS).

## 2.10 Cartas e mapas

De acordo com Aguirre e Mello Filho (2007), nas definições de Cartografia os termos cartas e mapas são utilizados para designar documentos cartográficos de uso corrente e na maioria das vezes são usados como sinônimos. É difícil separar o que significam essas designações, gerando dessa forma muita dificuldade de compreensão. Esta confusão tem origem histórica, mas atualmente a tendência é usar o termo “carta”.

Bakker (1965 apud Aguirre e Mello Filho, 2007, p.5.) define os mapas e cartas da seguinte forma:

- Mapa: é a representação da Terra nos seus aspectos geográficos (naturais ou artificiais) que se destina a fins culturais ou ilustrativos.

O mapa, portanto, não tem caráter científico especializado e é geralmente elaborado em escala pequena e cobre um território mais ou menos extenso.

- Carta: é a representação dos aspectos naturais ou artificiais da Terra, destinada a fins práticos da atividade humana, permitindo a avaliação precisa de distâncias, direções e a localização geográfica de pontos, áreas e detalhes.

É a carta, portanto, uma representação similar ao mapa, mas de caráter especializado, construído com uma finalidade específica e, geralmente, em escala grande.

Ainda conforme aquele autor, a distinção entre mapa e carta é convencional e subordinada à idéia de escala. Preferencialmente utiliza-se a palavra “carta” para designar documento cartográfico de maior precisão, e “mapa” para aquele simplesmente ilustrativo ou de menor precisão; desta forma o mapa pode ser considerado um caso particular de carta.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2006) distingue perfeitamente os documentos cartográficos carta e mapa:

- Mapa: é a representação no plano, normalmente em escala pequena, dos aspectos geográficos, naturais, culturais e artificiais e uma área tomada na superfície de uma figura planetária, delimitada por elementos físicos, político-administrativos, destinada aos mais variados usos, temáticos, culturais e ilustrativos.

De acordo com Aguirre e Mello Filho (2007), os mapas apresentam as seguintes características:

- Representação plana;
- geralmente em escala pequena;
- área delimitada por acidentes naturais (bacias hidrográficas, regiões fisiográficas, planaltos, chapadas, etc.), ou político-administrativos;
- destinação a fins temáticos, culturais ou ilustrativos.
- Carta: de acordo com o IBGE (2006), é a representação no plano, em escala média ou grande, dos aspectos artificiais e naturais de uma área tomada de uma superfície planetária, subdividida em folhas, as quais são delimitadas por linhas convencionais (paralelos e meridianos) com a finalidade de possibilitar a avaliação de pormenores, com grau de precisão compatível com a escala.

Aguirre e Mello Filho (2007) complementam esta definição destacando que, ao se elaborar as cartas para serem articuladas, os meridianos e paralelos limites devem ter seus valores de longitude e latitude pré-estabelecidos, para que não haja superposições ou omissões de área mapeada.

Para os autores as principais características de cartas são:

- representação plana;
- escala média ou grande;
- desdobramento em folhas articuladas de maneira sistemática;
- limites das folhas constituídos por linhas convencionais, destinada à avaliação precisa das direções, distâncias e localização de pontos, áreas e detalhes.

## 2.11 Precisão cartográfica

Conforme a Comissão Nacional de Cartografia (2006), o Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, estabelece as instruções reguladoras de Normas Técnicas de Cartografia Nacional. Em seu artigo 8º, o Decreto determina que as cartas, quanto a sua exatidão, devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC, segundo o critério indicado a seguir:

1. Noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - 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 Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico - estabelecido.

§1º Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos.

§2º A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão - PEC = 1,6449 EP.

§3º O Erro-Padrão, isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.

§4º Para efeito das presentes Instruções, consideram-se equivalentes as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático.

No nono artigo, há uma forma de classificação das cartas segundo a sua exatidão. As cartas são então classificadas nas Classes A, B e C, de acordo com os seguintes critérios:

### Classe A

1. Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,5 mm, na escala da carta, sendo de 0,3 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.
2. Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: metade da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de um terço desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

### Classe B

1. Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,8 mm na escala da carta, sendo de 0,5 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.
2. Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quintos da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de dois quintos o Erro-Padrão correspondente.

### Classe C

1. Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 1,0 mm na escala da carta, sendo de 0,6 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.
2. Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quartos da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de metade desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

Com o conhecimento destes requisitos podem-se montar tabelas que relacionem a escala da carta com os erros máximos estabelecidos pelo Padrão de Exatidão Cartográfica. Na tabela 1 estão dispostos os erros máximos planimétricos admitidos em cada classe nas principais escalas cartográficas.

Tabela 1 - Padrão de exatidão cartográfica (PEC) planimétrico em relação à escala em diferentes classes.

Escala	Classe A	Classe B	Classe C
1:2.000	1 m	1,5 m	2,5 m
1:5.000	2,5 m	4 m	5 m
1: 10.000	5,0 m	8 m	10 m
1: 25.000	12,5 m	20 m	25 m
1: 50.000	25 m	40 m	50 m
1: 100.000	50 m	80 m	100 m

Na tabela 2 estão dispostos os erros padrões planimétricos admitidos em cada classe nas principais escalas cartográficas.

Tabela 2 – Erro padrão planimétrico em relação à escala em diferentes classes.

Escala	Classe A	Classe B	Classe C
1:2.000	0,6 m	1 m	1,2 m
1:5.000	1,5 m	2,5 m	3 m
1: 10.000	3,0 m	5 m	6 m
1: 25.000	7,5 m	12,5 m	15 m
1: 50.000	15 m	25 m	30 m
1: 100.000	30 m	50 m	60 m

## 2.12 Conceitos de erros no contexto de levantamentos

De acordo com Hallert (1960), o erro em geral pode ser definido como a divergência de uma medida em relação a um valor considerado correto (verdadeiro) para a mesma. Esta definição, é claro, presume que se tem conhecimento do valor verdadeiro da grandeza em estudo. Como isto nunca ocorre, toma-se um valor mais aproximado como o valor correto.

Conforme o Departamento de Física da UFOP (2006), do ponto de vista de teoria de erros, costuma-se idealizar que toda grandeza física possui um valor bem definido, ou exato, que geralmente é denominado de "valor verdadeiro". Os resultados de sucessivas medições de uma grandeza geralmente não coincidem. Os valores encontrados podem diferir muito pouco do valor inicial, mas raramente se consegue uma série de valores idênticos. Este fato reflete a impossibilidade de se conhecer o valor verdadeiro da grandeza em questão. As causas dessas flutuações são erros de medição. Os erros podem classificar-se em dois grupos, os erros sistemáticos e os erros aleatórios.

Os erros sistemáticos são aqueles que ocorrem de forma a gerar desvios de medida (em relação ao que se acredita ser o "valor verdadeiro" da medida) sempre no mesmo sentido, isto é, são aqueles que concorrem para causar um aumento ou uma diminuição sistemática nas medidas. Em outras palavras, os erros sistemáticos não possuem um caráter aleatório. Alguns exemplos de erros sistemáticos são: erro instrumental, erro ambiental, erro observacional e o erro teórico

(decorrente, em uma medida indireta, do uso de fórmulas teóricas aproximadas ou de valores aproximados de constantes físicas nas medidas). Em resumo, são erros que seguem a lei física ou matemática e, portanto, passíveis de serem identificados e corrigidos.

Mesmo quando os erros sistemáticos são substancialmente reduzidos (nem sempre é possível fazê-lo), ainda assim se observa que medidas sucessivas de uma grandeza física são discordantes. Isto se deve à existência de outros tipos de erros, os erros aleatórios.

Erros aleatórios são aqueles que produzem os desvios aleatórios que se observam em uma série de medidas. São de naturezas diversas e podem ser reduzidos ou praticamente eliminados. Esses erros seguem a teoria da probabilidade e tendem a obedecer à distribuição normal.

### 2.12.1 Precisão e Acurácia (exatidão)

A precisão pode ser compreendida como o grau de concordância de uma série de medidas de uma mesma grandeza física, feitas sob condições similares. A medida de precisão deve então ser vista como uma medida de espalhamento.

Conforme Andrade (1998), a Curva de Gauss, também conhecida como Curva Normal, oferece o parâmetro de medida do grau de espalhamento de uma variável em relação à sua média. Na figura 7 pode-se compreender melhor essa definição de precisão ao se observarem os alvos mostrados. Na figura da esquerda os pontos pretos estão mais afastados entre si, o que indica uma menor precisão nas observações, enquanto que na figura da direita eles estão mais próximos, o que nos mostra que nesta há uma maior precisão dos valores.

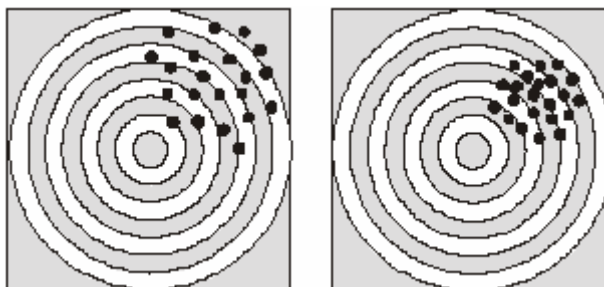


Figura 7 - Precisão em alvos. Fonte Andrade, 2003.

A acurácia ou exatidão, diferentemente da precisão, descreve a proximidade do valor amostral com o valor verdadeiro. Uma medida acurada é aquela em que os enganos e os erros sistemáticos foram identificados e excluídos e os erros aleatórios são minimizados. Para que

um determinado resultado apresente uma boa acurácia, a diferença entre o valor observado e o valor dito verdadeiro deve ser mínima. Na figura 8 são mostrados dois alvos nos quais pode-se compreender melhor a definição de acurácia. Na figura da esquerda os pontos pretos estão localizados mais na região central do alvo, só que os valores estão dispersos; enquanto que na figura da direita os valores são mais próximos entre si e também estão localizados próximo ao centro do alvo. Logo, infere-se que os dados na figura da direita têm maior acurácia que os da esquerda.

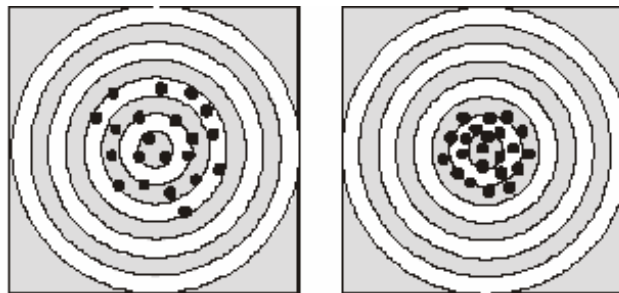


Figura 8 – Acurácia em alvos. Fonte Andrade, 2003.

### 2.12.2 Erro Verdadeiro e Erro Absoluto

De acordo com Hallert (1960), o erro verdadeiro é expresso pela fórmula seguinte:

$$\varepsilon = M - T,$$

onde

$\varepsilon$  = erro verdadeiro

$M$  = valor medido

$T$  = valor verdadeiro

O autor afirma, ainda, que o erro verdadeiro não passa de uma ficção, visto que é impossível se conhecer o valor verdadeiro de uma determinada grandeza.

Conforme o Departamento de Física da UFOP (2006), o erro absoluto é definido como o módulo da diferença entre o valor observado de uma grandeza e o seu valor verdadeiro. Vista a impossibilidade de se conhecer o verdadeiro valor de uma grandeza, assume-se a média dos valores observados como o seu valor verdadeiro. Logo, o erro absoluto é definido pela fórmula a seguir:

$$\Delta x = |x_i - \bar{x}|,$$

onde

$\Delta x$  = erro absoluto

$x_i$  = valor observado para a grandeza

$\bar{x}$  = valor médio das observações da grandeza (valor considerado verdadeiro)

### 2.12.3 Erro Médio Quadrático

O Erro Médio Quadrático (EMQ) é utilizado para estimar a precisão. O EMQ pode ser calculado utilizando-se a fórmula adaptada de Gemael (1994), apresentada a seguir:

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x^2}{n-1}},$$

onde

$EMQ$  = erro médio quadrático;

$\Delta x = x_i - \bar{x}$  ( $\bar{x}$  média das observações)

$n$  = número de observações.

### 2.12.4 Erro Planimétrico

De acordo com Aguirre (2005), o erro planimétrico ou a exatidão horizontal, como também é conhecido, é avaliado pelo erro horizontal no ponto dado, ou seja, pelo vetor formado pelo erro verdadeiro em  $x$  e em  $y$ . O erro planimétrico pode ser calculado por:

$$\Delta P = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} .$$



### 2.12.5 Erro Total

Segundo Aguirre (2005), o erro total pode ser compreendido pelo vetor no espaço formado pelos erros verdadeiros em  $x$ ,  $y$  e  $h$ . O erro total pode ser obtido aplicando-se a seguinte fórmula:

$$\Delta T = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta h^2} .$$

### 2.12.6 Erro Relativo

A precisão de uma medida é dada pelo erro relativo, definido pelo quociente entre o erro absoluto e o valor médio.

O erro relativo, assim definido, fornece a precisão da medida: quanto menor o erro relativo, maior a precisão, e vice-versa. O erro relativo é um número adimensional. O conhecimento de erros relativos obtidos em diferentes processos de medição nos permite comparar as precisões das medidas obtidas por tais processos.

$$E_R = \frac{\Delta x}{x} .$$

## 2.13 Ajuste de funções

### 2.13.1 Método dos Mínimos Quadrados

A idéia básica do ajuste é criar uma função que passe o mais próximo possível de determinados pontos conhecidos, tais como dados obtidos experimentalmente.

De acordo com Berlotti e Calzarossa (2001 apud Amorim, 2005, p.21.), o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) consiste em ajustar os parâmetros de uma função a um conjunto de dados tabelados, permitindo estabelecer a relação entre as variáveis que correspondem à colunas na tabela. O ajuste é obtido pela minimização da soma dos resíduos quadráticos, ou

seja, a soma quadrática dos desvios, que correspondem às diferenças entre o valor tabelado e o valor calculado com a função ajustada.

Conforme Amorin (2005), este método funciona muito bem quando as funções ajustadas são polinomiais de qualquer grau. O teorema de Weirstrass diz que sempre existe um polinômio capaz de aproximar a função tão bem quanto se queira. As funções não lineares, de qualquer tipo, precisam ser linearizadas antes de se aplicar o ajuste por MMQ.

### 2.13.2 Ajuste polinomial

De acordo com Pedrosa (2005), um caso especial de ajuste de curvas ocorre quando o diagrama de dispersão não apresenta característica linear. Nesta situação pode-se realizar o ajuste polinomial, utilizando as seguintes funções  $g_i(x)$ :

$$\begin{aligned} g_0(x) &= 1 \\ g_1(x) &= x \\ g_2(x) &= x^2 \\ &\vdots \\ g_m(x) &= x^m \end{aligned}$$

Deste modo, tem-se a seguinte equação:

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m;$$

ou seja,  $f(x)$  é um polinômio de grau  $m$ .

Para o cálculo dos coeficientes  $a_i$  deve-se dispor de um número mínimo de equações  $m+1$  (quanto maior o número de dados  $x$  e  $f(x)$ , maior será a representatividade do ajuste).

Os dados devem ser organizados em um sistema de equações normais do tipo:

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \dots & \sum x_i^m \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \dots & \sum x_i^{m+1} \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \dots & \sum x_i^{m+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_i^m & \sum x_i^{m+1} & \sum x_i^{m+2} & \dots & \sum x_i^{2m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum y_i x_i \\ \sum y_i x_i^2 \\ \vdots \\ \sum y_i x_i^m \end{bmatrix}$$

No sistema matricial o número de linhas corresponde ao número de equações indicado pela letra  $n$  (sendo  $n > m$ ).

## 3 MÉTODOS E TÉCNICAS

### 3.1 Materiais

Os materiais de maior relevância utilizados no desenvolvimento deste trabalho estão relacionados a seguir:

- 12 fotografias aéreas na escala aproximada 1:10.000, com base de papelão, do ano de 1992, que cobrem áreas do campus da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM e regiões vizinhas;
- Estereoscópio de bolso;
- Microcomputador AMD Athlon XP 2200, 768 Mb RAM.
- Impressora
- Receptor GPS ProMark2
- Trena
- Mesa Digitalizadora marca Digigraf, modelo Van Gogh, tamanho A0;
- Sistema Territorial CR CAMPEIRO 5 (Programa SigDER - UFSM)
- *Software* AeroSys v3.1 (versão demonstrativa);
- *Software* Origin (versão demonstrativa)
- *Software* LABFit (versão demonstrativa)
- *Software* TCGeo (disponibilizado no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE ).

### 3.2 Métodos

Para realização da aerotriangulação, foram seguidos passos em conformidade com as alternativas fornecidas pelo *software* especialista (AeroSys v3.1) utilizado no desenvolvimento deste trabalho. Este *software* permite realizar a aerotriangulação por faixas e aerotriangulação por blocos.

Na aerotriangulação por faixas aplicou-se a seguinte metodologia:

Foram utilizadas 3 faixas adjacentes, cada uma com 4 fotogramas, portanto, com três modelos estereoscópicos por faixa. As faixas utilizadas foram: faixa 5 (fotogramas 19, 20, 21 e 22), faixa 6 (fotogramas 17, 18, 19 e 20) e faixa 7 (fotogramas 22, 23, 24 e 25).

Neste processo foram usados pontos de apoio conforme as seguintes alternativas:

- A1: 3 pontos de apoio, um em cada modelo estereoscópico;
- A2: 4 pontos de apoio, sendo 2 no primeiro modelo e 1 no segundo e 1 no terceiro;
- A3: 5 pontos de apoio, sendo 2 no primeiro modelo, 1 no segundo e 2 no terceiro;
- A4: 6 pontos de apoio, 2 em cada modelo;
- A5: 9 pontos de apoio, 3 em cada modelo.

Na aerotriangulação por bloco utilizaram-se as três faixas já citadas. Para realização da aerotriangulação por este método, foram utilizados pontos de apoio conforme as seguintes alternativas:

- B1: 3 pontos de apoio,
- B2: 4 pontos de apoio,
- B3: 5 pontos de apoio,
- B4: 6 pontos de apoio,
- B5: 9 pontos de apoio,

Os pontos de apoio escolhidos, em cada uma das alternativas discriminadas, foram os que apareceram no maior número de modelos estereoscópicos.

O levantamento de coordenadas de pontos de apoio terrestre foi efetuado com o receptor GPS ProMark2, aplicando-se o método de posicionamento relativo pós-processado, com um tempo de rastreamento de 20 minutos. Os pontos levantados foram selecionados entre os facilmente identificáveis nas fotografias aéreas, com os devidos cuidados especiais para se evitar os que sofreram modificações temporais, haja vista, a característica temporal dos fotogramas.

As coordenadas planimétricas dos pontos de apoio levantados foram referenciadas ao sistema de coordenadas planas *E* e *N* da projeção cartográfica UTM (Universal Transversa de Mercator – SAD 69) correspondente ao fuso 22. As coordenadas planas foram obtidas a partir das coordenadas geodésicas fornecidas pelo GPS, utilizando-se o *software* TCGeo para a respectiva transformação.

Como coordenada altimétrica dos pontos, foi tomada a altura ortométrica ( $h$ ), referida ao *datum* de Imbituba – SC, calculada a partir da altura elipsoidal fornecida pelo GPS e a ondulação geoidal fornecida pelo IBGE.

Para a realização das aerotriangulações, faz-se necessário fornecer ao *software* coordenadas de pontos que aparecem nos fotogramas, referidas ao sistema fiducial de eixos. A medição dessas coordenadas é efetuada geralmente com monocomparador ou estereocomparador.

Neste trabalho, com o objetivo de fornecer uma nova alternativa ao processo de aerotriangulação e diminuir os custos, as coordenadas dos pontos das fotografias aéreas foram medidas com o uso de uma mesa digitalizadora em substituição aos aparelhos fotogramétricos. O próprio *software* faz as transformações inerentes à aerotriangulação.

Uma vez realizada a aerotriangulação, conforme as metodologias explicitadas, foram calculadas as coordenadas do terreno dos pontos de verificação e dos pontos de restituição. Definir-se-ão estes pontos a seguir:

**Pontos de verificação:** foram denominados pontos de verificação os pontos cujas coordenadas foram levantadas no terreno com GPS e não foram usadas para aerotriangulação, porém as coordenadas no terreno foram calculadas fornecendo-se as coordenadas de fotografia (estes pontos, segundo o manual do *software*, são chamados de *check points*).

**Pontos de restituição:** recebem este nome os pontos escolhidos nas proximidades dos pontos de Von Grüber, cujas coordenadas do terreno foram calculadas pela aerotriangulação fornecendo-se as coordenadas de fotografia e que, eventualmente, poderão ser utilizados para orientação absoluta, caso o par de fotografias venha a ser restituído.

Quando os pontos de apoio ou de verificação estiverem nas proximidades dos pontos de Von Grüber, estes podem cumprir a função de pontos de restituição; portanto não há a necessidade de escolher tais pontos (pontos de restituição).

### 3.2.1 Entrada de dados e formato de arquivos para aplicação do *software* de aerotriangulação

Os processos de aerotriangulações desenvolvidos neste trabalho foram realizados com a utilização do *software* especialista AeroSys v3.1. Este *software* possui uma versão demonstrativa, utilizada neste trabalho e que pode ser obtida gratuitamente via internet.

Para a realização da aerotriangulação é indispensável que se tenham determinados dados. Os dados necessários e suficientes na realização do processo são: coordenadas de pontos de apoio (três, tanto para aerotriangulação por faixa ou por bloco), coordenadas fotográficas (coordenadas de imagem, também chamadas de coordenadas de máquina) e dados de calibração da câmara fotogramétrica. Além destes dados o *software* permite fazer o uso de dados de posicionamento da aeronave com GPS (vôo apoiado) que não foram usados no desenvolvimento deste trabalho.

Com relação aos pontos de apoio terrestre, que no caso deste trabalho foram levantados com a utilização do sistema GPS, para serem utilizados no programa eles devem estar formatados de acordo com o arquivo de dados de campo do *software* com extensão \*.CTL. No quadro 1 tem-se um exemplo de arquivo com essa extensão:

CTL					
Project ID: DEMO Translation from I2S format					
12001	507681.770	182205.430	1016.220	0.100	0.200
12002	507191.920	182598.290	0.000	0.100	0.000
12003	507570.060	183136.670	1009.280	0.100	0.200
12004	507902.430	184339.570	1008.680	0.100	0.200
12005	508212.620	184480.850	1013.040	0.000	0.000
12006	507883.320	185440.760	1028.680	0.000	0.000
12007	508608.200	185616.830	1021.530	0.000	0.000
12008	508200.610	186609.520	987.380	0.100	0.200
12009	508567.200	186918.570	988.490	0.100	0.200
12010	508711.670	187977.500	975.690	0.100	0.200
12011	508699.070	189445.830	1007.160	0.100	0.200
12012	509067.720	189595.550	992.930	0.100	0.200
12013	508945.470	190686.000	1018.830	0.100	0.200
12014	509289.700	191254.910	974.610	0.100	0.200
12015	508883.100	191953.450	982.600	0.100	0.200
12016	509064.430	193189.380	1018.900	0.100	0.200
12017	508657.360	193514.660	1035.550	0.100	0.200
12018	508286.990	194475.080	1025.970	0.100	0.200
12019	509585.680	193829.420	987.210	0.100	0.200
-99					
-99					

Quadro 1 – Exemplo de arquivo no formato CTL. Fonte Stevens, 1989.

Cabe ressaltar que na primeira linha desse arquivo está a sua denominação ‘CTL’ e na segunda linha está a identificação do projeto (o nome do projeto não deve exceder 80 caracteres). A partir da terceira linha são colocados os dados dos pontos de controle.

A primeira coluna dos pontos de controle é formada pela identificação dos mesmos, a segunda pela coordenada *E*, a terceira pela coordenada *N*, a quarta pela altitude, a quinta pelo desvio padrão planimétrico e a sexta pelo desvio padrão altimétrico.

Nota-se, no fim deste arquivo, a presença de dois números “-99”. Estes números representam a finalização dos pontos de controle, e, se entre eles for colocado algum ponto, este será transformado em um ponto de checagem, ou seja, as suas coordenadas serão calculadas dando a possibilidade de compará-las com os dados obtidos em campo.

A mensuração das coordenadas dos pontos de apoio, de verificação e de restituição nos fotogramas foi realizada na mesa digitalizadora e estes pontos foram identificados estereoscopicamente. Salienta-se que as referidas coordenadas são bidimensionais e correspondentes a cada fotograma.

No processo de mensuração das coordenadas de pontos sobre os fotogramas devem ser medidas também as coordenadas das marcas fiduciais de cada um dos fotogramas. O arquivo gerado com estes dados tem a extensão \*.tri, o qual é formado pelas coordenadas fotográficas que não sofreram nenhum processo de refinamento. Um exemplo desse tipo de arquivo é mostrado no quadro 2.

1	5	1	-104389.1	-108294.2
1	5	2	-106049.1	103592.9
1	5	3	105873.1	105264.2
1	5	4	107505.1	-06659.9
1	5	1061	-94232.8	86137.8
1	5	1062	-89798.9	1671.6
1	5	1063	-91036.5	-72484.4
1	5	1051	2382.1	71045.5
1	5	1052	217.5	-105.7
1	5	1053	1092.7	-82452.6
1	5	22002	-82595.5	-70706.1
1	5	12001	-47780.3	-38326.5
1	5	1064	-38742.9	2866
1	5	12002	-22602	19172.4
1	5	22001	-52187.7	96196.6
1	5	1041	84100.4	84919.9
1	5	1042	84640	-1021.7
1	5	1043	84600.3	-69338.1
1	5	12003	38812	-3203.2

Quadro 2 – Exemplo de arquivo de coordenadas de fotografia com extensão \*.tri. Modificado de Stevens, 1989.

Neste arquivo a primeira coluna identifica o número da faixa do fotograma, a segunda indica o número do fotograma, a terceira identifica o ponto, a quarta é das coordenadas  $x$  e a quinta das coordenadas  $y$ .



No *software* este arquivo será reorganizado. Passará para um arquivo com extensão \*.phc, e depois as coordenadas serão transformadas para o sistema fiducial (processo denominado refinamento pelo *software* mostrado no arquivo com extensão \*.REF) valendo-se dos dados de calibração da câmara fotogramétrica utilizada.

Uma condição muito importante com relação às coordenadas fotográficas é que se deve ter pelo menos cinco pontos homólogos em cada par de fotogramas entre os quais podem estar os pontos de apoio, os de verificação e os de restituição.

Criados os arquivos de dados principais para o programa procede-se então com a criação de um projeto no *software*. Neste projeto podem ser informados todos os dados relevantes ao trabalho desenvolvido além de informações necessárias ao processo de aerotriangulação (arquivos listados anteriormente).

As etapas do processo de aerotriangulação podem ser realizadas de maneira automática, escolhendo-se os passos a serem seguidos na janela de diálogo de configuração da auto-seqüência dos cálculos correspondentes.

Para cada passo realizado há a geração de um arquivo correspondente com todas as informações do processo realizado. Entre esses arquivos o de maior interesse é o de extensão \*.XYZ, pois ele contém as coordenadas de todos os pontos que fazem parte do processo de aerotriangulação. No quadro 3 é ilustrado o exemplo desse tipo de arquivo.

Na primeira linha deste arquivo está a sua denominação 'XYZ'; na segunda, a identificação do projeto e a partir da terceira linha estão dispostos os pontos com suas coordenadas. A nomenclatura '3D' presente no arquivo indica que o ponto é de apoio com coordenadas planialtimétricas, 'HC' indica que ele é um ponto de apoio com coordenadas planimétricas, 'VC' indica que é um ponto de apoio altimétrico. A denominação 'PP' (*pass point*), neste trabalho, indica que ele é um ponto de verificação ou de restituição, ou seja, um ponto que não possui as coordenadas de campo.

Uma vez introduzidos todos os dados se está em condição de efetuar a aerotriangulação e, para isto, basta acionar o comando correspondente. A aerotriangulação fornece como resultado de maior relevância as coordenadas planialtimétricas de todos os pontos introduzidos como dados.

XYZ				
Project: Four Photo Demo Strip				
6122	507114.230	184016.270	1025.140	3D
12001	507681.770	182205.430	1016.220	3D
12003	507570.060	183136.670	1009.280	3D
12004	507902.430	184339.570	1008.680	3D
16112	506806.810	184373.570	1020.270	3D
26114	506879.410	184024.900	1018.340	3D
12002	507191.920	182598.290	1012.995	HC
22001	506371.392	182513.607	1004.060	VC
22002	507898.379	181795.365	1030.800	VC
1033	508686.499	184246.918	1006.718	PP
1041	506826.802	183815.681	1001.536	PP
1042	507669.935	183591.542	1012.205	PP
1043	508334.684	183408.300	1023.088	PP
1051	506760.278	182973.692	1022.075	PP
1052	507437.954	182768.337	1016.874	PP
1053	508238.944	182561.005	1019.397	PP
1061	506368.700	182087.556	1012.969	PP
1062	507191.221	181921.563	1038.639	PP
1031	507201.624	184642.474	1045.509	PP
1032	507919.931	184473.480	1008.238	PP
1063	507892.861	181711.900	1031.946	PP
1044	507785.243	184102.694	1005.585	PP
1064	507307.398	182399.233	1010.689	PP
-99				

Quadro 3 – Exemplo de um arquivo de coordenadas de pontos com extensão \*.XYZ. Modificado de Stevens, 1989.

A partir dos resultados obtidos em cada um dos casos estudados pode-se avaliar os erros presentes no processo de aerotriangulação.

### 3.2.2 Avaliação de erros das aerotriangulações

A avaliação dos erros foi realizada segundo análise dos seguintes erros:

- Erro verdadeiro de  $E (E_v)$ ,  $N (N_v)$  e  $h (h_v)$ ;
- Erro absoluto de  $E (\Delta E)$ ,  $N (\Delta N)$  e  $h (\Delta h)$ ;
- Erro médio quadrático (EMQ) das coordenadas  $E$  e  $N$  e da altura  $h$ ;
- Erro planimétrico;

- Erro total ( $\Delta T$ );
- Erro absoluto e relativo de distâncias.

As fórmulas dos erros absolutos das coordenadas empregadas nos cálculos destes erros são mostradas a seguir:

$$\Delta E = |E_o - E_v|,$$

onde

$\Delta E$  = erro absoluto da coordenada  $E$ ;

$E_o$  = valor observado de  $E$ , isto é, calculado por meio da aerotriangulação;

$E_v$  = valor da coordenada  $E$  determinado com GPS (considerado verdadeiro).

$$\Delta N = |N_o - N_v|,$$

onde

$\Delta N$  = erro absoluto da coordenada  $N$ ;

$N_o$  = valor observado de  $N$ , isto é, calculado por meio da aerotriangulação;

$N_v$  = valor da coordenada  $N$  determinado com GPS (considerado verdadeiro).

$$\Delta h = |h_o - h_v|,$$

onde

$\Delta h$  = erro absoluto da coordenada  $h$ ;

$h_o$  = valor observado de  $h$ , isto é, calculado por meio da aerotriangulação;

$h_v$  = valor de  $h$  determinado com GPS (considerado verdadeiro).

Os erros médios quadráticos das coordenadas  $E$ ,  $N$  e  $h$  foram calculados, usando-se as seguintes fórmulas:

$$EMQ_E = \sqrt{\frac{\sum \Delta E^2}{n-1}}, \quad EMQ_N = \sqrt{\frac{\sum \Delta N^2}{n-1}} \quad \text{e} \quad EMQ_h = \sqrt{\frac{\sum \Delta h^2}{n-1}}.$$

O erro planimétrico foi obtido mediante o uso da seguinte fórmula:

$$\Delta P = \sqrt{\Delta E^2 + \Delta N^2},$$

e para o cálculo do erro total utilizou-se a fórmula:

$$\Delta T = \sqrt{\Delta E^2 + \Delta N^2 + \Delta h^2} .$$

O cálculo das distâncias planimétricas, necessárias para a avaliação do erro relativo, foram calculadas da seguinte forma:

$$D_o = \sqrt{(E_{o2} - E_{o1})^2 - (N_{o2} - N_{o1})^2} \quad \text{e} \quad D_v = \sqrt{(E_{v2} - E_{v1})^2 - (N_{v2} - N_{v1})^2} ,$$

onde:

$D_o$  é a distância observada (usando-se as coordenadas da aerotriangulação)

$D_v$  é a distância considerada verdadeira (com coordenadas levantadas com GPS)

O erro relativo de distâncias foi calculado mediante o emprego da seguinte fórmula:

$$Er = \frac{D_o - D_v}{D_v} .$$

Em alguns casos buscou-se reduzir os erros encontrados por meio de ajustes de funções. Estes ajustes foram realizados utilizando-se os *softwares Origin e LABFit* .

Os resultados de erros foram comparados com o padrão de exatidão cartográfica (PEC), para se estabelecerem as possíveis escalas de mapeamentos para os mesmos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os dois métodos de Aerotriangulação aplicados neste trabalho, isto é, AT por faixa e AT por bloco, usando-se o *software* AeroSys com diferentes números de pontos de apoio e as coordenadas fiduciais de pontos medidas pela mesa digitalizadora citada no item 3.1, obteve-se os seguintes resultados:

### 4.1 Aerotriangulação por faixa

Com as coordenadas calculadas pela aerotriangulação por faixa, com diferentes números de pontos de apoio, foram obtidos os erros verdadeiros das coordenadas  $E$  ( $\Delta E$ ),  $N$  ( $\Delta N$ ) e  $h$  ( $\Delta h$ ). Também foram calculados os erros planimétricos ( $\Delta P$ ) e o erro total ( $\Delta T$ ). Os valores desses erros (em metros) são mostrados nos quadros de número 4 a 14.

Primeiramente são mostrados os erros referentes à faixa 5, seguindo-se o critério especificado no item 3.2.

- Faixa 5 com 3 pontos de apoio (A1):

O menor erro em módulo encontrado para a coordenada  $E$  foi o do ponto 2010 com 1,311 m, enquanto que o maior foi o apresentado pelo ponto 2019 com 11,963 m. O ponto 2010 está localizado na parte central periférica superior da fotografia, perto da marca fiducial (a 1 cm da borda da fotografia e a 1,5 cm da linha vertical que une as marcas fiduciais).

O ponto 2019 está localizado no canto inferior esquerdo, a uma distância de 6,5 cm da borda esquerda e a 4,5 cm da borda inferior do fotograma de número 20.

Com relação à  $\Delta N$ , observa-se no quadro 4 que o menor valor em módulo corresponde ao ponto 2001, com o valor de 2,196 m. Este ponto está localizado no canto inferior direito, e dista 3 cm da borda direita e 2,4 cm da borda inferior do fotograma de número 21, enquanto que no fotograma 22 esse ponto está localizado a uma distância de 2,3 cm da borda inferior e a 0,7 cm da linha vertical que une as marcas fiduciais. O maior erro para essa coordenada ( $N$ ) corresponde ao ponto 2010 com  $\Delta N = 14,55$ ; o qual está localizado

a 1 cm da borda superior e a 1,5 cm da linha vertical que une as marcas fiduciais do fotograma 19.

Ponto	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta P$	$\Delta h$	$\Delta T$
2001	-3,153	-2,196	3,842	24,476	24,775
2002	-3,726	-5,848	6,934	22,803	23,834
2003	9,144	3,320	9,728	43,960	45,023
2009	-10,407	5,651	11,842	-4,572	12,694
2010	-1,311	14,550	14,608	-8,353	16,828
2011	5,961	2,874	6,617	-9,169	11,307
2012	2,890	-5,414	6,137	-4,103	7,382
2015	-7,765	-6,039	9,836	17,275	19,879
2017	-6,607	-12,699	14,314	14,605	20,450
2019	-11,963	-6,853	13,786	2,913	14,091
2034	4,446	-7,746	8,931	31,521	32,761
2036	4,008	-7,654	8,639	28,772	30,041

Quadro 4 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A1 na faixa 5.

Com relação a  $\Delta h$  tem-se uma variação em módulo de 2,913 a 43,96 m. O maior erro corresponde ao ponto 2003, cuja localização no fotograma 21 dista 2,3 cm da borda direita e 3,2 cm da borda superior, e na fotografia aérea de número 22 está a 3,7 cm da borda superior e a 1,4 cm da linha vertical que une as marcas fiduciais. O ponto de menor valor é o ponto 2019, que corresponde ao maior valor absoluto de  $\Delta E$ .

O erro total das coordenadas, isto é, analisando-se  $E$ ,  $N$ , e  $h$  concomitantemente, apresenta uma variação entre 11,307 e 45,023 m, correspondentes aos pontos 2011 e 2003. O ponto 2011 está localizado na região periférica central superior do fotograma número 20, distando 2,35 cm da sua borda superior.

- Faixa 5 com 4 pontos de apoio (A2):

Ponto	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta P$	$\Delta h$	$\Delta T$
2001	-3,562	2,549	4,380	11,206	12,031
2002	-6,226	-3,201	7,001	14,962	16,519
2003	4,623	4,343	6,343	41,025	41,512
2010	-1,141	5,521	5,637	7,843	9,658
2011	4,673	-1,517	4,913	2,857	5,683
2012	-0,301	-6,713	6,719	2,685	7,236
2015	-9,428	-3,022	9,900	8,591	13,108
2017	1,151	-7,062	7,155	6,823	9,886
2019	-1,199	-6,180	6,295	0,288	6,301
2034	4,183	-3,930	5,739	20,926	21,698
2036	4,380	-3,050	5,337	16,336	17,185

Quadro 5 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A2 na faixa 5.

O menor erro em módulo para coordenada  $E$  foi do ponto 2012, com 0,301 m, enquanto que o maior erro absoluto para a mesma coordenada foi apresentado pelo ponto 2015 com o valor de 9,428 m. O ponto 2012 está localizado a 1,7 cm da borda superior e a 4,3 cm da borda direita do fotograma de numero 20.

Com relação a  $\Delta N$  o menor valor absoluto encontrado foi o do ponto 2011, com 1,517 m e cuja localização já foi mencionada anteriormente, enquanto que o maior erro absoluto foi apresentado pelo ponto 2017, com o valor de 7,062 m e que está localizado a 2,5 cm da borda inferior e a 0,3 cm da linha vertical que une as marcas fiduciais.

O maior erro total na AT por faixa, tomando-se 4 pontos de apoio, obteve-se para o ponto 2003 e o menor, para o ponto 2011, 41512 m e 5,683 m respectivamente.

- Faixa 5 com 5 pontos de apoio (A3):

Neste processo de AT, o menor erro absoluto para a coordenada  $E$  foi apresentado pelo ponto 2002 ( $\Delta E = 1,424$  cm), o qual está localizado na parte periférica central esquerda do fotograma de número 21, distando 2,95 cm da borda esquerda do mesmo. O maior valor de erro para essa coordenada foi do ponto 2003, com o valor de 12,429 m.

Ponto	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta P$	$\Delta h$	$\Delta T$
2001	4,580	-0,021	4,580	2,465	5,201
2002	1,424	0,302	1,455	6,612	6,770
2003	12,429	12,923	17,929	31,953	36,639
2010	-3,416	5,205	6,225	8,538	10,566
2011	3,847	1,540	4,143	5,546	6,923
2012	1,463	1,335	1,980	5,283	5,642
2017	1,681	-7,744	7,924	9,546	12,406
2019	-1,527	-6,420	6,599	2,668	7,118
2034	10,824	-5,258	12,033	14,099	18,536
2036	11,184	-6,207	12,790	8,967	15,621

Quadro 6 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A3 na faixa 5.

Na coordenada  $N$ , o maior erro absoluto também foi apresentado pelo ponto 2003, com o valor de 12,923 m, enquanto que o menor erro absoluto foi observado no ponto 2001 ( $\Delta N = 0,021$  m).

Analisando-se o erro total, pode-se observar que o maior erro foi apresentado pelo ponto 2003 e o menor, pelo ponto 2001.

- Faixa 5 com 6 pontos de apoio (A4):

Ponto	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta P$	$\Delta h$	$\Delta T$
2001	-0,798	0,889	1,194	9,640	9,713
2002	-2,830	-1,345	3,133	10,522	10,978
2003	9,051	9,405	13,052	33,400	35,859
2009	-0,545	1,666	1,752	-0,607	1,855
2010	-3,317	7,418	8,125	1,326	8,233
2011	3,173	2,822	4,246	-1,513	4,507
2014	1,544	2,981	3,357	-2,334	4,088
2015	-6,633	-2,117	6,962	5,257	8,724
2019	-0,620	-3,670	3,722	-1,380	3,969
2034	6,224	-4,621	7,751	19,247	20,749
2036	6,243	-4,829	7,892	15,424	17,326

Quadro 7 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A4 na faixa 5.



Na AT realizada na faixa 5, com 2 pontos de apoio em cada modelo estereoscópico (faixa com três modelos estereoscópicos perfazem um total de 6 pontos de apoio), o menor valor do erro absoluto para coordenada  $E$  foi apresentado pelo ponto 2009 com o valor de 0,545 m, enquanto que o ponto 2003 apresentou o maior valor ( $\Delta E = 9,051$  m). O ponto 2009 está localizado no canto inferior esquerdo do fotograma de número 20 a uma distância de 4,3 cm da borda inferior e a 6,4 cm da borda esquerda.

O menor erro absoluto apresentado pela coordenada  $N$  foi no ponto 2001 cujo valor é de 0,889 m. O maior erro para a mesma coordenada foi apresentado pelo ponto 2003 com o valor de 9,405 m.

Com relação ao erro total, os valores variam entre 1,855 e 35,860 m, correspondente, aos pontos 2009 e 2003 respectivamente.

- Faixa 5 com 9 pontos de apoio (A5):

No trabalho realizado com 3 pontos de apoio em cada modelo, nesta faixa o menor erro absoluto apresentado para a coordenada  $E$  foi pelo ponto 2009 e o maior erro foi o do ponto 2003, assim como o relatado para o cálculo realizado com 2 pontos de apoio por modelo. Na coordenada  $N$  o maior valor encontrado foi o do ponto 2003, enquanto que o menor valor foi o do ponto 2001. Os valores desses erros podem ser vistos no quadro 8.

Ponto	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta P$	$\Delta h$	$\Delta T$
2001	-2,189	-1,277	2,534	9,001	9,350
2002	-3,014	-4,055	5,052	9,054	10,368
2003	10,295	7,380	12,666	31,015	33,501
2009	-0,378	1,562	1,607	0,749	1,773
2010	-3,049	7,292	7,903	3,084	8,484
2011	3,181	2,294	3,921	-1,599	4,235
2015	-7,179	-4,683	8,571	4,203	9,546
2034	5,160	-6,777	8,517	18,829	20,666
2036	4,835	-6,694	8,257	15,278	17,366

Quadro 8 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A5 na faixa 5.

O erro total apresentou maior valor no ponto 2003 ( $\Delta T = 33,502$  m) e o menor valor no ponto 2009, com 1,775 m de erro.

Com relação aos erros verdadeiros das coordenadas da faixa 6, de forma análoga à faixa 5, os resultados são mostrados a seguir:

- Faixa 6 com 3 pontos de apoio (A1):

Ponto	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta P$	$\Delta h$	$\Delta T$
2001	10,147	1,318	10,232	-8,527	13,319
2008	2,389	9,089	9,397	28,422	29,935
2029	0,177	9,615	9,616	-0,265	9,620
2034	6,529	3,006	7,187	-0,749	7,226

Quadro 9 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A1 na faixa 6.

Nesse estudo de aerotriangulação, no qual foi utilizado apenas um ponto de apoio em cada modelo estereoscópico, o menor valor de erro para a coordenada  $E$  foi apresentado pelo ponto 2029, com o valor de 0,177 m. Esse ponto está localizado na parte central do fotograma 17, enquanto que o maior erro foi calculado no ponto 2001, que se localiza próximo à borda direita do fotograma de número 19, distando 0,3 cm da mesma e a 7,4 cm da borda superior.

Com relação a  $N$  o maior erro foi observado no ponto 2029, com 9,615 m, e o menor erro foi apresentado pelo ponto 2001 cujo valor é 1,318 m.

O maior erro total foi apresentado pelo ponto 2008 que se localiza no canto superior esquerdo do fotograma 18, que dista 0,75 cm da borda esquerda e a 3,5 cm da borda superior do fotograma.

- Faixa 6 com 4 pontos de apoio (A2):

O maior erro para a coordenada  $E$ , encontrado neste cálculo, foi para o ponto 2035 com o valor de 17,954 m. Esse ponto situa-se no canto inferior direito no fotograma 19 e dista 0,7 cm da borda direita do fotograma. O menor valor de erro em módulo, para a mesma coordenada, foi verificado no ponto 2017 ( $\Delta E = 1,38$  m) o qual está localizado a 6,4 cm da borda superior e a 7,6 cm da borda direita do fotograma 18.

Ponto	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta P$	$\Delta h$	$\Delta T$
2001	9,908	7,406	12,370	-1,854	12,508
2004	12,571	-7,601	14,690	-14,547	20,674
2005	11,185	4,660	12,116	-3,374	12,577
2008	-4,103	0,436	4,126	14,227	14,813
2017	-1,380	-2,916	3,226	-2,037	3,815
2020	5,047	-2,812	5,777	-9,540	11,153
2021	7,646	-6,838	10,257	-11,889	15,702
2022	8,933	-9,878	13,318	-7,357	15,215
2034	4,957	7,933	9,354	0,176	9,356
2035	17,954	-6,458	19,080	-13,381	23,304
2036	5,510	4,828	7,325	-2,194	7,647

Quadro 10 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A2 na faixa 6.

Na coordenada  $N$  o maior erro em módulo encontrado foi no ponto 2022, com o valor de 9,878 m. A localização desse ponto no fotograma 18 é no canto inferior direito, que dista 0,5 cm da borda direita e 2,7 da inferior.

O menor erro absoluto, na mesma coordenada, foi obtido com o ponto 2008, localizado na parte periférica superior do fotograma 17, cujo valor é de 0,436 m.

Com relação ao erro total, o maior valor foi observado no ponto 2035, com 23,305 m, de erro e o menor valor foi o do ponto 2017, com 3,815 de erro.

- Faixa 6 com 5 pontos de apoio (A3):

Ponto	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta P$	$\Delta h$	$\Delta T$
2001	9,909	7,402	12,368	-1,817	12,501
2004	12,570	-7,601	14,689	-14,671	20,760
2005	11,185	4,658	12,116	-3,391	12,581
2008	-4,102	0,436	4,125	14,278	14,861
2017	-1,380	-2,914	3,224	-2,050	3,820
2020	5,046	-2,811	5,776	-9,614	11,215
2021	7,645	-6,837	10,256	-12,008	15,791
2022	8,932	-9,877	13,316	-7,474	15,270
2035	17,953	-6,459	19,079	-13,493	23,368
2036	5,510	4,824	7,323	-2,169	7,637

Quadro 11 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A3 na faixa 6.

Os pontos com erro absoluto máximo e mínimo para as coordenadas  $E$ ,  $N$  e para o erro total são os mesmos apresentados na faixa 6 com 4 pontos de apoio, apenas com uma diferença de erro entre ambas de no máximo 0,005 m, ou seja, os valores dos erros encontrados também são muito próximos.

- Faixa 6 com 6 pontos de apoio (A4):

Neste caso também foram encontrados os mesmos pontos com valores de erro absoluto máximo e mínimo similares aos da faixa 6 com 4 pontos de apoio. Os valores destes erros figuram no quadro 12.

Ponto	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta P$	$\Delta h$	$\Delta T$
2001	9,275	4,564	10,337	0,331	10,342
2004	8,873	-8,314	12,159	-9,670	15,535
2005	9,639	2,475	9,951	-0,392	9,959
2008	-4,544	1,106	4,676	13,632	14,411
2017	-1,527	-1,744	2,318	-1,171	2,597
2020	3,999	-1,504	4,272	-9,139	10,088
2021	4,996	-5,722	7,596	-9,380	12,070
2022	5,980	-8,823	10,658	-4,634	11,622
2035	14,062	-8,142	16,249	-7,676	17,970
2036	4,787	2,565	5,430	-0,211	5,434

Quadro 12 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A4 na faixa 6.

- Faixa 6 com 9 pontos de apoio (A5):

Na coordenada  $E$  o maior erro absoluto apresentado foi o do ponto 2035, assim como na faixa com 4 pontos de apoio; e o menor erro absoluto para a mesma coordenada é do ponto 2021, cujo valor é de 1,84 m. Esse ponto está localizado no canto inferior esquerdo do fotograma 18, distando 2,6 cm da borda direita e 3,6 cm da borda inferior do fotograma.

Ponto	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta P$	$\Delta h$	$\Delta T$
2001	9,073	3,223	9,628	1,289	9,714
2005	8,618	0,878	8,662	4,220	9,635
2017	-2,317	-1,542	2,783	-0,406	2,812
2021	1,840	-6,922	7,162	4,337	8,373
2022	2,816	-10,432	10,805	9,833	14,609
2035	11,702	-10,570	15,769	4,089	16,290
2036	4,218	1,412	4,448	1,869	4,824
12004	6,267	-10,412	12,152	3,266	12,583
12034	4,803	4,542	6,610	1,138	6,707

Quadro 13 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método A5 na faixa 6.

Na coordenada  $N$  o maior erro absoluto foi obtido com o ponto 2035, com o valor de 10,57 m, e o menor erro absoluto foi o do ponto 2036, o qual está localizado na região periférica central do fotograma de número 19, que dista 2,6 cm da borda direita e a 8,3 cm da borda superior.

Com relação ao erro total, os valores variam entre 2,813 e 14,609 m, correspondentes aos pontos 2017 e 2022 respectivamente.

- Faixa 7 (A1, A2, A3, A4 e A5)

A faixa 7, localizada a sul das duas faixas anteriores abrange área de campo e, nesse tipo de paisagem, existem poucos pontos notáveis que possam ser identificados nos fotogramas e cujas coordenadas possam ser levantadas com GPS para serem usados como pontos de apoio na AT. Por essa circunstância na faixa 7 tem-se poucos pontos com coordenadas terrestres conhecidas. Portanto, fez-se uma análise de forma geral dos pontos que apresentaram erro máximo e mínimo.

Os resultados dos erros para faixa 7, com diferentes números de pontos de apoio, estão dispostos no quadro 14.

Ponto	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta P$	$\Delta h$	$\Delta T$
2004	2,830	-1,434	3,172	-1,943	3,720
2020	20,245	-17,621	26,839	-14,594	30,550
2021	2,251	-1,863	2,921	-16,928	17,178
2023	-3,360	-2,916	4,448	1,058	4,572
Faixa 7 com 3 pontos de apoio					
2004	-3,531	-0,071	3,531	6,696	7,570
2021	-13,037	5,816	14,275	-5,340	15,241
2023	-7,026	-10,813	12,895	12,074	17,665
Faixa 7 com 4 pontos de apoio					
2004	2,076	1,718	2,694	-0,042	2,695
2021	-5,477	3,756	6,641	-6,282	9,141
Faixa 7 com 5 pontos de apoio					
2004	1,822	3,778	4,194	-0,376	4,211
2021	-5,565	5,446	7,786	-6,551	10,175
2035	3,405	0,086	3,406	12,204	12,670
Faixa 7 com 6 pontos de apoio					
2004	2,058	2,129	2,961	1,696	3,412
Faixa 7 com 9 pontos de apoio					

Quadro 14 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos na faixa 7 com diferentes números de pontos de apoio.

Com relação ao erro na coordenada  $E$ , o ponto que apresentou o menor erro absoluto foi o ponto 2004, no cálculo com 6 pontos de apoio, cujo valor foi de 1,822 m. O ponto 2004 está localizado na parte central do fotograma 23 a 6 cm da borda direita e a 9,5 cm da borda superior.

O maior valor para essa coordenada ( $E$ ) foi obtido com o ponto 2020, que apresentou o valor de 20,245 m. Esse ponto está situado no canto superior esquerdo do fotograma 23.

Para a coordenada  $N$  o módulo do maior erro encontrado foi com o ponto 2020, no caso de 3 pontos de apoio, e o menor valor foi o do ponto 2004, com 4 pontos de apoio.

No cálculo do erro total, o maior erro foi obtido com o ponto 2020 (3 pontos de apoio) e o menor é o do ponto 2004 (5 pontos de apoio).

Na análise feita anteriormente, além dos erros verdadeiros, absolutos, planimétricos e totais analisou-se também a localização dos pontos nos fotogramas, tendo em vista que a bibliografia relaciona sempre os erros encontrados nas avaliações com a localização dos mesmos.

Geralmente, a bibliografia indica que os maiores erros obtêm-se em pontos localizados na periferia dos fotogramas e, em contraposição a isso, os menores erros, na parte central dos fotogramas.

No presente trabalho essa relação não foi confirmada, erros maiores ou menores não estão relacionados com a posição dos pontos no fotograma.

A fim de ilustrar a assertiva anterior, mostra-se na figura 9 a localização dos pontos nos fotogramas da faixa 5 no método A1.

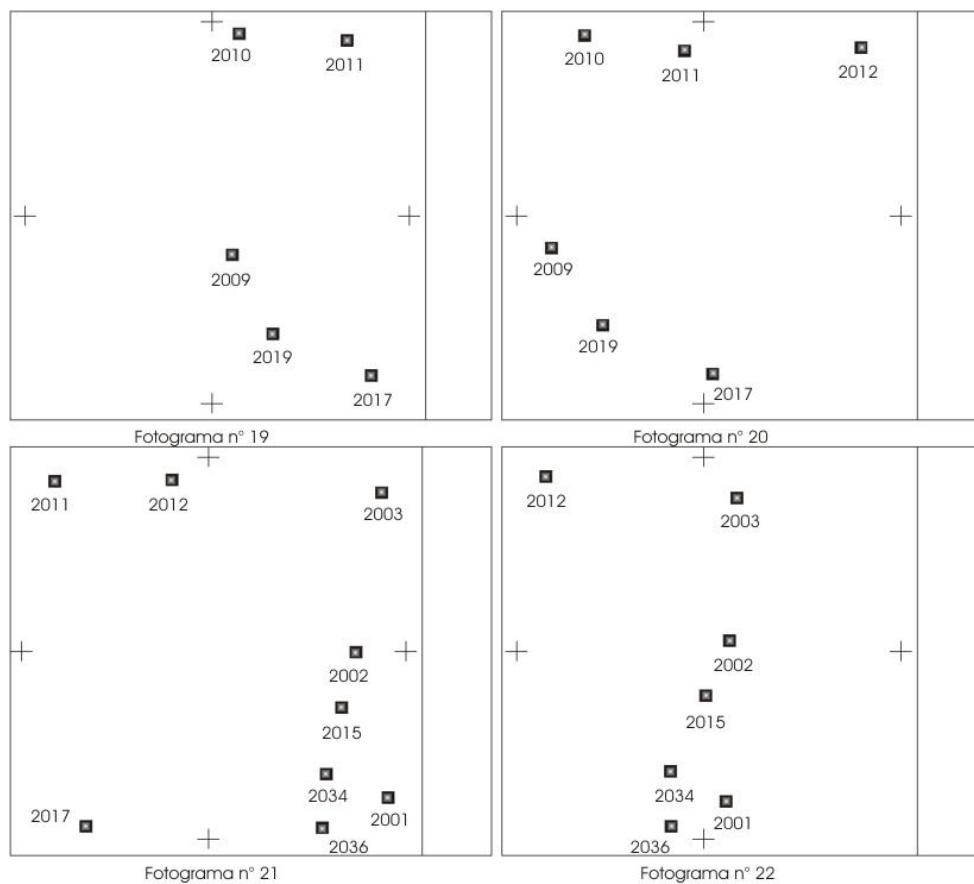


Figura 9 – Localização das marcas fiduciais e pontos de verificação nos fotogramas da faixa 5 no modelo A1.

Como pode ser visto, na figura 9, o ponto 2019, que apresenta maior erro absoluto na coordenada  $E$ , não está localizado na periferia, e o ponto 2010, que apresenta o menor erro, está localizado na região periférica do fotograma. O menor valor em módulo para a coordenada  $N$  corresponde a um ponto da periferia (2001). Esta figura exemplifica muito bem o que foi dito anteriormente. Entretanto não foi possível encontrar uma explicação plausível

para este comportamento, talvez densificando o número de pontos testados se consiga estabelecer uma relação entre a localização de pontos no fotogramas e os erros encontrados.

Ainda sobre os erros, Andrade (1998) diz que a propagação de erro é maior no sentido transversal à linha de vôo. Os resultados obtidos confirmaram esta premissa haja vista que o erro absoluto médio da coordenada  $N$  foi maior que o erro absoluto médio da coordenada  $E$  e o vôo foi realizado na direção leste-oeste.

#### 4.1.1 Erro Médio Quadrático (EMQ) das aerotriangulações por faixa

Os resultados dos erros médios quadráticos (em metros) dos erros absolutos das coordenadas  $E$ ,  $N$ , da altura  $h$  e do erro planimétrico obtidos nos diferentes métodos empregados nas faixas, são apresentados no quadro 15.

Nº de pontos de apoio	Faixa 5				Faixa 6				Faixa 7			
	$E$	$N$	$h$	$\Delta P$	$E$	$N$	$h$	$\Delta P$	$E$	$N$	$h$	$\Delta P$
3	3,297	3,691	12,866	3,470	4,425	4,213	13,176	1,328	8,727	7,799	8,296	11,681
4	2,693	1,839	11,509	1,471	4,667	2,764	5,595	4,807	4,808	5,375	3,561	5,845
5	4,461	4,016	8,591	5,235	4,794	2,798	5,393	5,060	2,404	1,441	4,412	2,790
6	2,894	2,641	10,227	3,526	3,650	3,053	4,906	4,273	1,878	2,742	5,915	2,334
9	2,948	2,498	9,912	3,532	3,425	4,123	2,835	3,984	---	---	---	---

Quadro 15 – EMQ dos erros absolutos na AT por faixa para as coordenadas  $E$ ,  $N$ ,  $h$  e do erro planimétrico.

Em linhas gerais, os maiores erros médios quadráticos correspondem à altura  $h$ , confirmando os resultados dos quadros de 4 a 14, nos quais os maiores erros verdadeiros pertencem a essa coordenada.

Outra característica relevante na análise do quadro 15 é que os valores de máximo e mínimo dos EMQ, nos três parâmetros calculados, independem do número de pontos de apoio empregados para a realização da AT. A priori, poder-se-ia esperar que, quanto maior fosse o número de pontos de apoio tomados, teoricamente maior seria a precisão do processo, portanto menor seria o EMQ, fato não confirmado pelos resultados obtidos.



Os EMQ apresentados no quadro 15 são um indicativo de que o georreferenciamento realizado teria um deslocamento com relação ao posicionamento verdadeiro. Tendo em vista este inconveniente, realizou-se um estudo do erro relativo de distâncias horizontais, visando o seu possível enquadramento nas especificações do padrão de exatidão cartográfica relacionado à escala.

#### 4.1.2 Erro Relativo de distâncias

Para esta análise, considerando-se sempre as piores condições, foram calculadas as distâncias de todos os pontos, com relação ao ponto de maior erro planimétrico. Os erros de distância envolvendo  $h$  não serão analisados, tendo em vista que a escala de modelos estereoscópicos pode prescindir da altura.

No quadro 16 são apresentadas as distâncias calculadas (usando-se os valores obtidos na AT), as distâncias verdadeiras (usando os valores obtidos com o GPS) e o erro relativo das distâncias. As distâncias mostradas são as encontradas entre o ponto 2003 (de maior erro planimétrico) em relação aos demais pontos de verificação da faixa 5 com 5 pontos de apoio (método no qual se encontra o maior  $\Delta P$  na faixa).

Ponto	Distância Calculada ao ponto 2003 (m)	Distância Verdadeira ao ponto 2003 (m)	Erro Relativo
2001	1719,4214630	1705,9933060	0,007871166
2002	881,4254687	867,7006597	0,015817447
2010	2388,5803710	2373,3357660	0,006423282
2011	1780,7323030	1772,5947260	0,004590771
2012	1033,6698020	1023,9488210	0,009493619
2017	2457,3229890	2435,1501480	0,009105328
2019	2729,1088990	2706,7649430	0,008254857
2034	1590,6621750	1572,5195230	0,011537314
2036	1851,6994470	1832,6233670	0,010409165
Média do erro relativo			0,009278105

Quadro 16 – Distâncias calculadas, verdadeiras e erro relativo de distâncias entre o ponto 2003 e os demais pontos de verificação da faixa 5 no método A3.

Na faixa 6 o ponto de maior erro planimétrico foi o 2035 no método A2. Portanto foram calculadas as distâncias entre ele e os demais pontos de verificação. Os resultados estão no quadro 17.

Ponto	Distância Calculada ao ponto 2035 (m)	Distância Verdadeira ao ponto 2035 (m)	Erro Relativo
2001	1262,8698280	1248,9336160	0,011158489
2004	345,7029318	340,2020044	0,016169591
2005	864,9245460	852,8274391	0,014184706
2008	3402,1434860	3379,2982920	0,006760336
2017	2070,0229980	2052,4687950	0,008552726
2020	1917,1349050	1903,7245470	0,007044274
2021	1024,0612920	1013,7500710	0,010171365
2022	870,2736512	861,0308596	0,010734565
2034	1441,3144780	1425,1327990	0,011354506
2036	1174,4040080	1161,0958750	0,011461701
Média do erro relativo			0,010759226

Quadro 17 – Distâncias calculadas, verdadeiras e erro relativo de distâncias entre o ponto 2035 e os demais pontos de verificação da faixa 6 no método A2.

Na faixa 7, mesmo com poucos pontos de verificação, também foram calculadas as distâncias entre o ponto de maior erro planimétrico (ponto 2020 no método A1) e os demais pontos de verificação. Os resultados obtidos são mostrados no quadro 18.

Ponto	Distância Calculada ao ponto 2020 (m)	Distância Verdadeira ao ponto 2020 (m)	Erro Relativo
2004	1580,7294930	1602,6111660	0,013653762
2021	941,1992578	964,7340563	0,024395115
2023	2293,6703060	2321,4809460	0,011979698
Média do erro relativo			0,016676192

Quadro 18 – Distâncias calculadas, verdadeiras e erro relativo de distâncias entre o ponto 2020 e os demais pontos de verificação da faixa 7 no método A1.

Observa-se que na AT por faixa, os erros relativos são todos superiores a 0,001. Este resultado indica que, na AT por faixa, além de se ter um deslocamento dos pontos no

georreferenciamento, como já foi salientado, a escala de modelo poderá ser prejudicada na realização de uma restituição fotogramétrica, o que pode restringir a aplicação do método conforme a finalidade referente à precisão (a precisão está relacionada com a escala do mapeamento).

## 4.2 Aerotriangulação em bloco

Na Aerotriangulação por Bloco foram utilizados diferentes números de pontos de apoio, que deram origem a 5 métodos denominados B1, B2, B3, B4 e B5, como explicitado na metodologia deste trabalho.

Como na AT por faixa, são mostrados nos quadros de 19 a 23 os erros verdadeiros das coordenadas  $E$  ( $\Delta E$ ),  $N$  ( $\Delta N$ ) e  $h$  ( $\Delta h$ ), assim como os erros planimétricos ( $\Delta P$ ) e o erro total ( $\Delta T$ ) referentes aos blocos.

No quadro 19 estão os resultados do método B1.

Ponto	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta P$	$\Delta h$	$\Delta T$
2001	-8,482	-0,201	8,484	-8,814	12,234
2002	-16,502	-5,667	17,447	-26,534	31,756
2003	-7,314	-1,327	7,433	-20,835	22,121
2004	1,638	-0,276	1,661	4,836	5,113
2005	-2,661	0,608	2,729	-0,616	2,798
2008	6,334	-10,301	12,092	22,213	25,291
2011	2,558	-11,931	12,202	-30,118	32,495
2012	-9,434	-13,855	16,761	-36,530	40,192
2013	-2,968	-7,094	7,689	-16,267	17,993
2014	-7,084	-4,166	8,218	-23,551	24,943
2015	-18,88	-4,790	19,478	-25,604	32,170
2017	-3,181	-6,138	6,913	12,174	14,000
2018	-6,035	-4,809	7,716	3,033	8,291
2020	3,340	-5,300	6,264	16,423	17,577
2021	0,887	-2,827	2,962	11,331	11,711
2023	0,471	0,944	1,054	11,588	11,635
2029	6,133	-3,484	7,053	16,434	17,883
2034	-6,194	-1,870	6,470	-6,533	9,194
2036	-5,276	-1,539	5,495	-3,237	6,378

Quadro 19 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método B1 na AT em bloco.

Neste método os resultados dos erros absolutos da coordenada  $E$  variam entre 0,471 e 18,88 m correspondentes aos pontos 2023 e 2015. O ponto 2015 também se apresentou com maior erro na coordenada  $E$  na AT por faixa, no método A2.

O maior erro absoluto na coordenada  $N$  foi obtido no ponto 2012 com 13,855 m. Este ponto também apresentou maior erro absoluto com relação à altura, que foi de 36,53 m.

No processo realizado com 4 pontos de apoio (método B2), o maior erro absoluto obtido na coordenada  $E$  foi novamente com o ponto 2015, mas desta vez com um valor um pouco menor, reduzido para 14,168 m. O menor erro absoluto para a mesma coordenada foi apresentado pelo ponto 2017, com 0,187 m. Estes resultados podem ser vistos no quadro 20.

Ponto	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta P$	$\Delta h$	$\Delta T$
2001	-6,248	1,708	6,477	21,586	22,536
2002	-10,822	-4,091	11,569	15,683	19,488
2003	1,198	0,470	1,286	35,072	35,095
2004	-1,051	3,779	3,922	3,483	5,245
2005	-1,031	2,900	3,077	21,263	21,484
2008	13,574	0,073	13,574	-1,114	13,619
2011	8,087	-1,769	8,278	-7,428	11,122
2012	-0,865	-8,179	8,224	-1,287	8,324
2013	2,120	-0,471	2,171	-0,941	2,366
2015	-14,168	-2,933	14,468	11,058	18,210
2017	-0,187	-0,338	0,386	8,422	8,430
2018	-3,089	0,504	3,129	10,588	11,040
2020	5,382	4,604	7,082	-5,475	8,952
2021	-1,409	5,110	5,301	-2,769	5,980
2023	-5,390	2,230	5,833	2,355	6,290
2029	10,688	6,893	12,717	-9,871	16,099
2034	-3,369	0,454	3,399	22,170	22,429
2036	-3,400	0,991	3,541	21,850	22,135

Quadro 20 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método B2 na AT em bloco.

Na coordenada  $N$  obteve-se, de forma análoga ao método B1, o maior erro absoluto com o ponto 2012, cujo valor foi de 8,179 m. O menor erro em módulo nesta coordenada foi apresentado pelo ponto 2034, com o valor de 0,454 m.

Com relação ao erro absoluto da altura o resultado diferiu do encontrado no método anterior. O maior erro foi encontrado com o ponto 2003, cujo valor foi de 35,072 m.

No quadro 21 estão os resultados da AT por bloco no método B3, ou seja, no método em que se utilizam 5 pontos de apoio. Neste método, novamente os pontos com maior erro absoluto nas coordenadas  $E$  e  $N$  foram obtidos com os pontos 2015 e 2012, respectivamente. Com relação ao erro da altura, o erro máximo foi apresentado pelo mesmo ponto do processo anterior, tendo um aumento de 5,039 m.

Ponto	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta P$	$\Delta h$	$\Delta T$
2001	-6,228	1,739	6,466	7,318	9,765
2002	-10,951	-4,265	11,752	10,908	16,034
2003	1,043	-0,435	1,1300	40,111	40,126
2004	-1,020	3,649	3,789	3,796	5,363
2005	-0,787	3,105	3,203	12,078	12,495
2008	13,768	0,729	13,787	-7,832	15,856
2011	9,012	-2,664	9,397	4,307	10,337
2012	-0,571	-8,922	8,940	8,307	12,203
2013	2,688	-0,448	2,725	1,258	3,001
2015	-14,224	-2,980	14,532	3,688	14,993
2018	-2,889	0,677	2,967	0,404	2,994
2020	5,347	4,832	7,206	-6,256	9,5433
2021	-1,459	5,043	5,249	-1,003	5,344
2023	-5,280	1,963	5,633	8,966	10,588
2029	10,739	7,435	13,061	-12,29	17,934
2034	-3,151	1,213	3,376	8,691	9,323
2036	-3,471	0,690	3,539	7,780	8,547

Quadro 21 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método B3 na AT em bloco.

No quadro 22 são mostrados os resultados obtidos com 6 pontos de apoio. Neste caso o maior valor de erro absoluto nas coordenadas  $E$  e  $N$  foi apresentado pelo mesmo ponto (2015), com o valor de  $\Delta E$  muito próximo ao de  $\Delta N$ . Novamente o ponto 2003 apresentou o maior erro de altura, com um valor também muito próximo ao valor encontrado no processo anterior.

Ponto	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta P$	$\Delta h$	$\Delta T$
2001	-6,227	1,737	6,465	7,303	9,753
2002	-10,952	-4,265	11,753	10,905	16,032
2003	1,041	-0,437	1,129	40,064	40,079
2004	-1,019	3,648	3,787	3,779	5,350
2005	-0,786	3,104	3,202	12,062	12,479
2008	13,767	0,728	13,786	-7,875	15,876
2011	9,014	-2,667	9,400	4,281	10,329
2012	-0,572	-8,925	8,943	8,287	12,192
2013	2,689	-0,449	2,726	1,244	2,996
2015	-14,224	-2,980	14,532	3,684	14,992
2018	-2,888	0,677	2,966	0,408	2,994
2020	5,347	4,831	7,206	-6,287	9,563
2023	-5,279	1,962	5,631	8,940	10,566
2029	10,738	7,433	13,059	-12,344	17,970
2034	-3,151	1,211	3,375	8,681	9,314
2036	-3,470	0,689	3,538	7,759	8,527

Quadro 22 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método B4 na AT em bloco.

Ao se utilizar 9 pontos de apoio para realização da AT, obtiveram-se pontos diferentes aos encontrados nos outros métodos para valores máximo e mínimo de erros absolutos nas coordenadas *E* e *N*. No quadro 23 estão esses valores.

Ponto	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta P$	$\Delta h$	$\Delta T$
2001	6,577	-2,521	7,043	8,882	11,335
2002	0,332	-0,068	0,339	1,060	1,113
2003	11,412	12,305	16,782	18,593	25,046
2004	2,758	-6,516	7,075	5,711	9,093
2011	4,964	2,569	5,589	-9,486	11,010
2012	-0,609	2,600	2,670	-6,202	6,752
2013	1,811	1,239	2,194	-4,757	5,239
2018	1,647	-1,413	2,170	2,652	3,426
2020	6,490	0,179	6,492	-5,925	8,789
2023	-3,049	-12,103	12,481	8,915	15,338
2029	4,450	2,002	4,879	-4,502	6,639
2034	7,733	-1,616	7,900	9,072	12,029
2036	7,377	-3,859	8,325	10,215	13,177

Quadro 23 – Erros verdadeiros, planimétricos, altimétricos e totais, obtidos no método B5 na AT em bloco.

Aqui, os pontos de maior erro absoluto, em ambas as coordenadas, são respectivamente o 2003 e o 2023. Apenas a altura apresentou o mesmo ponto de maior erro absoluto (2003) dos 3 métodos anteriores.

#### 4.2.1 Erro Médio Quadrático (EMQ) das aerotriangulações por bloco

Os resultados dos erros médios quadráticos (em metros) dos erros absolutos das coordenadas  $E$ ,  $N$ , da altura  $h$  e do erro planimétrico obtidos nos diferentes métodos empregados nos blocos, podem se vistos no quadro 24.

Nº de pontos de apoio	$E$	$N$	$h$	$\Delta P$
3	4,833	3,955	10,083	5,197
4	4,544	2,394	9,713	4,320
5	4,620	4,574	8,933	4,297
6	4,653	2,513	8,998	4,417
9	3,265	4,088	4,372	4,590

Quadro 24 – EMQ dos erros absolutos na AT por bloco para as coordenadas  $E$ ,  $N$ ,  $h$  e do erro planimétrico.

Assim como nas faixas, novamente pode-se ver que os maiores EMQ correspondem à altura. Nas faixas obtiveram-se alguns valores um pouco menores que o mínimo apresentado com relação aos blocos.

Nos blocos, também não há como estabelecer uma relação entre o EMQ e o número de pontos de apoio empregado. Pode-se notar que, apenas no caso da altura, há um decréscimo do valor do EMQ com o aumento de número de pontos de apoio.

Observa-se no quadro 24 que o EMQ das alturas, em alguns casos, supera mais que o dobro do EMQ de  $E$  e  $N$ .

O inconveniente encontrado na determinação das alturas nos métodos de AT é que o erro absoluto de alguns pontos superou 40 m, valor que corresponde a praticamente 50% da altura do ponto. Considera-se este erro incompatível com qualquer tipo de aplicação prática e especialmente a impossibilidade de representar o relevo por meio de curvas de nível. Qualitativamente não haveria empecilho para o traçado de curvas de forma, caso haja interesse.

#### 4.2.2 Erro Relativo de distâncias

De forma semelhante ao trabalho realizado nas faixas, e devido às mesmas razões, foram também calculadas as distâncias verdadeiras, as distâncias calculadas e o erro relativo de distância dos pontos de maior erro planimétrico com os demais pontos presentes em cada método de AT aplicado sobre o bloco.

No quadro 25 são mostrados esses dados com relação ao ponto de maior erro planimétrico no processo de AT em bloco (métodos B1, B2, B3, B4 e B5).

Ponto	Distância Calculada ao ponto 2015 (m)	Distância Verdadeira ao ponto 2015 (m)	Erro Relativo
2001	586,9509593	590,0327591	-0,005223099
2002	272,4417677	272,3999819	0,000153399
2003	1138,2767210	1132,9174400	0,004730513
2004	1904,5647860	1911,6183420	-0,003689835
2005	988,1287477	994,3045478	-0,006211176
2008	2947,2100200	2971,5889090	-0,008203991
2011	1962,2588880	1983,6739140	-0,010795638
2012	1471,5801930	1484,3807970	-0,008623531
2013	1412,6730510	1428,5461690	-0,011111379
2014	822,2687952	832,6523864	-0,012470500
2017	1644,0857960	1658,2559630	-0,008545223
2018	1167,5184030	1178,6095430	-0,009410360
2020	2194,5751790	2211,8538120	-0,007811833
2021	2053,7873250	2064,3658990	-0,005124369
2023	2575,8859430	2579,8980030	-0,001555123
2029	2677,2087440	2701,1421100	-0,008860462
2034	435,6919425	441,9106218	-0,014072256
2036	694,3763164	699,7063395	-0,007617514

Quadro 25 – Distâncias calculadas, verdadeiras e erro relativo de distâncias entre o ponto 2015 (de maior  $\Delta P$ ) e os demais pontos de verificação do bloco no método B1.



Com o intuito de procurar justificativas para os erros encontrados com o ponto de maior erro planimétrico, foram também analisados os erros de distâncias com relação ao ponto de menor erro planimétrico. Estes resultados estão no quadro 26.

Ponto	Distância Calculada ao ponto 2002 (m)	Distância Verdadeira ao ponto 2002 (m)	Erro Relativo
2001	841,9204663	839,5915370	0,002773884
2003	881,1874657	867,7006597	0,015543155
2004	2183,4850420	2177,5033990	0,002747019
2011	1923,6964130	1926,4548210	-0,001431857
2012	1349,5153970	1346,9351160	0,001915668
2013	1469,5788430	1470,8947370	-0,000894621
2018	1400,5259920	1400,7627790	-0,000169041
2020	2443,2137910	2448,0322750	-0,001968309
2023	2840,4775620	2827,7415640	0,004503947
2029	2882,5177540	2887,1222040	-0,001594823
2034	712,9817576	713,7665417	-0,001099497
2036	970,3905865	968,2087866	0,002253439

Quadro 26 – Distâncias calculadas, verdadeiras e erro relativo de distancias entre o ponto 2002 (de menor  $\Delta P$ ) e os demais pontos de verificação do bloco no método B5.

Analisando-se os quadros 25 e 26, pode-se inferir que a propagação do erro relativo independe da magnitude da distância entre pontos, mesmo sendo este erro diretamente proporcional à diferença de distâncias (verdadeira e calculada) e inversamente proporcional a uma delas tomada como referência.

No quadro 27 estão relacionadas às médias dos erros relativos de distâncias entre os pontos de maior e de menor erro planimétrico e os demais pontos de verificação de cada um dos métodos empregados.

Ao se analisar as médias obtidas, pode-se ver que a maior média de erro relativo foi apresentada pelo ponto 2003 no método que utilizou 9 pontos de apoio.

Pontos de maior e menor $\Delta P$ nos métodos de AT por bloco	Erro Relativo Médio
AT em bloco com 3 pontos de apoio	
Maior $\Delta P$ -> pt 2015	0,007456122
Menor $\Delta P$ -> pt 2023	0,001530797
AT em bloco com 4 pontos de apoio	
Maior $\Delta P$ -> pt 2015	0,007397717
Menor $\Delta P$ -> pt 2017	0,004246189
AT em bloco com 5 pontos de apoio	
Maior $\Delta P$ -> pt 2015	0,007504103
Menor $\Delta P$ -> pt 2003	0,002059426
AT em bloco com 6 pontos de apoio	
Maior $\Delta P$ -> pt 2015	0,007587433
Menor $\Delta P$ -> pt 2003	0,002107364
AT em bloco com 9 pontos de apoio	
Maior $\Delta P$ -> pt 2003	0,007765806
Menor $\Delta P$ -> pt 2002	0,003074605

Quadro 27 – Pontos de maior e menor erro planimétrico em cada método de AT em bloco com suas respectivas médias de erro relativo de distâncias.

Comparando a AT por faixa com a AT em bloco observa-se que, neste segundo método, os erros relativos foram menores, como já era esperado devido à maior rigidez (melhor encaixe entre modelos estereoscópicos) do bloco, conforme afirma Andrade (1998). Mesmo assim, os resultados encontrados são relativamente grandes, havendo necessidade de se obter valores de erros menores.

Atribui-se estes valores relativamente grandes de erros ao fato de se ter trocado o método de medição das coordenadas de fotogramas, haja vista que o empregado neste trabalho apresenta resolução inferior ao aconselhado na bibliografia. O método utilizado possui como agravante a resolução em  $x$  diferir da resolução em  $y$ .

Outro fato, que convém salientar é que foram utilizados fotogramas com base de papelão e as medições das coordenadas de fotogramas foram efetuadas em vários dias mudando as condições ambientais de operação. A situação ideal seria efetuar a medição das coordenadas de pontos sob as mesmas condições ambientais, o que não foi possível devido ao número de pontos levantados.

Ao se usar as coordenadas UTM, deve-se levar em consideração que as coordenadas dos pontos levantadas com GPS foram processadas sobre o elipsóide de revolução. Isto

implica que as coordenadas UTM estão afetadas pelo coeficiente de deformação, o qual fornecerá erros inerentes à projeção UTM. Como a área de trabalho está localizada próximo ao limite do fuso 22, a influência do coeficiente de deformação pode ser significativa.

Apesar de contar com os diapositivos dos fotogramas utilizados, não foram efetuadas as medições de coordenadas de pontos sobre os mesmos, devido à impossibilidade de observação estereoscópica para identificação dos pontos tridimensionalmente e também à impossibilidade de identificar os pontos bidimensionalmente.

Pequenos erros cometidos na tomada dos dados originais resultam, pela teoria de propagação dos erros, em erros significativos no final do processo.

### 4.3 Ajuste dos erros

#### 4.3.1 Ajuste dos erros verdadeiros das coordenadas planimétricas

Com a intenção de diminuir o erro das coordenadas planimétricas, buscou-se uma equação de ajuste para os erros verdadeiros de cada uma das coordenadas, partindo-se do princípio de que, ao se diminuir o erro desses parâmetros, também haverá uma diminuição do erro relativo de distâncias. Esta metodologia foi aplicada aos resultados do método B5, o qual apresentou maior média de erro relativo planimétrico de distâncias.

As coordenadas  $E$  e  $N$  foram tratadas separadamente. Com vista a facilitar a representação gráfica dos erros verdadeiros, em lugar de se trabalhar com os valores (relativamente grandes) das coordenadas  $E$  e  $N$ , optou-se por subtrair desses valores uma constante  $C_E = 233453,08$  m para o valor de  $E$  e  $C_N = 6707048,72$  m para o valor de  $N$  denominando-se o resultado da diferença como  $E'$  ( $E'_i = E_i - C_E$ ) e como  $N'$  ( $N'_i = N_i - C_N$ ) respectivamente. As constantes correspondem aos pontos de menor  $E$  e  $N$  levantados com GPS.

Na figura 10 é mostrado o gráfico dos erros verdadeiros da coordenada  $E$  em função de  $E'$ .

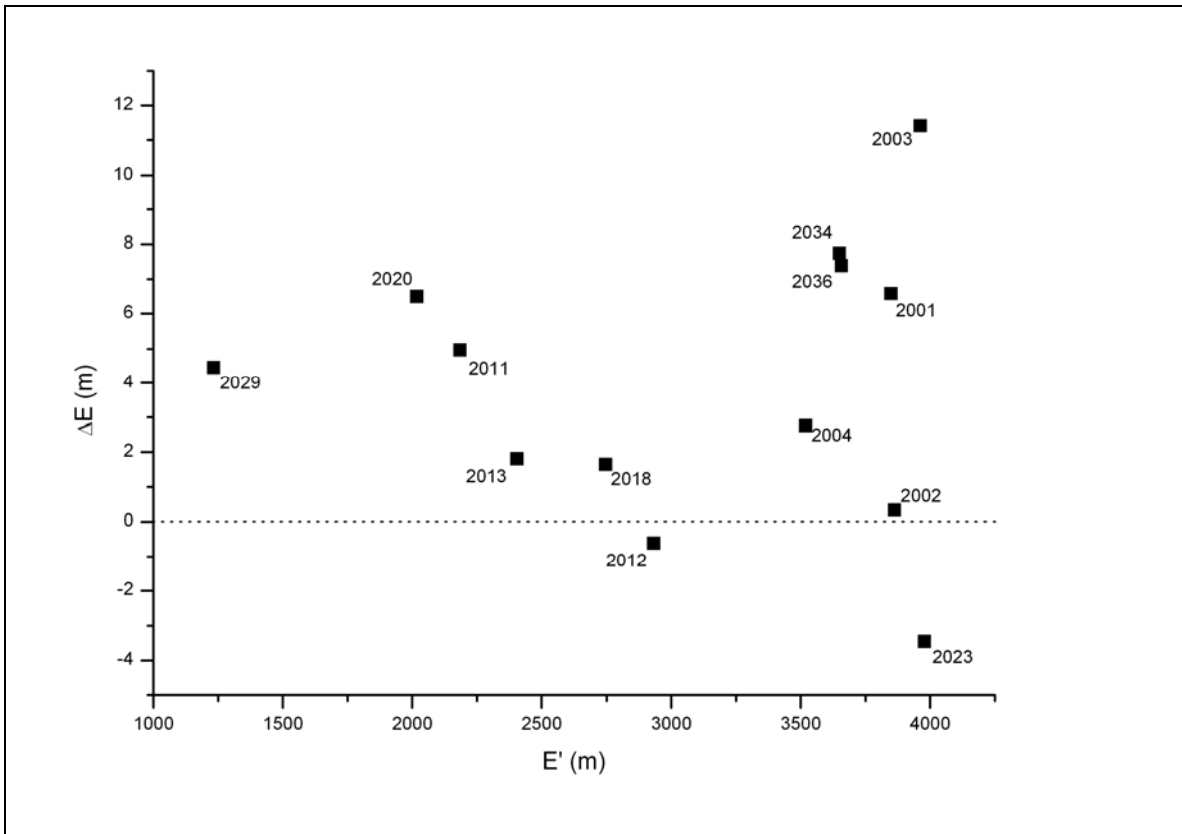


Figura 10 – Gráfico dos erros verdadeiros de  $E$  em função de  $E'$ .

Observando-se a figura 10, percebe-se que, qualitativamente, não existe uma lei matemática linear ou parabólica, que relacione as variáveis. Porém, conforme aconselham Cláudio e Marins (2000), apesar deste comportamento dos erros verdadeiros, deve-se procurar uma função que melhor se ajuste à distribuição dos pontos. Por esse motivo optou-se por ajustar os resultados a uma função polinomial cujo grau resultasse em uma maior adaptação visual à distribuição dos pontos corroborada pelo desvio padrão da função fornecido pelo *software*.

A função encontrada está representada na figura 11.

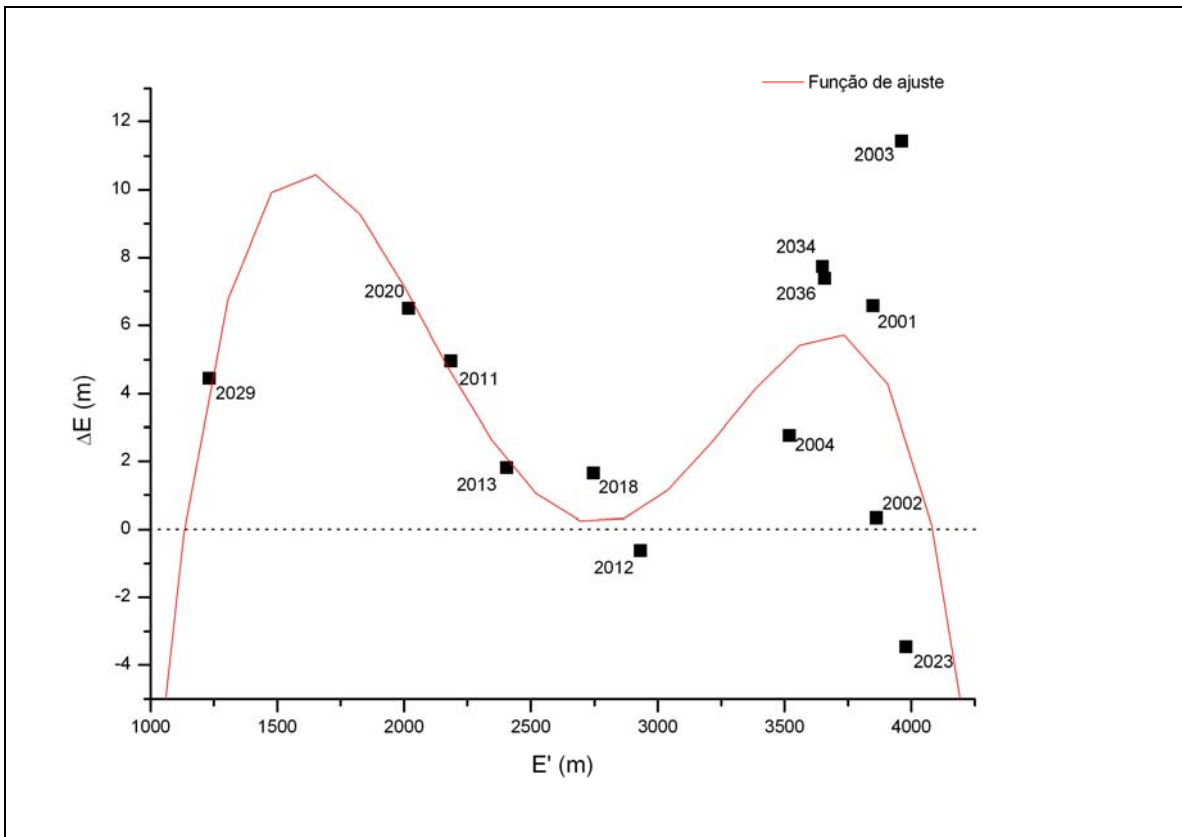


Figura 11 – Gráfico do erro absoluto de  $E$  em função de  $E'$  com função de ajuste.

No caso do ajuste em relação à coordenada  $E$ , o polinômio que gerou melhores resultados foi:

$$\Delta E(E') = -2,3498334 \times 10^2 + 4,3446 \times 10^{-1} E' - 2,72624 \times 10^{-4} E'^2 + 7,12172 \times 10^{-8} E'^3 - 6,62622 \times 10^{-12} E'^4$$

A coordenada  $N$  foi tratada de forma semelhante à coordenada  $E$ . Os valores dos erros verdadeiros de  $N$  em função de  $N'$  estão representados na figura 12.

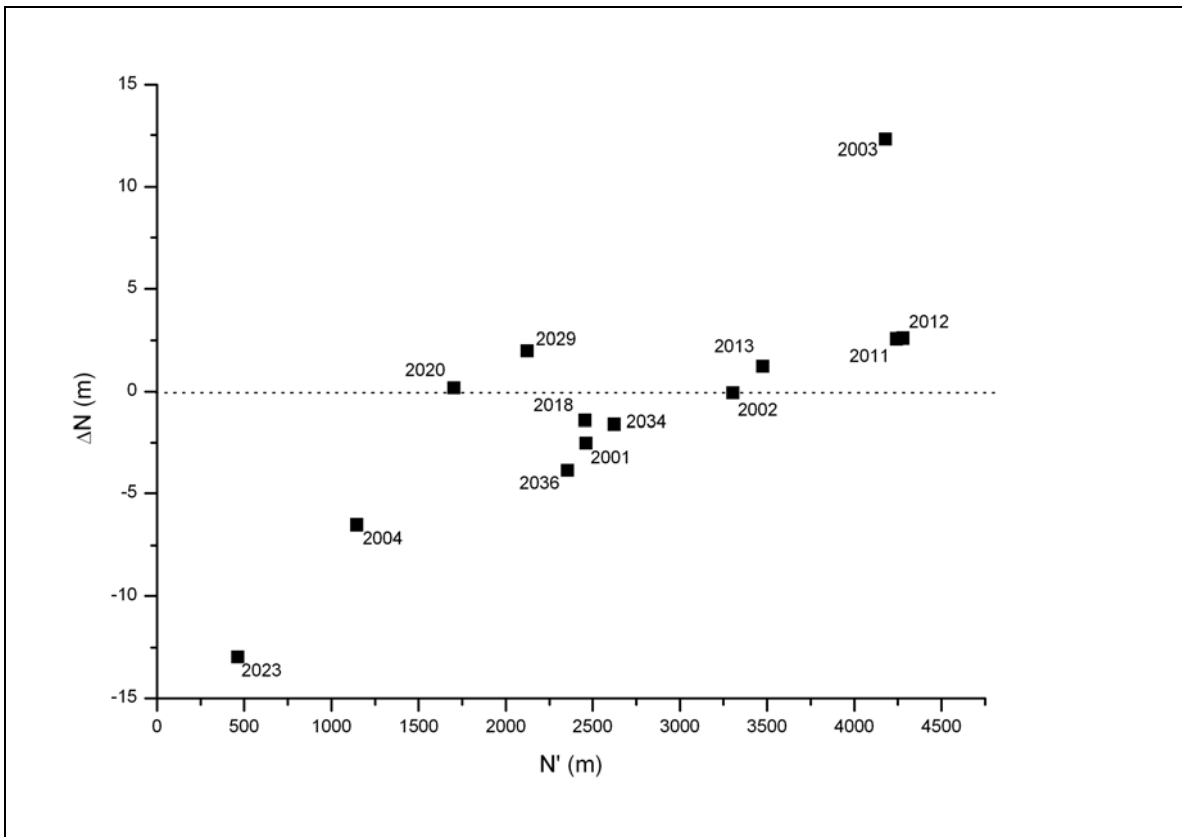


Figura 12 – Gráfico do erro verdadeiro de  $N$  em função de  $N'$ .

Para a coordenada  $N$  o melhor ajuste polinomial foi dado pela equação:

$$\Delta N(N') = 34,80605 - 0,19771N' + 2,63973 \times 10^{-4} N'^2 - 1,42641 \times 10^{-7} N'^3 + 3,37713 \times 10^{-11} N'^4 - 2,9033 \times 10^{-15} N'^5$$

O gráfico correspondente a esta fórmula está representado na figura 13.

Com as respectivas equações, foram calculados os erros verdadeiros de ambas as coordenadas. Com estes valores efetuou-se a correção das coordenadas planimétricas dos pontos calculados com a AT e iteraram-se os cálculos dos erros verdadeiros das coordenadas e o erro relativo de distâncias. No quadro 28 estão os resultados desses erros.

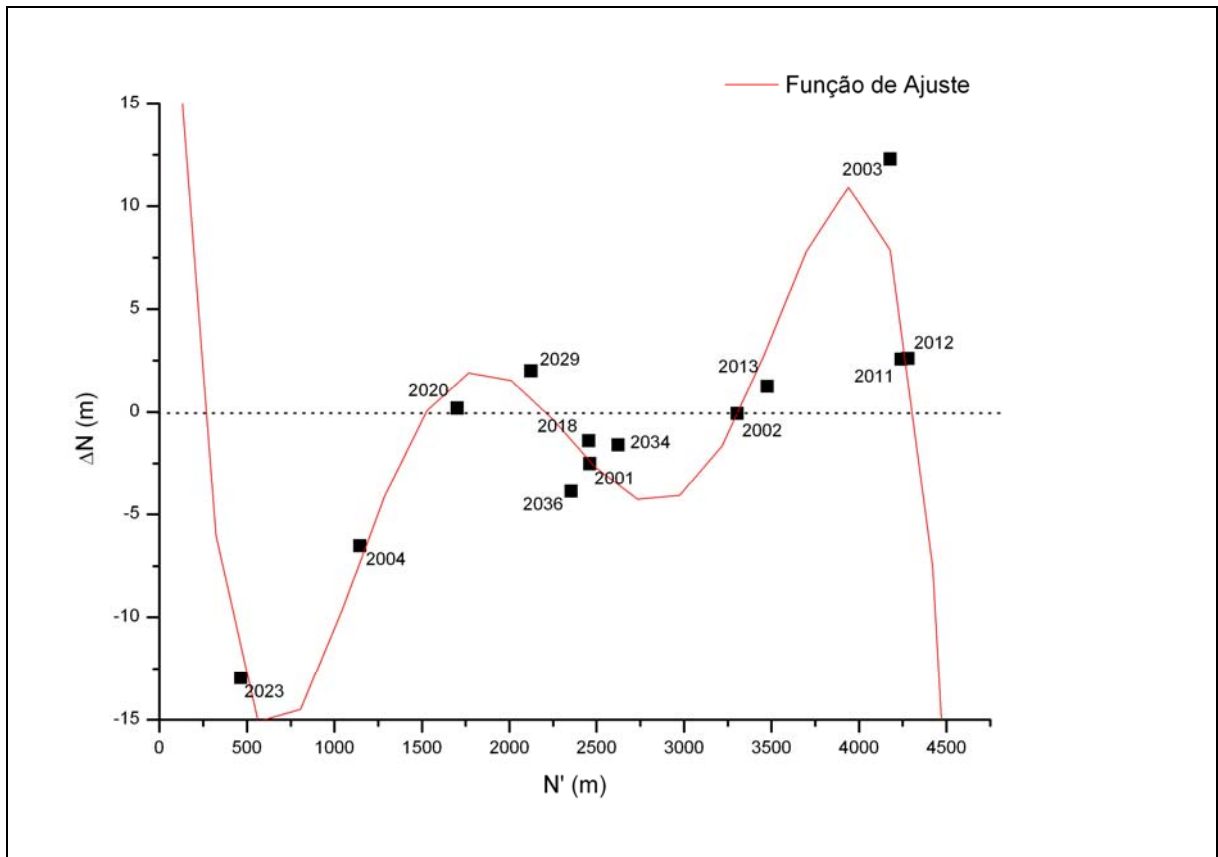


Figura 13 – Gráfico do erro absoluto de  $N$  em função de  $N'$  com função de ajuste.

Ponto	$\Delta E$	$\Delta N$	Erro Relativo	$\Delta E$ após ajuste	$\Delta N$ após ajuste	Erro Relativo após ajuste
2001	6,577	-2,521	0,00885475	5,022	-2,387	0,002879842
2002	0,332	-0,068	0,01554316	4,874	-0,228	0,006390499
2003	11,412	12,305	---	3,306	7,945	---
2004	2,758	-6,516	0,00652733	5,198	-7,257	0,001676709
2011	4,964	2,569	0,00342080	4,627	5,363	0,004219803
2012	-0,609	2,600	0,01069783	0,569	3,423	0,008482600
2013	1,811	1,239	0,00783484	2,032	3,163	0,005994176
2018	1,647	-1,413	0,00805503	0,196	-2,345	0,003176809
2020	6,490	0,179	0,00400938	6,929	1,637	0,003144024
2023	-3,049	-12,972	0,00659130	2,950	-12,853	0,001188261
2029	4,450	2,002	0,00345305	4,416	0,771	0,002448205
2034	7,733	-1,616	0,00914010	5,767	-3,674	0,002209688
2036	7,377	-3,859	0,00906210	5,781	-1,361	0,004278145
Média do erro relativo			0,007765806	Média do erro relativo ajustado		0,003545289

Quadro 28 – Valores dos erros verdadeiros de  $E$  e  $N$  e dos erros relativos de distâncias, antes e após ajuste.

Observa-se, no quadro 28, que houve uma redução da média do erro relativo de 0,007765806 para 0,003545289 através da polinomial o que corresponde a uma redução de 54,35%.

#### 4.3.2 Ajuste do erro verdadeiro da altura

Os erros absolutos das alturas, em ambos os processos de AT (faixa e bloco), resultaram em valores superiores quando comparados aos valores dos erros absolutos das coordenadas planimétricas.

Considerando que na área de trabalho a altitude predominante situa-se no entorno de 90 m e que se obtiveram erros verdadeiros de altura em alguns casos superiores a 40m, presume-se que o processo de AT, adotado neste trabalho, não é apropriado para representação de relevos.

Para se ter uma idéia do comportamento dos erros de altura, aplicou-se o mesmo tratamento das coordenadas planimétricas às alturas obtidas com o método B5.

O ajuste da altura foi feito em função das coordenadas planimétricas, ou seja, foi encontrada uma função de ajuste de  $\Delta h$  dependente de  $E'$  e  $N'$ . O melhor ajuste foi obtido com a função:

$$\Delta h(E', N') = N'(-1,889 + 0,2186E').$$

O gráfico do ajuste é mostrado na figura 14.

A superfície representada na figura 14, em sua maior parte, é plana e apresenta picos. Esses picos são inerentes a funções de potências e, quanto maior for o grau, maior pode ser a presença dessas irregularidades (salienta-se que a função de ajuste encontrada não é de potência). As funções de potências são muito empregadas para modelagem digital do terreno.



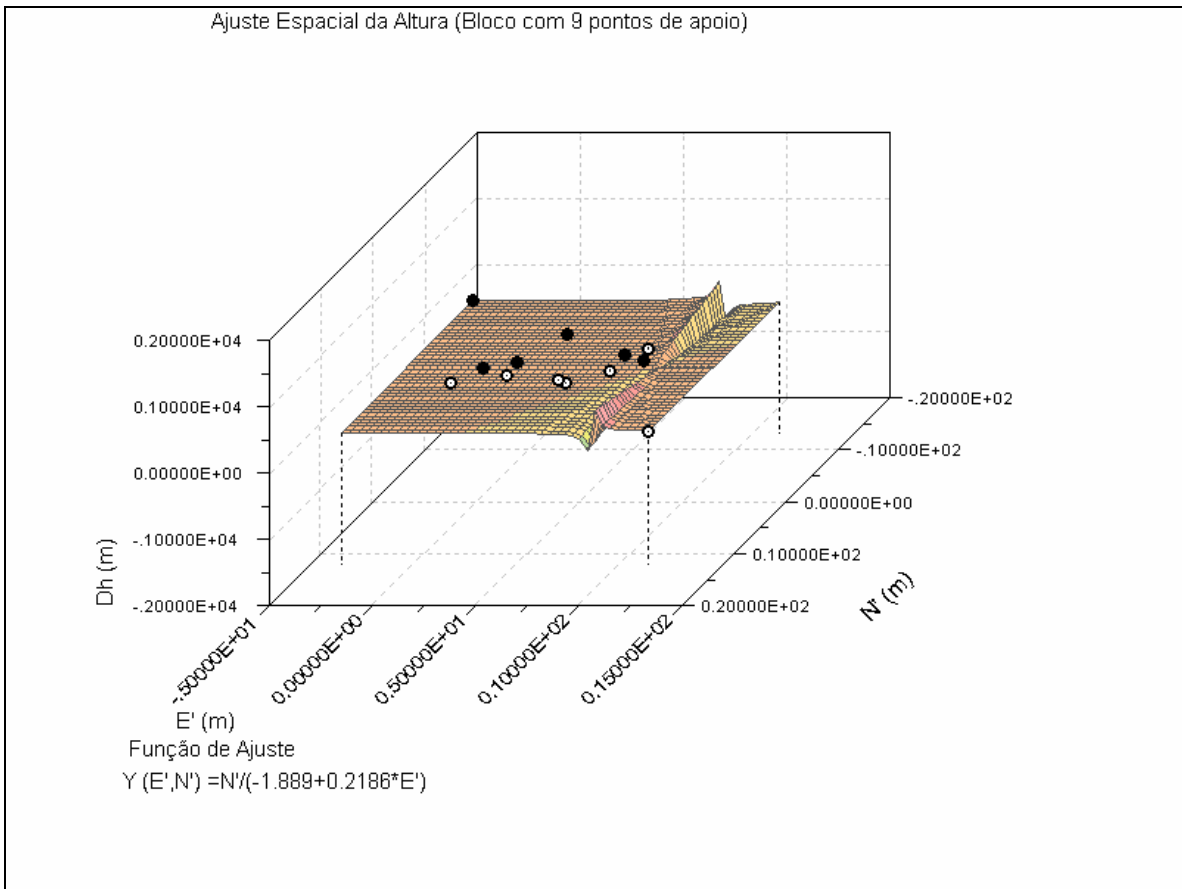


Figura 14 – Gráfico dos erros verdadeiros de  $h$  em função de  $E'$  e  $N'$  com função de ajuste espacial.

Os resultados dos erros verdadeiros de altura e os obtidos pelo ajuste são mostrados no quadro 29.

Como pode ser visto no quadro 29, na maioria dos pontos ocorreu uma redução do valor de  $\Delta h$ .

A partir disso pode-se inferir que a função encontrada mesmo não tendo uma boa adaptação visual aos valores de erros apresentados no gráfico 14 conseguiu reduzir os valores dos erros absolutos de altura.

Ponto	$\Delta h$	$\Delta h$ após ajuste
2001	8,882	2,930
2002	1,060	3,919
2003	18,593	4,834
2004	5,711	1,494
2011	-9,486	8,918
2012	-6,202	6,696
2013	-4,757	6,637
2018	2,652	4,103
2020	-5,925	3,878
2023	8,915	0,535
2029	-4,502	7,935
2034	9,072	3,295
2036	10,215	2,951

Quadro 29 – Valores dos erros verdadeiros de  $h$  antes e após o ajuste.

#### 4.4 Comparação dos resultados com o Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC

Uma das condições a serem satisfeitas, segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC, é que 90% dos pontos bem definidos em numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC planimétrico estabelecido.

Com base nesta condição foram montados gráficos que relacionam a quantidade de medidas com os valores máximos de erros admitidos nas principais escalas e classes utilizadas na elaboração de cartas geográficas. Isto se mostra no gráfico da figura 15, com os dados obtidos no método B5 antes do ajuste.

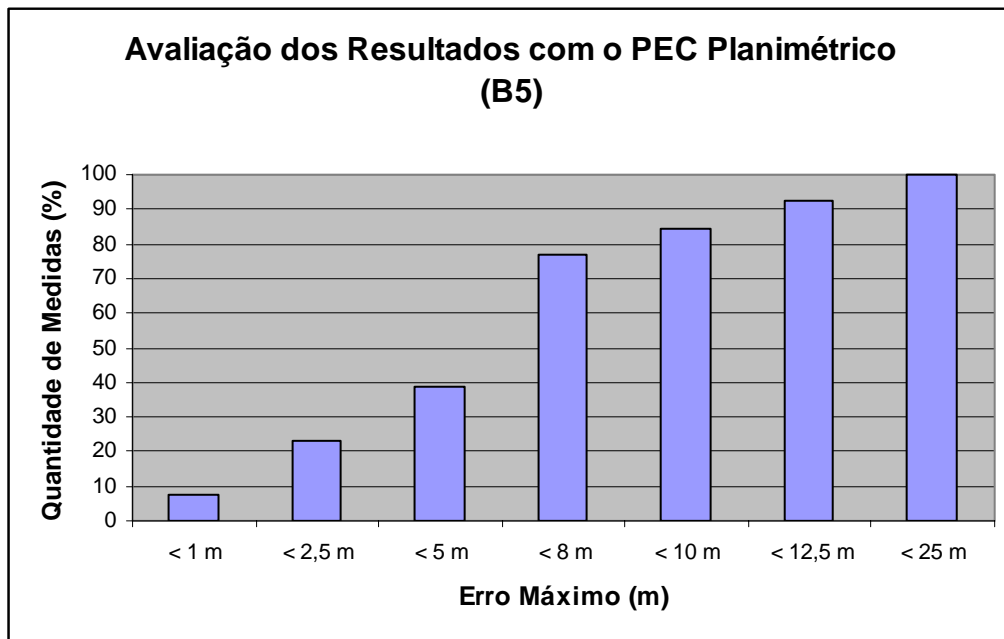


Figura 15 – Gráfico da quantidade de medidas em relação aos erros planimétricos máximos admitidos das principais escalas e classes cartográficas no método B5.

Como se pode observar na figura 15, a condição imposta pelo PEC é satisfeita para medidas de erros planimétricos, em que 90% dos erros são inferiores a 12,5 m.

Na figura 16, é mostrado o gráfico, para a mesma análise anterior, após o processo de ajuste planimétrico realizado no item 4.3.

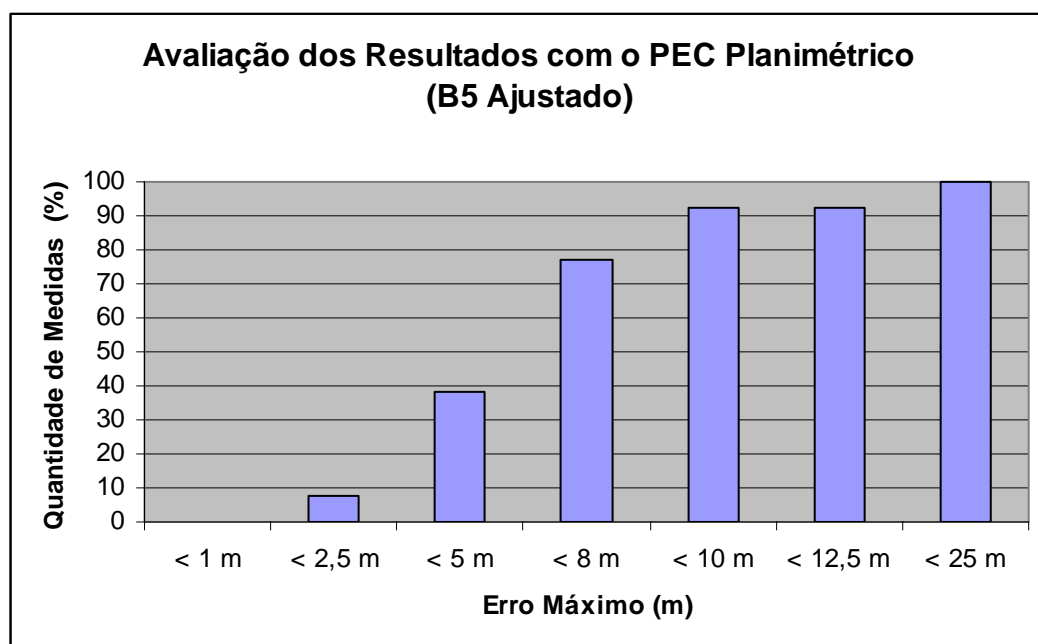


Figura 16 – Gráfico da quantidade de medidas em relação aos erros planimétricos máximos admitidos das principais escalas e classes cartográficas no método B5 após ajuste.

No gráfico da figura 16 é possível ver que ocorreu uma redução dos erros, o que fez melhorar o resultado obtido no PEC. Com os erros encontrados após o ajuste, a condição imposta pelo PEC passou de 12,5 m para 10 m.

Na comparação das figuras 15 e 16, percebe-se que os valores de PEC menores que 1 m foram aumentados com o ajuste, porém todo o sistema melhorou em termos de limite de erros estabelecido pela norma.

Já com relação aos erros altimétricos, a condição imposta pelo PEC é que 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.

Como não foram traçadas curvas de nível, não há como fazer uma análise atinente à parte altimétrica com relação ao PEC.

Outra condição imposta pelo PEC relaciona a escala da carta com o erro máximo admitido e o erro padrão (erro médio quadrático), como mostrado no item 2.11, na tabela 1 e na tabela 2.

Com relação ao erro planimétrico foram montados quadros que mostram esta relação com os dados obtidos no método B5, antes e após o novo ajuste. No quadro 30 estão os resultados encontrados no método B5.

Escala	Classe A			
	PEC Planimétrico		EMQ	
1:25.000	Especificado	Obtido	Especificado	Obtido
	12,5 m	7,552 m	7,5 m	4,591 m
Escala	Classe B			
	PEC Planimétrico		EMQ	
1:10.000	Especificado	Obtido	Especificado	Obtido
	8 m	7,552 m	5 m	4,591 m
Escala	Classe C			
	PEC Planimétrico		EMQ	
1:10.000	Especificado	Obtido	Especificado	Obtido
	10 m	7,552 m	6 m	4,591 m

Quadro 30 – Valores especificados e obtidos do PEC planimétrico e do erro médio quadrático em diferentes classes e escalas cartográficas no método B5.

Como se pode observar no quadro 30, o PEC encontrado enquadra-se na elaboração de cartas de classe “A” na escala de 1:25.000 ou menores. Também se enquadra na elaboração de cartas na escala de 1:10.000 das classes “B” e “C”.

No quadro 31 são mostrados os resultados do PEC com os dados obtidos no método B5 após o novo ajuste.

Escala	Classe A			
	PEC Planimétrico		EMQ	
1:10.000	Especificado	Obtido	Especificado	Obtido
	5 m	4,683 m	3 m	2,847 m
Escala	Classe B			
	PEC Planimétrico		EMQ	
1:10.000	Especificado	Obtido	Especificado	Obtido
	8 m	4,683 m	5 m	2,847 m
Escala	Classe C			
	PEC Planimétrico		EMQ	
1:5.000	Especificado	Obtido	Especificado	Obtido
	5 m	4,683 m	3 m	2,847 m

Quadro 31 – Valores especificados e obtidos do PEC planimétrico e do erro médio quadrático em diferentes classes e escalas cartográficas no método B5 com novo ajuste.

Percebe-se no quadro 31 que, com a realização de um novo ajuste de erros nos dados obtidos no método B5, há uma redução do PEC obtido. Com o novo ajuste o PEC encontrado enquadra-se na elaboração de cartas de classe “A” e “B” na escala de 1:10.000 ou menores, e de classe “C” na escala de 1:5.000 ou menores.

Mas para uma real análise da elaboração de cartas, devem ser levadas em consideração ambas as determinações, ou seja, deve ser analisada tanto a porcentagem de valores de erros quanto os resultados obtidos nos quadros anteriores.

Com os resultados obtidos em ambas as prescrições, pode-se verificar que, com os dados obtidos no método B5, podem-se elaborar cartas planimétricas classificadas nas categorias “A”, “B” e “C” para escala igual a 1:25.000 ou menores.

Já com a realização de um novo ajuste sobre o método B5m podem-se elaborar cartas planimétricas de classe “C” com escala igual a 1:10.000 ou menores.

## 5 CONCLUSÃO

Nas condições em que se realizou o trabalho, no qual foram utilizados fotogramas aéreos com base de papelão em substituição aos diapositivos (ou negativo), mesa digitalizadora para a medição das coordenadas nos fotogramas (coordenadas de máquina), em substituição aos equipamentos de fotogrametria analítica e aplicação do *software* de aerotriangulação, conclui-se que:

- ❖ A aerotriangulação em bloco apresentou maior precisão planimétrica avaliada pelo erro relativo planimétrico de distância do que a AT por faixa.
- ❖ Dentre os métodos de AT em bloco, o maior erro relativo médio de distâncias, foi do método B5 (com 9 pontos de apoio).
- ❖ Com os resultados obtidos pode-se verificar que o método empregado neste trabalho, sem um novo ajuste (os métodos de AT já realizam um ajuste), pode ser utilizado na elaboração de cartas planimétricas classificadas nas categorias “A”, “B” e “C” para escala igual a 1:25.000 ou menores.
- ❖ Com os ajustes dos resultados obtidos, o método pode também ser empregado na elaboração de cartas planimétricas de classe “C” com escala igual a 1:10.000 ou menores.
- ❖ Com os resultados obtidos na altimetria, apesar do erro médio quadrático obtido, deve-se ter cuidado com sua utilização na representação do relevo, devido aos significativos erros absolutos pontuais apresentados;
- ❖ É evidente que a análise feita sobre as classes e as escalas de cartas, que podem ser elaborados com o método proposto, foi realizada com os resultados que apresentaram maiores erros.
- ❖ O método apresentado reduz de forma significativa os custos na realização do processo de aerotriangulação, atribuído à utilização da mesa digitalizadora e de fotogramas com base de papelão.
- ❖ O método também dispensa a necessidade de um especialista com profundo conhecimento em fotogrametria e em informática, para realização da aerotriangulação (só foram tomadas sobre os fotogramas as coordenadas fotográficas).

## 5.1 Recomendações

Após a conclusão do trabalho, mediante a análise dos resultados obtidos no processo de Aerotriangulação, com o uso do método proposto, fazem-se as seguintes recomendações:

- ❖ Neste trabalho, o levantamento das coordenadas de pontos de apoio foi realizado com o uso do sistema GPS devido à facilidade operacional na tomada das mesmas. Mas com o intuito de se obter maior precisão nas coordenadas, recomenda-se que se repita o método aplicado, e se levantem as coordenadas de pontos por meio da topografia clássica, utilizando-se estação total;
- ❖ No caso da altimetria, recomenda-se fazer o levantamento das coordenadas pelo menos com nivelamento trigonométrico;
- ❖ Repetir o mesmo trabalho com pontos de apoio pré-sinalizados, isto é, antes do vôo, marcar os pontos de apoio no terreno, objetivando maior precisão na medição das coordenadas de fotografia e, desta maneira, escolher lugares em que os sinais do GPS estejam livres de perturbações, principalmente livre de multicaminhamento;
- ❖ Recomenda-se também que a AT por faixa deve ser realizada somente diante da impossibilidade da realização em bloco. Porém, caso venha a ser realizada uma AT por faixa, deve-se aplicar correção de erros semelhante à aplicada nos blocos.
- ❖ Aconselha-se testar um novo ajuste pelo método dos mínimos quadrados (MMQ).

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, A. J. **Fotogrametria Analógica e Digital**. 2005. Notas de aula.

AGUIRRE, A. J.; MELLO FILHO, J. A. de. **Introdução à Cartografia**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2007. No Prelo.

AMORIM, A. **Utilização de Modelos Estereoscópicos Híbridos na Atualização Cartográfica**. 2000.124f. Tese (Tese de Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Carlos, São Paulo, 2000.

AMORIM, A. C. O. **Ajuste de Funções com Algoritmos Genéticos**. 2005. Monografia (Pós-Graduação em Sistemas Eletrônicos) – Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2005.

ANDRADE, J. B. Fotogrametria Digital. In: ENCONTRO GAÚCHO DE AGRIMENSURA E CARTOGRAFIA, 6. 2003, Santo Ângelo – RS. **Anais...** Santo Ângelo – RS: URI - UFSM – AGETOC, 2003. 1 CD-ROM.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. SBEE. Curitiba-PR. 1998. 258p.

ARAKI, H. **Fotogrametria**. Departamento de Geomática. UFPR. Curitiba-PR. 2004.

ARANA, J. M. **Integração do GPS com a Fotogrametria**. Departamento de Cartografia FCT/Unesp. Presidente Prudente – SP.1994.

BRITO, J. L. N. E. S., COELHO FILHO, L. C. T., **Fotogrametria Digital**. Instituto Militar de Engenharia. 1a Ed. Rio de Janeiro, Brasil. 2002.

CLÁUDIO, D.M.; MARINS, J.M. **Cálculo Numérico Computacional: Teoria e Prática**.3 ed. São Paulo: Atlas. 2000.

COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA – CONCAR. Disponível em: <<http://www.concar.ibge.gov.br/indexf7a0.html?q=node/41>> Acesso em: 15 dezembro. 2006.



DEPARTAMENTO DE FÍSICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO. UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, 2006. Disponível em: <<http://www.fisica.ufop.br/textos/MC7.doc>>. Acesso em: 18 novembro. 2006.

FERNANDES, S. L. **Aerotriangulação Semi-Analítica no Ortho 3 Projector da Zeiss**. 1991. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria – RS. 1991.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba: Editora UFPR. 1994. 319p.

HALLERT, B. **Photogrammetry: basic principles and general survey**. New York: Mc Graw-Hill Book Company. 1960.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. 2006. Disponível em: <<http://www.ibge.br>>. Acesso em: 12 jul. 2006.

LEICK, A. **GPS Satellite surveying**. New York. John Wiley & Sons, Inc. 1995.

LOPEZ-CUERVO Y ESTEVEZ, S. **Fotogrametria**. Madrid: EGRAF, 1980.

LUGNANI, J.B. **Introdução à Fototriangulação**. Universidade Federal do Paraná - UFPR. Curitiba - PR. 1987. 134p.

PEDROSA, D.P.F.. **Ajuste de Curvas**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Departamento de Engenharia de Computação e Automação. 2005. Disponível em: <<http://www.dca.ufrn.br>>. Acesso em 6 nov. 2006.

SEGANTINE, P. C. L.; **GPS - sistema de posicionamento global**. São Carlos. EESC-USP. 1999.

SHORTIS, M. R.; BEYER, H. A. *Sensor technology for digital photogrammetry and a machine vision*. In: **Close range photogrammetry and machine vision**, Edited by

ATKINSON, K. B., Department of Photogrammetry and Surveying. University College London. 1996. 371p.

SILVA , L. C; PETRAGLIA A.; PETRAGLIA, M. R. Sistema de Visão Estéreo para Inspeção Submarina de Tubulações e Equipamentos de Petróleo em Águas Profundas. In: SEMINÁRIO DE INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMAÇÃO. 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Brazilian Petroleum Institute – IBP. 1998.

SOUZA, G. C. **Análise de Metodologias no Levantamento de Dados Espaciais para o Cadastro Urbano.** 2001. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia – Área: transportes). Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR, São Paulo. 2001.

STEVENS, M. H.. **AeroSys Aerotriangulation:** User Guide. Saint Paul. MN USA.1989.

TOMMASELLI, A. M. G. Construção analítica de modelos e suas aplicações: uma abordagem utilizando injunções relativas. Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Cartografia**, Nº 41. - RJ. p. 43-58, 1987.