

JOÃO BATISTA RAMOS CÔRTEZ

**O USO DE FOTOGRAFIAS AÉREAS DE PEQUENO
FORMATO DIGITALIZADAS, EM
MAPEAMENTO TOPOGRÁFICO PLANIMÉTRICO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Edson Aparecido Mitishita

CURITIBA

1998

JOÃO BATISTA RAMOS CÔRTEZ

**USO DE FOTOGRAFIAS AÉREAS DE PEQUENO FORMATO
DIGITALIZADAS,
EM MAPEAMENTO TOPOGRÁFICO PLANIMÉTRICO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita

Curitiba

1998

“USO DE FOTOGRAFIAS AÉREAS DE PEQUENO FORMATO DIGITALIZADAS, EM MAPEAMENTO TOPOGRÁFICO PLANIMÉTRICO”

POR

JOÃO BATISTA RAMOS CÔRTEZ

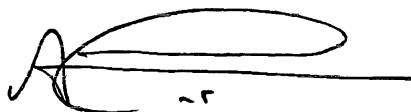
Dissertação aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:



Prof. Dr. EDSON APARECIDO MITISHITA
Orientador e Presidente



Prof. Dr. QUINTINO DAL MOLIN - Membro



Prof. Dr. ALUIR PORFÍRIO DAL POZ - Membro

Dedico:

**Ao *Gueto*, pela amizade, alegrias, tristezas e
decepções que juntos enfrentamos:**

Alcides

Evilázio

Lincoln

Rosane

Zuleica

A minha família, Sr. Zizi, Dona Rosa e Jussanã.

Agradecimentos

Aos amigos da coordenação de Agrimensura, da Escola Técnica Federal de Goiás (ETFGO);

A Universal S.A. pela conversão analógica/digital dos negativos das fotografias usadas neste trabalho.

SUMÁRIO

1.0 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - OBJETIVOS.....	2
1.2 - JUSTIFICATIVA	3
2.0 - REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 - ESTRUTURA DE DADOS	4
2.1.1 - ESTRUTURA VETORIAL OU POLIGONAL.....	4
2.1.2 - ESTRUTURA RASTER, GRADE OU MATRICIAL.....	6
2.2 - TRANSFORMAÇÃO ANALÓGICA/DIGITAL	7
2.3 - SISTEMA DE COORDENADAS.....	9
2.3.1 - <i>Sistema de Coordenadas do Espaço Imagem</i>	10
2.3.1.1 - <i>Sistemas de Coordenadas Fotográficas</i>	10
2.3.1.1.1 - Sistema Fiducial.....	10
2.3.1.1.2 - Sistema fotogramétrico	12
2.3.1.1.3 - Sistema de Coordenadas Instrumentais ou de Comparador	14
2.3.2 - <i>Referenciais do Espaço Objeto</i>	15
2.3.2.1 - Sistema de Coordenadas Topográficas	16
2.4 - EQUAÇÃO DE COLINEARIDADE	16
2.5 - EQUAÇÃO INVERSA DE COLINEARIDADE	20
2.6 - ERROS SISTEMÁTICOS DA IMAGEM FOTOGRÁFICA	21
2.6.1 - <i>Deformações e Ondulações do Filme</i>	21
2.6.2 - <i>Deslocamento do ponto principal</i>	24
2.6.3 - <i>Distorções das lentes</i>	24
2.6.3.1 - Distorção Radial Simétrica.....	24
2.6.3.2 - Distorção Descentrada.....	25
2.6.4 - <i>Correção da Refração Fotogramétrica</i>	26
2.7 - FOTOTRIANGULAÇÃO OU AEROTRIANGULAÇÃO	28

2.7.1 - <i>Preparação para a Aerotriangulação</i>	29
2.7.1.1 - Distribuição do Apoio de Campo	29
2.7.1.2 - Espaçamento dos Pontos de Apoio de Campo	30
2.7.1.3 - Escolha dos Locais dos Pontos de Apoio	31
2.7.1.3.1 - Sinalização Artificial dos Pontos de Apoio (Pré-sinalização)	31
2.7.2 - <i>Escolha dos Pontos Fotogramétricos</i>	32
2.7.3 - <i>Fototriangulação analítica</i>	34
2.7.3.1 - Resseção Espacial ou Orientação Exterior	34
2.7.3.2 - Formação Analítica do Modelo	35
2.8 - MODELO DIGITAL DO TERRENO (MDT)	36
2.8.1 - <i>Malha Regular</i>	38
2.8.2 - <i>Malha Irregular</i>	38
2.8.3 - <i>Pontos Aleatórios</i>	38
2.8.4 - <i>Perfilamento</i>	39
2.8.5 - <i>Curvas de nível</i>	39
2.8.6 - <i>Geração e Interpolação de um MDT</i>	39
2.9 - CÂMARAS	40
2.10 - CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS	42
2.11 - RESTITUIÇÃO FOTOGRAMÉTRICA	43
2.11.1 - <i>Estereorestituição</i>	44
2.11.2 - <i>Monorestituição</i>	44
2.12 - APLICAÇÕES DE FOTOGRAFIA DE PEQUENO FORMATO	46
3.0 - MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1 - ESCOLHA DA ÁREA TESTE	49
3.2 - MATERIAIS	49
3.3 - METODOLOGIA	50
3.3.1 - <i>Calibração da Câmara</i>	50
3.3.1.1 - <i>Método de Calibração</i>	51

3.3.1.2 - Conversão Analógica/Digital	51
3.3.1.3 - Orientação Interior	51
3.3.1.4 - Processamento.....	52
<i>3.3.2- Distribuição e Implantação dos Pontos de Pré-sinalização.....</i>	<i>52</i>
<i>3.3.3- Levantamento Topográfico Plani-altimétrico dos Pontos Pré-sinalizados</i>	<i>52</i>
<i>3.3.4- Realização da Cobertura Aérea.....</i>	<i>53</i>
<i>3.3.5- Aerotriangulação.....</i>	<i>54</i>
3.3.5.1 - Escolha dos Pontos para a Aerotriangulação	54
3.3.5.2 - Conversão Analógica/Digital das Fotografias	55
3.3.5.3 - Orientação Interior da Fotografia	55
3.3.5.4 - Obtenção das Coordenadas do Pontos para a Aerotriangulação.....	55
3.3.5.5 - Detecção de Erros Grosseiros	55
3.3.5.6 - Análise da Aerotriangulação.....	55
<i>3.3.6 - Obtenção de Informações Altimétricas da Região.....</i>	<i>56</i>
3.3.6.1 - Orientação Espacial Aproximada da Fotografia Aérea.....	56
3.3.6.2 - Orientação Espacial Exata da Fotografia Aérea.....	57
3.3.6.3 - Varredura Monoscópica.....	57
<i>3.3.7 - Produção do Mapa</i>	<i>58</i>
3.3.7.1 - Digitalização Vetorial das Entidades Gráficas de Interesse.....	58
3.3.7.2 - Transformações entre referenciais do espaço imagem e objeto	59
3.3.7.2.1 - Transformação das Entidades Gráficas do Referencial de Desenho para o Geodésico Local	59
3.3.7.3- Procedimentos finais para a elaboração do mapa em meio digital.....	61
<i>3.3.8 - Comparação das Coordenadas obtidas por Topografia e Monorestituição</i>	<i>61</i>
<i>3.3.9 - Classificação do mapa.....</i>	<i>61</i>
4.0 - RESULTADOS	62
4.1 - RESULTADOS DA AUTOCALIBRAÇÃO.....	62
4.2 - IMPLANTAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS ALVOS DE PRÉ-SINALIZAÇÃO.....	69
4.3 - LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO	70

4.3.1 - Primeiro Levantamento Topográfico.....	70
4.3.2 - Segundo Levantamento Topográfico	71
4.4 - COBERTURA FOTOGRÁFICA DA ÁREA	72
4.5 - RESULTADOS DA AEROTRIANGULAÇÃO	72
4.6 - GERAÇÃO DO MODELO DIGITAL DO TERRENO (MDT).....	79
4.7 - RESULTADOS DA PRODUÇÃO DO MAPA	80
4.7.1 - Digitalização das Entidades Gráficas.....	80
4.7.2 - Retificação	80
4.7.2.1 - Transformação das Entidades Gráficas.....	80
4.7.3 - Edição Gráfica.....	81
4.7.4 - Resultados da Restituição Monoscópica	81
4.8 - CLASSIFICAÇÃO DA CARTA	86
4.9 -VIABILIDADE ECONÔMICA	86
5.0 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	89
6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXO 1	95
ANEXO 2	96
ANEXO 3	98

Índice de Figuras

1 - Representação gráfica da estrutura vetorial.....	5
2 - Representação gráfica da estrutura <i>raster</i>	6
3 - Espaços imagem e objeto.....	9
4 - Quantidade e distribuição das marcas fiduciais.....	11
5 - Sistema fiducial de uma fotografia aérea.....	12
6 - Sistema fotogramétrico.....	13
7 - Fotografia não orientada sobre a placa.....	14
8 - Relação de colinearidade entre um ponto no terreno e sua imagem na foto.....	17
9 - Introdução do referencial topográfico nas equações de colinearidade.....	18
10 - Deslocamento radial da posição da imagem de um ponto devido à ondulação do filme...21	
11 - Relação entre distância focal e erro devido a ondulação do filme.....	22
12 - Desvio do raio de luz provocado pela refração atmosférica.....	27
13 - Distribuição dos pontos de apoio.....	29
14 - Formas simétricas utilizadas para alvos de pré-sinalização.....	31
15 - Distribuição dos pontos fotogramétricos na fotografia para a aerotriangulação.....	33
16 - Distribuição de pontos em uma fotografia aérea para a realização da resseção espacial...35	
17 - Posição da câmara para a tomada das fotografias.....	43
18 - Iteração para a determinação das coordenadas de um ponto com a monorestituição.....	45
19 - Campo de teste usado para a autocalibração.....	62
20 - Detalhes dos alvos do campo de calibração (medidas em centímetros).....	63
21 - Posição ocupada pelos alvos no negativo.....	63

22 - Marcas do <i>reseau</i> escolhidas como marcas fiduciais.....	65
23 - Gráficos da distorção radial simétrica.....	68
24 - Distribuição dos vetores de distorção radial simétrica no quadro do negativo.....	68
25 - Distribuição dos vetores de distorção descentrada no quadro do negativo.....	69
26 - Alvo de pré-sinalização.....	70
27 - Distribuição dos pontos para a aerotriangulação em cada fotografia aérea.....	73
28 - Distribuição dos pontos pré-sinalizados na faixa.....	73

Índice das Tabelas

1 - Descrição das entidades vetoriais.....	5
2 - Dimensões das formas utilizadas para a marcação dos pontos de apoio.....	32
3 - Estação de exposição e posição e os ângulos de rotação da câmara.....	64
4 - Resíduos dos Pontos de Controle.....	67
5 - Dados das poligonais para o levantamento dos alvos de pré-sinalização.....	71
6 - Resíduos dos pontos de apoio (com correção da distorção do filme)	75
7 - Resíduos dos pontos de apoio (com correção dos erros sistemáticos da imagem).....	76
8 - Comparação entre as coordenadas dos alvos pré-sinalizados obtidas pela aerotriangulação com a correção dos erros sistemáticos e por levantamento topográfico.....	77
9 - Comparação entre as coordenadas dos alvos pré-sinalizados obtidas pela aerotriangulação sem a correção dos erros sistemáticos e por levantamento topográfico.....	78
10 - Comparação das coordenadas topográficas e monorestituídas de pontos no solo.....	82
11 - Comparação das coordenadas topográficas e monorestituídas de pontos sobre o muro...83	
12 - Comparação entre as coordenadas das edificações obtidas pela monorestituição e por levantamento topográfico.....	84
13 - Comparação entre as coordenadas de muros obtidas por interseção de retas na monorestituição e por levantamento topográfico.....	85
14 - Estimativa dos custos da confecção do mapa digital usando monorestituição.....	85

Resumo

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para realização de mapeamento em formato digital por monorestituição de fotografias aéreas de pequeno formato. Para tal, usou-se uma câmara Rolleiflex SLX com *reseau* para a obtenção das fotografias. Para obter os parâmetros intrínsecos da câmara, realizou-se sua calibração pelo método das câmaras convergentes, usando como campo de teste uma parede plana contendo 25 alvos. Os pontos de controle foram pré-sinalizados, e suas coordenadas plani-altimétricas obtidas por topografia (usando estação total), sendo os mesmos densificados por aerotriangulação. A transformação analógica/digital foi realizada por um *scanner* fotogramétrico com resolução óptica de 2500 DPI. O trabalho foi realizado utilizando os seguintes *softwares*: sistema de monorestituição digital; Computer Aided Design com o módulo gerenciador de imagem Iras-C da MicroStation e Fotter

Para testar a metodologia, utilizou-se uma área situada na cidade de Goiânia – Goiás, onde comparou-se as coordenadas de pontos bem definidos obtidas pela monorestituição e por topografia, admitindo-se estas isentas de erros. Pode-se concluir que a monorestituição de fotografias aéreas de pequeno formato é eficaz para mapeamento planimétrico em escala de 1/5000. O mapa assim produzido foi classificado em “A” de acordo com o Decreto Lei 89.817 de 20 de junho de 1984.

1.0 - Introdução

Um dos grandes problemas enfrentado pelos profissionais que trabalham com informações do espaço geográfico é a ausência de mapas ou a sua desatualização. Esta carência de informações, as vezes, obriga o profissional a intuir sobre as informações do espaço geográfico, refletindo em prejuízos diretos ou indiretos para a população ou para o meio ambiente. Ter um mapa atualizado e preciso é uma necessidade primordial para qualquer estudo ou planejamento envolvendo o espaço geográfico.

Observa-se que os avanços na informática estão influenciando todos os setores da produção de mapas, quer seja na topografia ou na aerofotogrametria. Estes avanços, tais como: desenvolvimento de processadores mais velozes (tornando possível a manipulação de grande quantidade de dados em curto espaço de tempo); disco rígido com maior capacidade de armazenamento de dados; programas e equipamentos específicos para mapeamento com preços acessíveis, vêm contribuindo para minimizar as dificuldades, tempo de execução e custo do mapeamento.

A topografia automatizada (estação total, coletores de dados e programas para processamento e desenho), diminui consideravelmente o tempo de coleta de dados no campo, além de aumentar a sua confiabilidade. Porém, continua exigindo que todos os detalhes de interesse sejam visualizados e coletados diretamente no campo. Quanto maior for a riqueza de detalhes de um levantamento topográfico, maior será o tempo gasto com o levantamento de campo.

A aerofotogrametria convencional é mais rápida que a topografia, porém exige uma equipe especializada, equipamentos de alto valor, como câmaras fotogramétricas e

estereorestituidores. Por necessitar de apoio de campo, deslocamento de aeronave de médio a grande porte previamente adaptada e por ter custo elevado, o voo fotogramétrico quase sempre fica inviável em pequenas áreas, principalmente se forem distantes das sedes das empresas de aerolevantamentos, já que são poucas as empresas autorizadas pelo Estado Maior das Forças Armadas (EMFA) a realizarem vôos fotogramétricos. Porém, a monorestituição de fotografias aéreas de pequeno formato poderá mapear planimetricamente pequenas áreas, suprimindo a lacuna deixada pela fotogrametria convencional. Geralmente o mapeamento de pequenas áreas é realizado por topografia.

A maior dificuldade que os usuários da monorestituição digital enfrentam é a obtenção das fotografias. Uma flexibilização na legislação brasileira, permitindo a realização destes vôos por qualquer empresa, sanaria tal problema. Como pode-se utilizar desde aeromodelos até aeronave de médio porte para a obtenção de fotografias aéreas de pequeno formato, o recobrimento fotográfico seria facilmente realizado em qualquer parte do país.

A monorestituição digital pode minimizar consideravelmente os custos do mapeamento, pois utiliza equipamentos como *scanners*, microcomputadores, programas específicos e uma pequena equipe de trabalho. Tal fato propiciará a oportunidade de municípios de pequeno porte terem suas áreas urbanas devidamente mapeadas, auxiliando a implantação de um sistema de gerenciamento de informações, contribuindo assim nas decisões de seus administradores.

1.1 - Objetivos

Tem-se como objetivos nesse trabalho:

- 1 - Desenvolver e disseminar a metodologia para mapeamento topográfico planimétrico usando

fotografias aéreas digitalizadas de pequeno formato;

2 - Analisar as precisões alcançadas com esta metodologia;

3 - Comparar a relação de custo/benefício desta metodologia com a topografia e a aerofotogrametria convencional.

1.2 - Justificativa

A utilização desta metodologia, de mapeamento, poderá suprir a necessidade dos profissionais que trabalham com informações geográficas de áreas pequenas ou médias, além de permitir a atualização e mapeamento de municípios de pequeno a médio porte.

Por sua simplicidade, o levantamento topográfico planimétrico com o uso de fotografia aérea digitalizada de pequeno formato pode ser incluído na grade curricular de cursos técnicos, capacitando assim profissionais que atuam no mercado de trabalho em curto espaço de tempo, empregando a metodologia corretamente.

A monorestituição, utiliza equipamentos de baixo custo, o que favorecerá a sua disseminação e aceitação no mercado, propiciando deste modo um mapeamento planimétrico com baixo custo de execução.

2.0 - Revisão de Literatura

Esta revisão de literatura visa apresentar os conceitos e fundamentos básicos utilizados em todas as etapas da monorestituição de fotografias, como também, alguns trabalhos realizados com fotografias aéreas de pequeno formato.

2.1 - Estrutura de Dados

Mapear significa obter as características gerais de dados geográficos¹ de interesse da superfície física, podendo ser objetos ou fenômenos observáveis pelo homem. Estas informações são geralmente reduzidas a três possíveis entidades geométricas: ponto, linha e polígono. Estes dados podem ser armazenados em meio magnético em diferentes estruturas que se classificam em: vetorial, matricial ou *raster* e topológica (BURROUGH, 1989).

2.1.1 - Estrutura Vetorial ou Poligonal

Uma estrutura vetorial ou poligonal fundamenta-se em coordenadas cartesianas e nos postulados da geometria Euclidiana. O ponto com suas coordenadas (X,Y ou X,Y,Z) é a entidade fundamental desta estrutura. Linhas e polígonos são criados pela ligação dos pontos ou por funções matemáticas que os descrevem (BURROUGH, 1989). A Figura 1 e a Tabela 1 apresentam as entidades da estrutura vetorial usadas em um mapeamento.

O posto de observação, por ser uma entidade pontual, foi representado por um ponto pela feição de número 200. O rio está representado por duas linha 203 e 204, que são as suas margens, formada pela união dos pontos de número 49 a 70 e 71 a 90. A plantação de arroz é considerada um polígono por ser uma linha fechada sobre ela mesma, representada pela união

¹ Dados geográficos são caracterizados por três componentes fundamentais: não espaciais, espaciais e temporais, associadas ao fenômeno estudado.

dos pontos de número 91 a 114.

Figura 1 - Representação gráfica da estrutura vetorial

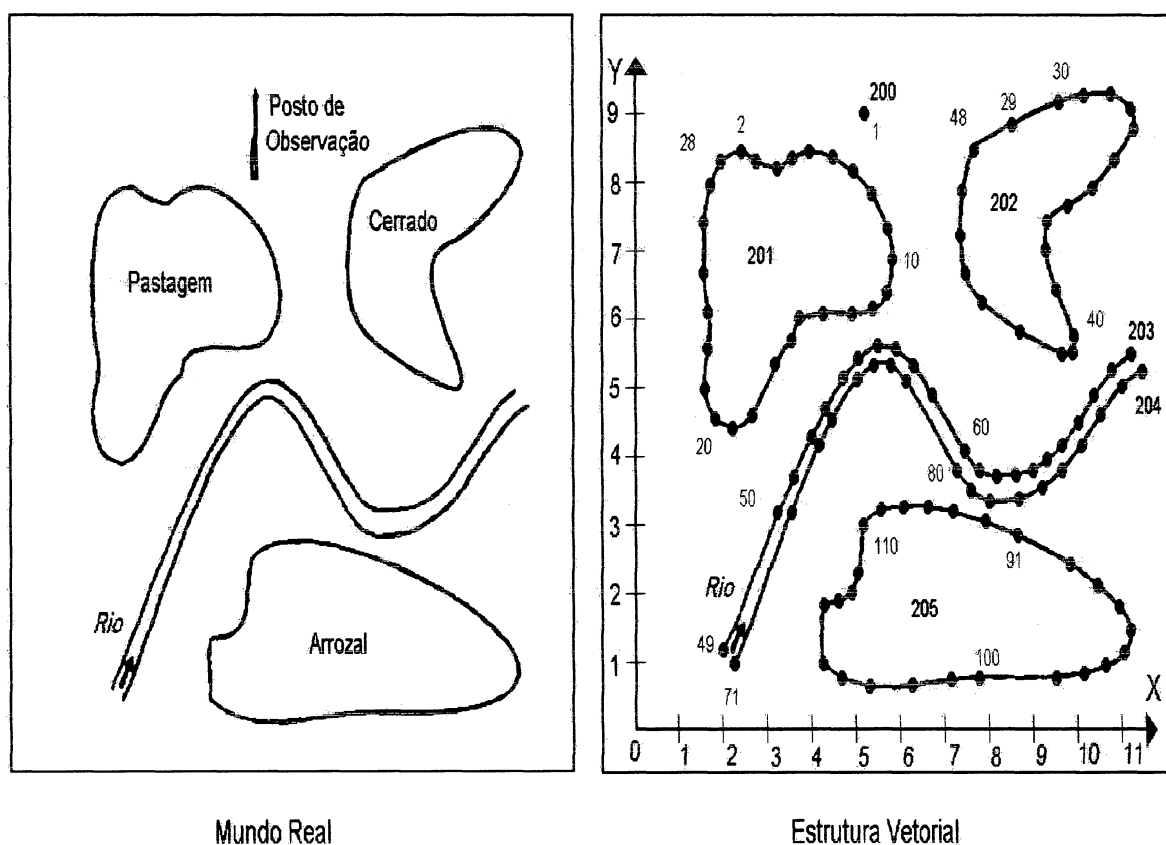


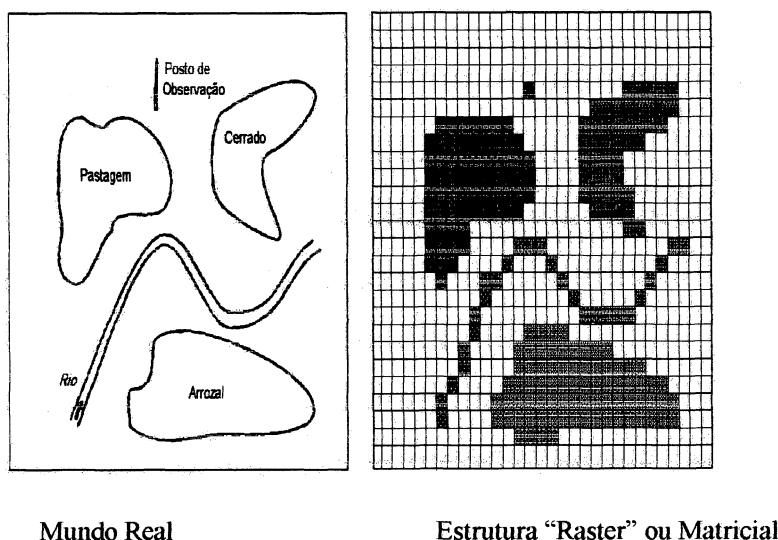
Tabela 1 - Descrição das entidades vetoriais

Tipo da Entidade	Número da Feição	Coord dos Pontos definidores
Ponto	200	X_1, Y_1
Linha	203	$X_{49}, Y_{49}; \dots; X_{70}, Y_{70}$
Linha	204	$X_{71}, Y_{71}; \dots; X_{90}, Y_{90}$
Polígono	201	$X_2, Y_2; \dots; X_{28}, Y_{28}$
Polígono	202	$X_{29}, Y_{29}; \dots; X_{48}, Y_{48}$
Polígono	205	$X_{91}, Y_{91}; \dots; X_{114}, Y_{114}$

2.1.2 - Estrutura *Raster*, Grade ou Matricial

A estrutura de dados *raster* é uma das mais simples estrutura de dados, onde uma grade quadrangular é superposta à superfície física do terreno. Cada elemento da malha é denominado célula ou *pixel*, sendo referenciada pelo número da linha e da coluna, contendo um valor numérico inteiro que representa a intensidade de energia eletromagnética recebida pelo sensor (BURROUGH, 1989). A Figura 2 apresenta as entidades da estrutura *raster* usada em um mapeamento.

Figura 2 - Representação gráfica da estrutura raster



Estes valores numéricos estão contidos em uma escala de tons de cinza na qual o preto assume o valor zero e o branco um valor variável dependente do número de *bits* reservado para o armazenamento de cada *pixel*. Como os computadores operam no sistema binário, o número de tons de cinza é uma potência de base dois e expoente igual ao número de *bits* reservado para o armazenamento de cada *pixel*. Se reservar um *bit*, tem-se dois níveis: preto ou branco, armazenando 0 ou 1 para cada tonalidade. Se reservar oito *bits*, tem-se 256 tons de cinza, armazenando valores que variam de 0 para o branco a 255 para o preto.

A quantização dos valores que representam a intensidade de energia eletromagnética recebida pelo sensor, ou seja, diversificação dos tons de cinza, é denominada resolução radiométrica.

Quanto maior for o número de linhas e colunas de uma imagem para a mesma área, menor será a área do objeto representada em cada *pixel*, assim a relação existente entre o tamanho do *pixel* e o tamanho do objeto por ele representado é denominado resolução espacial da imagem.

Para sensores espaciais a resolução espacial da imagem é definida e fixa. Em câmaras digitais a resolução varia com a distância “objeto/câmara”, sendo que a área do objeto representada em cada *pixel* deve ser calculada caso a caso.

Quanto maior a resolução radiométrica e espacial, maior será o grau de detalhamento e informações discerníveis na imagem, porém o espaço ocupado para o armazenamento aumenta em progressão geométrica se comparado ao aumento do número de linhas, de colunas e de tons de cinza da imagem.

Segundo SCARIN & TEIXEIRA (1994), a imagem *raster* apresenta restrições na manipulação, principalmente quando se deseja associar feições ao banco de dados alfanuméricos, além do tamanho do arquivo, dificuldade de edição e construção da topologia. Por estas razões os autores recomendam a vetorização da imagem raster. Os processos de vetorização podem ser: manual, semi-automática ou automática.

2.2 - Transformação Analógica/Digital

A passagem de uma imagem do meio analógico para o meio digital é conhecida como transformação analógica/digital ou transformação A/D. Esta transformação é feita por amostragem e quantização. Amostragem é a discretização da superfície, por decomposição da

imagem em *pixel*, e a quantização é a discretização dos valores de tons de cinza.

Os equipamentos que convertem imagens analógicas em imagens digitais são denominados digitalizadores ou *scanners*. Existem basicamente dois tipos de *scanner*, os de tambor (*drum scanners*) e os de base plana (*flat bed scanners*). Os *scanner* de tambor, operam com um elemento sensor que se desloca na direção horizontal e um cilindro rotativo, no qual é fixada a imagem a ser digitalizada. A combinação dos dois movimentos permite a varredura completa da imagem. Nos *scanner* de base plana, os elementos sensores são dispostos em linha, que se desloca sob a base de fixação da imagem a ser digitalizada, o tamanho do pixel pode variar de 7,5 a 250 μm conforme o número de elementos sensores (OLIVAS, 1995).

As células fotossensíveis captam a luz refletida da imagem, gerando um fraco sinal elétrico proporcional a intensidade de luz recebida. Este sinal é armazenado em capacitores e passam por um processo de ampliação, pela introdução de voltagem externa, produzindo uma série de voltagens que são convertidas em grandezas discretas (tons de cinza) por meio de um conversor analógico digital (GALO, 1993). Por exemplo, se um computador utiliza um *byte* de 8 *bits* para armazenar a reflectância de uma área, a imagem poderá conter 256 tons de cinza que serão representados pelos valores 0 a 255. Os elementos do CCD captam sinais elétricos, que são transformados para tons de cinza usando uma interpolação linear. Então, se os elementos do CCD captam os sinais elétricos em um intervalo de 0 a 5 volts, e a escala de tons de cinza for de 256 números, uma leitura de 2 volts num elemento do CCD representará um valor inteiro para o tom de cinza de 102, obtido por interpolação linear.

A maioria dos *scanners* pode operar com 16 milhões de cores (*true color*). O espaço reservado para o armazenamento dos valores de tons de cinza de um pixel neste caso é de 22 *bits*.

Normalmente, trabalha-se com diapositivo, neste caso o espaço imagem é a região compreendida entre o ponto nodal anterior e o plano formado pelo diapositivo.

2.3.1 - Sistema de Coordenadas do Espaço Imagem

Os sistemas de coordenadas do espaço imagem podem ser:

- 1 - Sistema de coordenadas fotográficas;
- 2 - Sistema de coordenadas Instrumentais ou de Comparador.

2.3.1.1 - Sistemas de Coordenadas Fotográficas

As coordenadas fotográficas podem ser associadas a um sistema fiducial ou fotogramétrico.

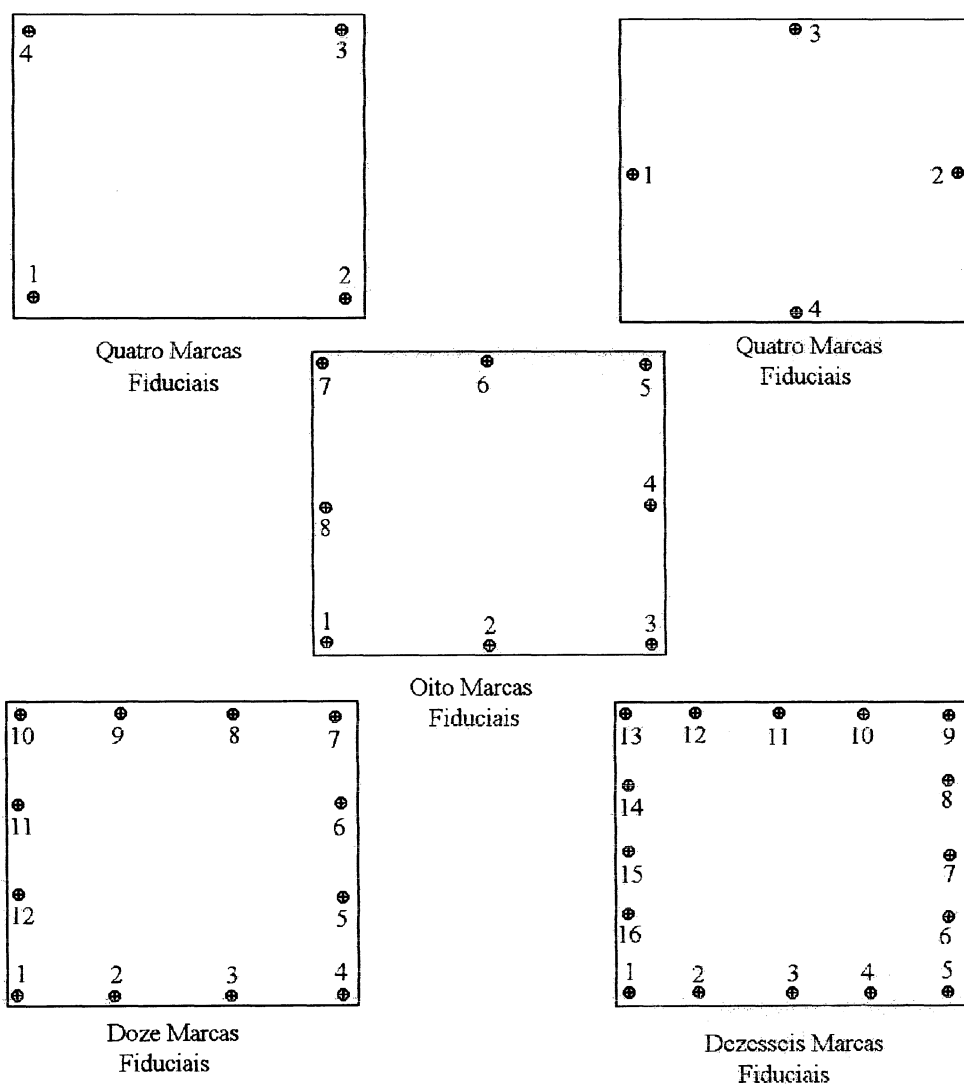
2.3.1.1.1 - Sistema Fiducial

O sistema fiducial é definido pelas marcas fiduciais ou *ressau* de uma câmara. Estas marcas tem por objetivo materializar o sistema fiducial, corrigir o trabalho do filme e recuperar a orientação interior de uma fotografia. As marcas fiduciais e as marcas do *reseau* são fixas na região do plano focal e fotografadas simultaneamente com a superfície do terreno. De acordo com o tipo e ano de fabricação da câmara aérea o número de marcas fiduciais pode variar de 4 a 16 (MITISHITA, 1997). A Figura 4 mostra as várias distribuições e quantidades de marcas fiduciais das principais câmaras aéreas.

O ponto principal de uma fotografia é definido como sendo a projeção ortogonal do centro perspectivo do sistema de lentes sobre o diapositivo ou negativo. O centro fiducial de uma fotografia é obtido pela interseção de duas retas que unem duas marcas fiduciais opostas. A diferença entre o ponto principal e o centro fiducial pode ser desprezada na fotogrametria

analógica se tal diferença for inferior a menor medida realizada pelo equipamento analógico, porém para a fotogrametria analítica, esta diferença deve ser considerada.

Figura 4 - Quantidade e distribuição das marcas fiduciais

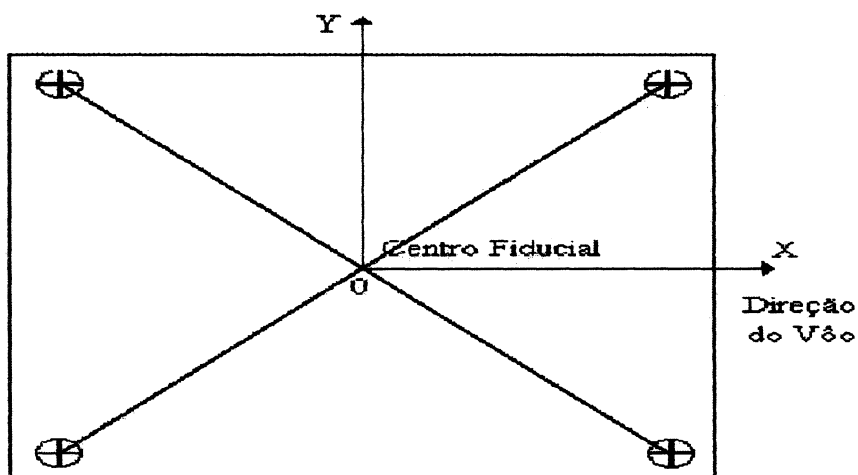


Fonte: Mitishita, 1997

O sistema fiducial é um sistema cartesiano bidimensional, cuja origem é o centro fiducial. O eixo X é orientado positivamente na direção da linha de vôo, tal que seja coincidente com a linha que une as marcas fiduciais opostas que mais se aproximam do eixo horizontal da câmara. O eixo Y é perpendicular ao eixo X, e destrógiro, ou seja, a sua

orientação positiva é obtida por uma rotação angular de 90° no sentido anti-horário. A Figura 5 apresenta o sistema fiducial de uma fotografia aérea.

Figura 5 - Sistema fiducial de uma fotografia aérea



As coordenadas das marcas fiduciais no sistema fiducial são utilizadas para realizar transformações entre referenciais e para a obtenção da orientação interna de uma fotografia. Estas coordenadas são fornecidas pelo fabricante junto com o certificado de calibração da câmara ou calculadas na calibração da mesma.

2.3.1.1.2 - Sistema Fotogramétrico

O sistema fotogramétrico é paralelo ao sistema fiducial, tendo a sua origem no ponto nodal anterior, se diapositivo, ou no ponto nodal posterior, se negativo. O sistema é cartesiano tridimensional destrógiro, com o eixo Z_p ortogonal ao plano que contém a fotografia, conforme Figura 6.

Na transformação do sistema fiducial para o fotogramétrico é necessário ter-se as coordenadas (X_{pp}, Y_{pp}) do ponto principal no sistema fiducial. Estas coordenadas são obtidas por procedimentos de calibração e são fornecidas pelo fabricante no certificado de calibração.

No sistema fotogramétrico, um ponto possui coordenadas tridimensionais (X,Y,Z), porém em observações sobre o positivo ou negativo o valor da coordenada Z é constante e igual, em modelo, a distância focal.

Para realizar a transformação do sistema fiducial para o sistema fotogramétrico basta realizar uma translação, dada por:

$$X_p = X_f - X_{pp} \quad (01)$$

$$Y_p = Y_f - Y_{pp} \quad (02)$$

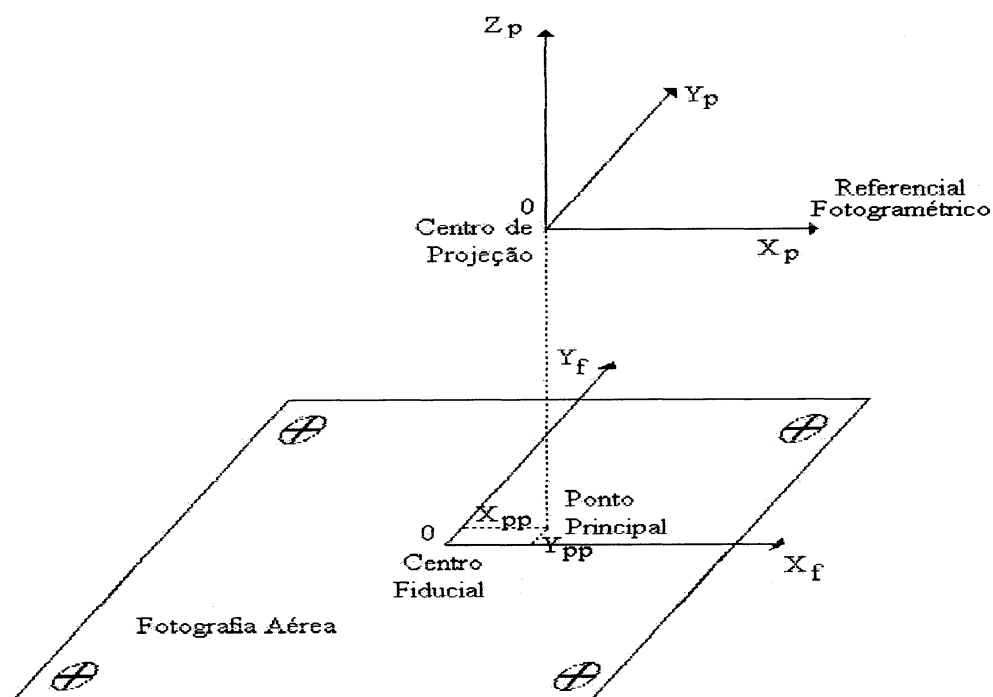
Onde:

X_p e Y_p - Coordenadas do ponto no sistema fotogramétrico;

X_f e Y_f - Coordenadas do ponto no sistema fiducial;

X_{pp} e Y_{pp} - Coordenadas do ponto principal no sistema fiducial.

Figura 6 - Sistema fotogramétrico



2.3.1.1.3 - Sistema de Coordenadas Instrumentais ou de Comparador

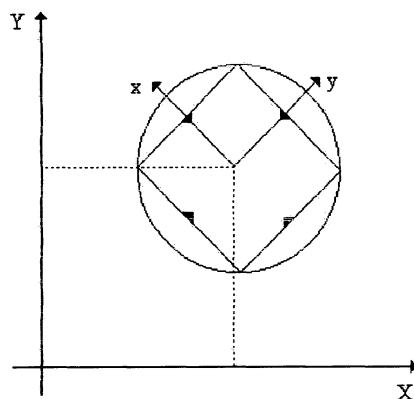
Existem dois tipos de comparadores: os monocomparadores e os estereo-comparadores.

Os monocomparadores utilizam-se de uma fotografia para fazer as medidas de coordenadas dos pontos de interesse, enquanto os estereo-comparadores utilizam-se de pares estereoscópicos para executar as medidas de coordenadas em pontos homólogos, simultaneamente.

Os monocomparadores são equipados com microscópio binocular, ampliando a imagem até 40 vezes, permitindo assim uma melhor identificação do ponto a ser medido. A orientação da fotografia na placa de suporte é feita com movimentos de rotação em torno do eixo de fixação e translação nos eixos X e Y.

Quando as medidas de coordenadas são realizadas com a fotografia sem orientação na placa de suporte, conforme Figura 7, as coordenadas do sistema instrumental são convertidas para o sistema fiducial utilizando transformações matemáticas. Dentre as transformações matemáticas possíveis para esta conversão, a transformação afim geral no plano é a mais empregada.

Figura 7 - Fotografia não orientada sobre a placa



As equações matemática utilizadas para realizar a transformação geral afim no plano são as equações 03 e 04. A equação 03 é a forma direta e a 04 a forma inversa.

$$\begin{bmatrix} X_f \\ Y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad (03)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} X_f - c_1 \\ Y_f - c_2 \end{bmatrix} \quad (04)$$

Onde:

X_f e Y_f - Coordenadas dos pontos no sistema fiducial;

X e Y - Coordenadas dos pontos no sistema instrumental;

$a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$ - parâmetros de transformação dos sistema instrumental para o sistema fiducial.

2.3.2 - Sistemas do Espaço Objeto

Entende-se por sistemas do espaço objeto, os sistemas topográficos ou geodésicos utilizados para representação de pontos na superfície da Terra.

Seria adequado que os sistemas envolvidos nas transformações entre espaço objeto e imagem fossem cartesianos tridimensionais, porém na prática, isso nem sempre acontece quando se utiliza sistemas no espaço objeto, denominados de híbridos. Como é o caso do sistema UTM (Universal Transverse Mercator), ou o topográfico, onde as coordenadas planas e altimétricas estão em sistemas distintos (MITISHITA, 1997).

Dos vários sistemas do espaço objeto, será descrito somente o sistema topográfico por ter sido utilizado neste trabalho. Para maiores informações sobre os demais sistemas ver VANICEK & KRAKIWSKY (1986) e TORGE (1980).

2.3.2.1 - Sistema Topográfico

Segundo a ABNT (1994), um sistema topográfico é um sistema de projeção utilizado nos levantamentos topográficos pelo método direto clássico para a representação das posições relativas dos acidentes levantados, através de medições angulares e lineares, horizontais e verticais, cujas características são:

- a - as projetantes são ortogonais à superfície de projeção localizado no infinito;
- b - a superfície de projeção é um plano normal à vertical do lugar no ponto da superfície terrestre considerado como origem do levantamento, sendo seu referencial altimétrico referido ao *datum* vertical brasileiro;
- c - o plano de projeção tem sua dimensão máxima limitada a 80 km, a partir da origem, de maneira que o erro relativo, decorrente da desconsideração da curvatura terrestre, não ultrapasse 1/35000 nesta dimensão e 1/15000 nas imediações da extremidade desta dimensão;
- d - a localização planimétrica dos pontos, medidos no terreno e projetados no plano de projeção, dá-se por intermédio de um sistema de coordenadas cartesianas, cuja origem coincide com a do levantamento topográfico;
- e - o eixo das ordenadas é a referência azimutal que, dependendo das peculiaridades do levantamento, pode estar orientado para o norte geográfico, para o norte magnético ou para uma direção notável do terreno, julgada importante.

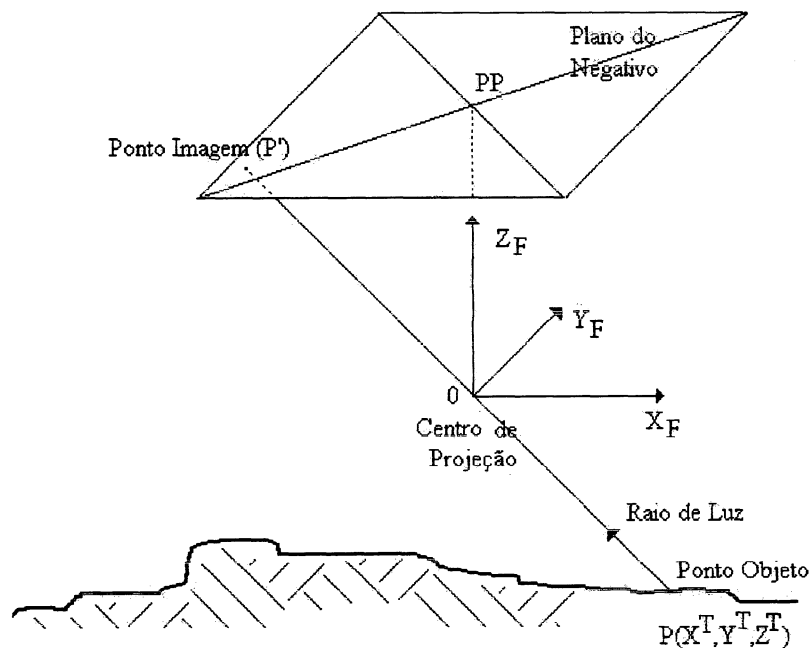
2.4 - Equação de Colinearidade

Pode-se dizer que a equação de colinearidade é o modelo matemático mais utilizado em fotogrametria. Seu desenvolvimento baseia-se na condição teórica de que o ponto imagem, o

centro de projeção e o ponto objeto são colineares, ou seja, o raio de luz refletido pelo objeto propaga-se em linha reta até encontrar o plano formado pelo negativo, conforme Figura 8.

Na prática a condição de colinearidade não ocorre devido aos erros sistemáticos das distorções das lentes, trabalho do filme e refração fotogramétrica que deslocam o ponto imagem e o raio de luz. Esta condição de não colinearidade pode ser minimizada com a parametrização ou pré-correção dos erros.

Figura 8 - Relação de colinearidade entre um ponto no terreno, sua imagem na foto e o centro
perspectivo



Sendo as coordenadas do ponto $P (X^T, Y^T, Z^T)$ no espaço objeto, e as coordenadas do ponto $P' (X_p, Y_p, Z_p)$ no espaço imagem, ambas no sistema fotogramétrico, a equação da reta pode ser escrita por:

$$\frac{X_p}{X^T} = \frac{Y_p}{Y^T} = \frac{Z_p}{Z^T} \quad (05)$$

Com a equação 05, gera-se duas outras equações linearmente independentes; como z_p é

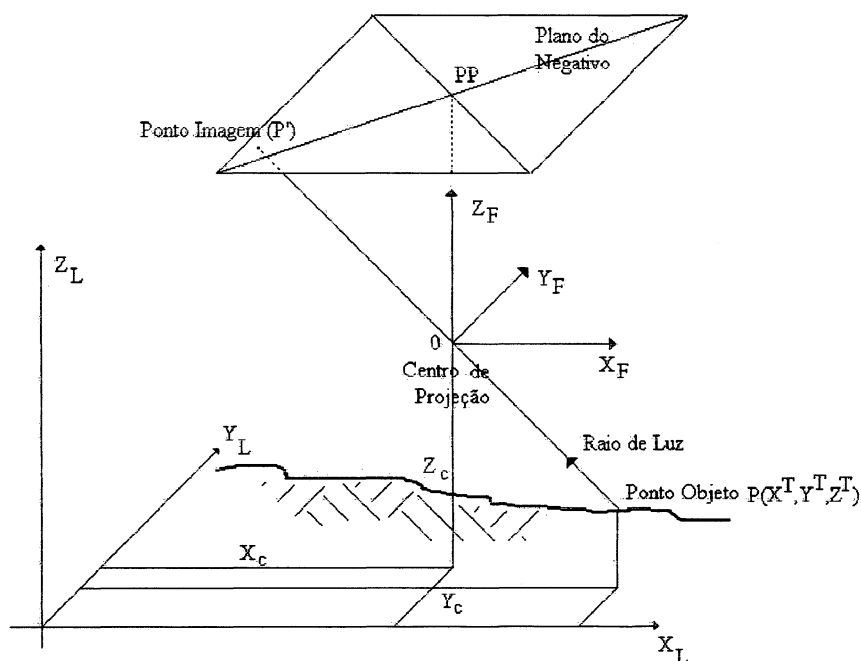
um valor constante e igual a distância focal da câmara (f), para qualquer ponto do negativo, tem-se:

$$X_p = f \frac{X^T}{Z^T} \quad (06)$$

$$Y_p = f \frac{Y^T}{Z^T} \quad (07)$$

As equações 06 e 07 relacionam pontos do espaço objeto com pontos do espaço imagem, porém os pontos do espaço objeto estão vinculados ao sistema fotogramétrico. O ideal é que os pontos do espaço objeto estejam no sistema topográfico, conforme a Figura 9.

Figura 9 - Introdução do referencial topográfico nas equações de colinearidade



Supondo que os referenciais fotogramétrico e topográfico não apresentam deformação, então, para realizar transformações entre eles, são necessárias três rotações, três translação e um fator de escala. Para tal, utiliza-se a transformação de similaridade no espaço.

Para realizar a primeira rotação, em torno do eixo z, de um ângulo κ usa-se a seguinte matriz:

$$M_{(\kappa)} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (08)$$

Para realizar a segunda rotação, em torno do eixo x, de um ângulo ω usa-se a seguinte matriz:

$$M_{(\omega)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (09)$$

Para realizar a terceira rotação, em torno do eixo y, de um ângulo φ usa-se a seguinte matriz:

$$M_{(\varphi)} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (10)$$

Como a aplicação de rotações sequenciais a um vetor equivale a aplicação do produto das rotações ao mesmo vetor, tem-se:

$$M = M_{(\varphi)} \cdot M_{(\kappa)} \cdot M_{(\omega)} \quad (11)$$

$$M = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cdot \cos \kappa & \cos \omega \cdot \sin \kappa + \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa & \sin \omega \cdot \sin \kappa - \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa \\ -\cos \varphi \cdot \sin \kappa & \cos \omega \cdot \cos \kappa - \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa & \sin \omega \cdot \cos \kappa + \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cdot \cos \varphi & \cos \omega \cdot \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (12)$$

A translação é dada pelo vetor :

$$\begin{bmatrix} X - X_c \\ Y - Y_c \\ Z - Z_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

Logo, a equação de colinearidade é dada pelas seguintes expressões:

$$X_p = f \frac{m_{11} \cdot (X^T - X_c) + m_{12} \cdot (Y^T - Y_c) + m_{13} \cdot (Z^T - Z_c)}{m_{31} \cdot (X^T - X_c) + m_{32} \cdot (Y^T - Y_c) + m_{33} \cdot (Z^T - Z_c)} \quad (14)$$

$$Y_p = f \frac{m_{21} \cdot (X^T - X_c) + m_{22} \cdot (Y^T - Y_c) + m_{23} \cdot (Z^T - Z_c)}{m_{31} \cdot (X^T - X_c) + m_{32} \cdot (Y^T - Y_c) + m_{33} \cdot (Z^T - Z_c)} \quad (15)$$

Onde:

X_p, Y_p - Fotocoordenadas de um ponto p no espaço imagem (sistema fotogramétrico);

f - Distância focal calibrada;

m_{ij} - Elementos da matriz de rotação M;

X_c, Y_c, Z_c - Coordenadas da estação de exposição, no espaço objeto no sistema topográfico;

X, Y, Z - Coordenadas de um ponto P no espaço objeto no sistema topográfico.

As equações de colinearidade 14 e 15 possibilitam o relacionamento matemático de coordenadas fotogramétricas de pontos no espaço imagem com coordenadas de pontos no espaço objeto.

2.5 - Equação Inversa de Colinearidade

A equação inversa de colinearidade baseia-se no mesmo princípio de colinearidade existente entre o ponto objeto, o centro perspectivo e o ponto imagem. Esta equação permite a determinação das coordenadas planimétricas de pontos no sistema estabelecido a partir de coordenadas de pontos no sistema fotogramétrico, conhecendo-se os parâmetros de orientação interna e a coordenada Z do ponto. As expressões a seguir compõem a equação inversa de colinearidade.

$$X^T = X_c + (Z^T - Z_c) \cdot \frac{m_{11} \cdot X_p + m_{21} \cdot Y_p - m_{31} \cdot f}{m_{13} \cdot X_p + m_{23} \cdot Y_p - m_{33} \cdot f} \quad (16)$$

$$Y^T = Y_c + (Z^T - Z_c) \cdot \frac{m_{12} \cdot X_p + m_{22} \cdot Y_p - m_{32} \cdot f}{m_{13} \cdot X_p + m_{23} \cdot Y_p - m_{33} \cdot f} \quad (17)$$

Onde:

X_p, Y_p - Fotocoordenadas de um ponto p no espaço imagem (sistema fotogramétrico);

f - Distância focal calibrada;

m_{ij} - Elementos da matriz de rotação M ;

X_c, Y_c, Z_c - Coordenadas do centro perspectivo da câmara, no sistema topográfico;

X^T, Y^T, Z^T - Coordenadas de um ponto P no espaço objeto no sistema topográfico.

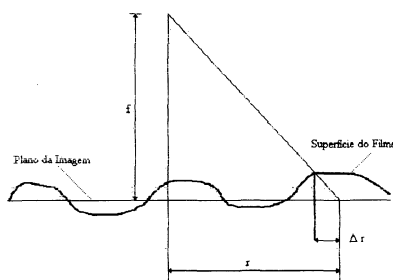
2.6 - Erros Sistemáticos da Imagem Fotográfica

Para a utilização da equação da colinearidade é necessário que o ponto objeto, o centro perspectivo e o ponto imagem sejam colineares, o que não acontece na prática devido aos erros sistemáticos da imagem. Portanto, estes erros devem ser corrigidos, adequando assim as condições exigidas pelo modelo matemático da colinearidade.

2.6.1 - Deformações e Ondulações do Filme

Uma das concepções básicas da condição de colinearidade é que todos os pontos imagem pertençam a um plano normal ao eixo óptico principal. Entretanto, as superfícies fotográficas não são planas e a consequência é que o ponto se desloca radialmente de sua posição verdadeira (Figura 10).

Figura 10 - Deslocamento radial da posição da imagem de um ponto devido à ondulação do filme



MARSHAL (1989) e KENNEFICK (1971) recomendam que uma forma para reduzir os efeitos dos erros provocados pela rugosidade, variação de espessura e pequenas ondulações do filme é a utilização de câmaras com distância focal maior. A correção necessária para estes tipos de erros é inversamente proporcional a distância focal (Figura 11). Observa-se que a distância focal f_1 (maior que f_2) compensa melhor os erros devido às ondulações do filme ($\Delta r_1 < \Delta r_2$). As correções as coordenadas x e y, caso conhecido o Δh , seriam dadas pelas fórmulas:

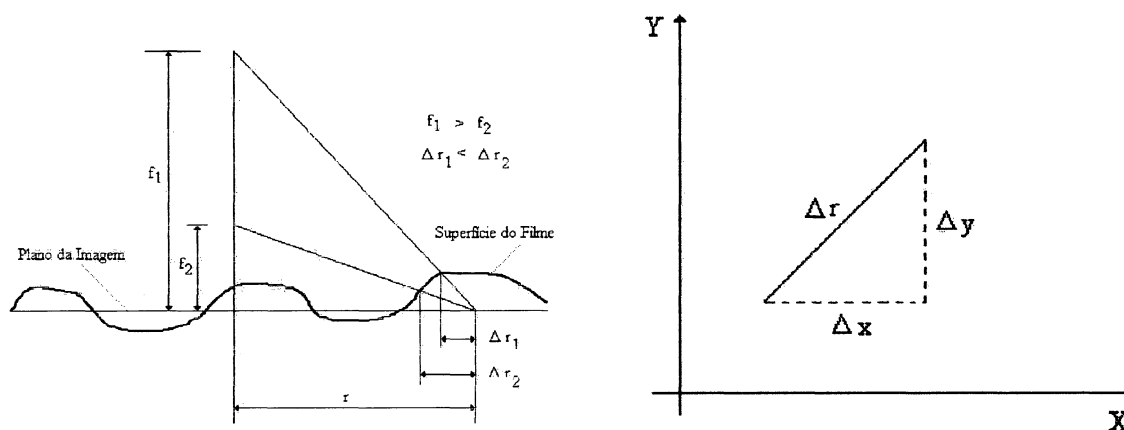
$$\Delta x = \frac{x}{f} \cdot \Delta h \quad (18)$$

$$\Delta y = \frac{y}{f} \cdot \Delta h \quad (19)$$

Onde:

Δh - Altura da ondulação.

Figura 11 - Relação entre distância focal e erro devido a ondulação do filme



Outra maneira de minimizar as deformações e ondulações do filme é a escolha da base fotográfica, porém nem sempre esta escolha é livre porque depende do tipo da câmara disponível e muitos modelos só trabalham com filme. As bases fotográficas podem ser de vidro

ou filme de acetato ou poliéster.

As bases fotográficas de placa de vidro são as mais planas com micro ondulações cuja altura varia de 3 a 5 μm (BROWN, 1971). Estas placas de vidro são caras, difíceis de serem manuseadas e obtidas, porém são as mais recomendadas para levantamentos de alta precisão.

Segundo KURE (1971), as bases fotográficas de acetato, além da rugosidade própria, têm sua superfície deformada por várias causas (variação de umidade, temperatura e tração, processamento da revelação, armazenamento e copiagem). Esta deformação chega a 0,05% em extensão.

O recurso mais empregado para planificar um filme é a criação de um vácuo atrás do filme. Segundo FRASER (1982) as ondulações e deformações podem se constituir na principal fonte de erros sistemáticos, principalmente nas câmaras que não possuem um sistema de planificação do filme. KENNEFICK (1971) e KÖLBI (1976), verificaram que a precisão de medição das fotocoordenadas é da ordem de 12 μm em filme de rolo e de 3 μm em placa de vidro. MEIER (1972) verificou que em câmaras aéreas com vácuo, os micro bulbos desviam-se do plano em 6 μm .

Para eliminar os erros causados pelas deformações e ondulações do filme, nas câmaras métricas, existem as marcas fiduciais e nas câmaras semi-métricas, o *reseau*. Geralmente a correção dessas deformações é realizada junto com a transformação de coordenadas do sistema instrumental para o fiducial. ABEL-AZIZ & KARARA (1974), utilizaram oito modelos de polinômios para mensurar a distorção de um filme em uma câmara com *reseau*. A partir desses modelos, concluíram que a transformação afim no plano deixa resíduos de 3 μm . O que denota que esta transformação corrige adequadamente as deformações sofridas pelo filme dentro e fora da câmara.

2.6.2 - Deslocamento do ponto principal

Em fotogrametria analítica as equações utilizam coordenadas no sistema fotogramétrico. As coordenadas dos pontos são obtidas no sistema instrumental e transformadas para o sistema fiducial, fazendo-se necessário a transformação do sistema fiducial para o sistema fotogramétrico. Para realizar essa transformação é necessário duas translações, de acordo com as equações 01 e 02.

2.6.3 - Distorções das lentes

São consideradas como distorções causadas pelo sistema de lentes todas as perturbações sofridas pelos raios de luz ao atravessar o sistema de lentes que compõe a objetiva, podendo prejudicar a qualidade ou provocar deslocamentos na imagem. Seidel, *apud* em GALO (1993), estudou estas imperfeições da imagem e as definiu como sendo as cinco aberrações monocromáticas (aberração esférica, coma, astigmatismo, curvatura de campo e distorção). As quatro primeiras alteram a qualidade da imagem, ao passo que a última provoca deslocamentos geométricos na imagem. As distorções das lentes são radial simétrica e descentrada.

2.6.3.1 - Distorção Radial Simétrica

A distorção radial das lentes causa um deslocamento radial simétrico da imagem de sua posição ideal. Esta distorção esta em função da distância do centro óptico ao plano da fotografia e da distância do centro de projeção ao objeto fotografado.

O polinômio utilizado para corrigir a distorção radial simétrica no plano da imagem, foi apresentado por Conrady em 1919, sendo que geralmente somente os três primeiros termos são significativos (BROWN, 1971).

$$X' = \left(1 - \frac{\delta r}{r}\right) X \quad (20)$$

$$Y' = \left(1 - \frac{\delta r}{r}\right) Y \quad (21)$$

$$\delta r = \kappa_1 \cdot r^3 + \kappa_2 \cdot r^5 + \kappa_3 \cdot r^7 + \kappa_4 \cdot r^9 + \dots \quad (22)$$

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (23)$$

X' e Y' - Coordenadas no sistema fotogramétrico corrigidas da distorção radial simétrica;

X e Y - Coordenadas no sistema fotogramétrico;

$\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4$ - Coeficientes da distorção radial simétrica, obtidos pela calibração da câmara.

2.6.3.2 - Distorção Descentrada

Durante o processo de montagem, os elementos que compõe o sistema de lentes de uma objetiva podem ter um pequeno deslocamento ou inclinação impedindo assim o perfeito alinhamento dos eixos ópticos das lentes do sistema, originando a distorção descentrada, que possui duas componentes: uma radial e outra tangencial. Para a correção da distorção descentrada, utiliza-se o modelo apresentado por Conrady em 1919 e modificado por BROWN (1966), dado por:

$$X'' = X' - \delta X_d \quad (24)$$

$$Y'' = Y' - \delta Y_d \quad (25)$$

$$\delta X_d = \left(1 + P_3 r^2 + P_4 r^4 + \dots\right) \left(P_1 (r'^2 + 2X'^2) + 2P_2 X' Y'\right) \quad (26)$$

$$\delta Y_d = \left(1 + P_3 r^2 + P_4 r^4 + \dots\right) \left(P_2 (r'^2 + 2Y'^2) + 2P_1 X' Y'\right) \quad (27)$$

$$r' = \sqrt{X'^2 + Y'^2}$$

X'' e Y'' - Coordenadas no sistema fotogramétrico corrigidas da distorção descentrada;

X' e Y' - Coordenadas no sistema fotogramétrico corrigidas da distorção radial simétrica;

P_1, P_2, P_3 e P_4 - Parâmetros matemáticos que descrevem a distorção descentrada, obtidos pela calibração da câmara.

Os parâmetros P_3 e P_4 das equações 26 e 27 normalmente não são significativos.

As equações 26 e 27 são válidas somente para a distância focal no infinito. Para distância focal finita veja FRYER & BROWN (1986).

2.6.4 - Correção da Refração Fotogramétrica

Um raio de luz ao percorrer a distância entre um objeto situado na superfície terrestre e o centro óptico da câmara, situado em um avião, atravessa uma série de camadas atmosféricas. Devido ao balanço da radiação solar e da quantidade de material sólido em suspensão, cada camada possui temperatura, umidade relativa do ar e pressão diferentes da camada inferior, alterando assim a sua densidade. O raio de luz ao atravessar meios com diferentes densidades, sofre variação na sua velocidade de propagação e por consequência um desvio de sua direção em relação à normal (exceto para o raio de luz que incide perpendicular à superfície).

A refração fotogramétrica provoca um deslocamento radial da imagem a partir do ponto principal em fotografias aéreas aproximadamente verticais, conforme Figura 12. Este deslocamento é dado por:

$$\delta r^2 = \delta x^2 + \delta y^2 \quad (28)$$

$$X = x' - \delta x \quad (29)$$

$$Y = y' - \delta y \quad (30)$$

$$\delta x = x' \cdot \varepsilon_{45} \cdot \left(\frac{r^2}{f^2} + 1 \right) \quad (31)$$

$$\delta y = y' \cdot \epsilon_{45} \cdot \left(\frac{r^2}{f^2} + 1 \right) \quad (32)$$

Onde:

$$r = \sqrt{x'^2 + y'^2}$$

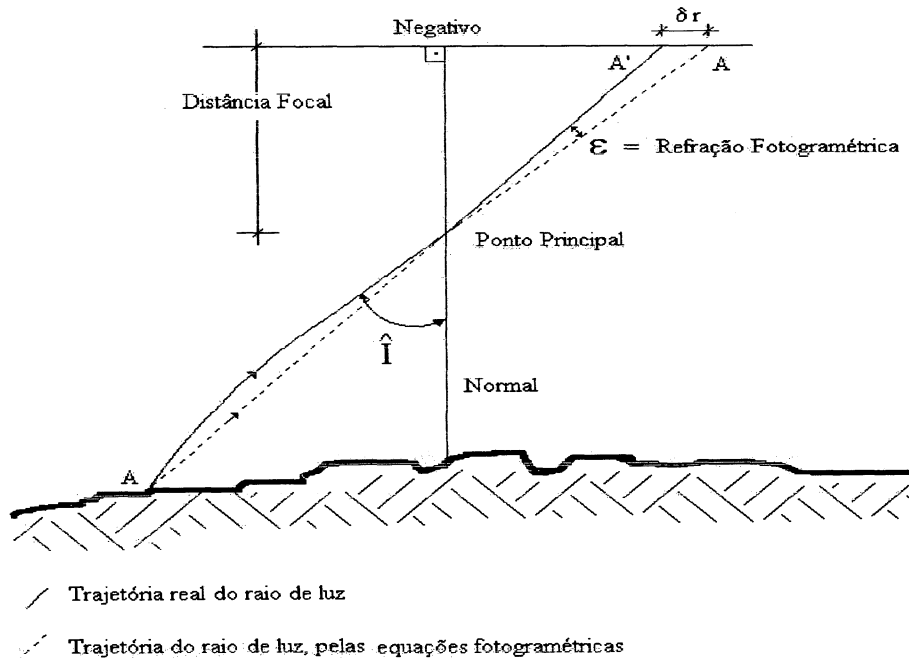
δr - Deslocamento radial de um ponto na imagem provocado pela refração fotogramétrica;

X e Y - Coordenadas no sistema fotogramétrico corrigidas da refração fotogramétrica;

x' e y' - Coordenadas no sistema fotogramétrico corrigidas da distorção descentrada;

ϵ_{45} - Parâmetro de refração fotogramétrica média para um ângulo de incidência de 45° .

Figura 12 - Desvio do raio de luz provocado pela refração atmosférica



A equação que fornece o valor aproximado da refração fotogramétrica para uma atmosfera padrão norte americana, para um ângulo de incidência de 45° é dada por:

$$\epsilon_{45} = 13 \cdot (Z_c - Z_p) \cdot [1 - 0,02 \cdot (2 \cdot Z_c + Z_p)] \cdot 10^{-6} \quad (33)$$

Onde:

Z_c - Altitude de vôo em Km;

Z_p - Altitude média do terreno em Km;

Segundo ANDRADE (1977), a utilização do parâmetro de refração para a atmosfera padrão pode causar, em muitos casos, a ineficiência do modelo matemático, pois não leva em consideração as condições atmosféricas existente no local da tomada das fotografias aéreas, bem como os efeitos refrativos causados pelo deslocamento da aeronave.

De um modo geral, os erros de refração fotogramétrica são desprezados no Brasil (MITISHITA, 1997).

2.7 - Fototriangulação ou Aerotriangulação

Fototriangulação é o método fotogramétrico de determinação de coordenadas de pontos do espaço objeto através de (LUGNANI, 1987):

- a - Relação geométrica de fotos adjacentes devidamente tomadas;
- b - Esparsos controle de campo dado;
- c - Um conjunto de valores aproximados de parâmetros.

A fototriangulação que fornece coordenadas planimétricas (X,Y) é denominada de fototriangulação radial ou plana, e a que fornece coordenadas plani-altimétricas (X,Y,Z) é denominada de fototriangulação espacial ou estereotriangulação.

O método de ajustamento usado para realizar uma aerotriangulação pode ser sequencial ou simultâneo, e a unidade fotogramétrica utilizada no ajustamento pode ser por feixes de raios ou modelos independentes.

- a - Por feixes de raios: neste caso, uma fotografia é considerada como um feixe de raios, onde cada raio satisfaz a condição de colinearidade. Recebe como dados de entrada as coordenadas dos pontos imagem;

As dimensões dos sinais estão em função da escala de tomada da fotografia. A Tabela 02 mostra as dimensões para cada uma das formas apresentadas na Figura 14.

Tabela 2 - Dimensões das formas utilizadas para a marcação dos pontos de apoio

Escala foto	Dimensões das formas no terreno (m)					Dimensões das formas no negativo (μm)				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1/10.000	0,5	0,3	1,3	0,2	0,9	50,0	30,0	130,0	20,0	90,0
1/20.000	1,1	0,7	2,6	0,4	1,8	55,0	35,0	130,0	20,0	90,0
1/30.000	1,6	1,0	3,9	0,5	2,7	48,5	30,0	118,0	15,0	81,0
1/40.000	2,2	1,3	5,2	0,7	3,6	55,0	32,5	130,0	17,5	90,0

Adaptado de Ministério do Exército (1984).

Os alvos de pré-sinalização podem ser pintados diretamente sobre o terreno ou podem ser painéis confeccionados de tecido, madeira ou borracha.

2.7.2 - Escolha dos Pontos Fotogramétricos

Segundo o Ministério do Exército (1984), a escolha de pontos para a aerotriangulação deve seguir os seguintes critérios:

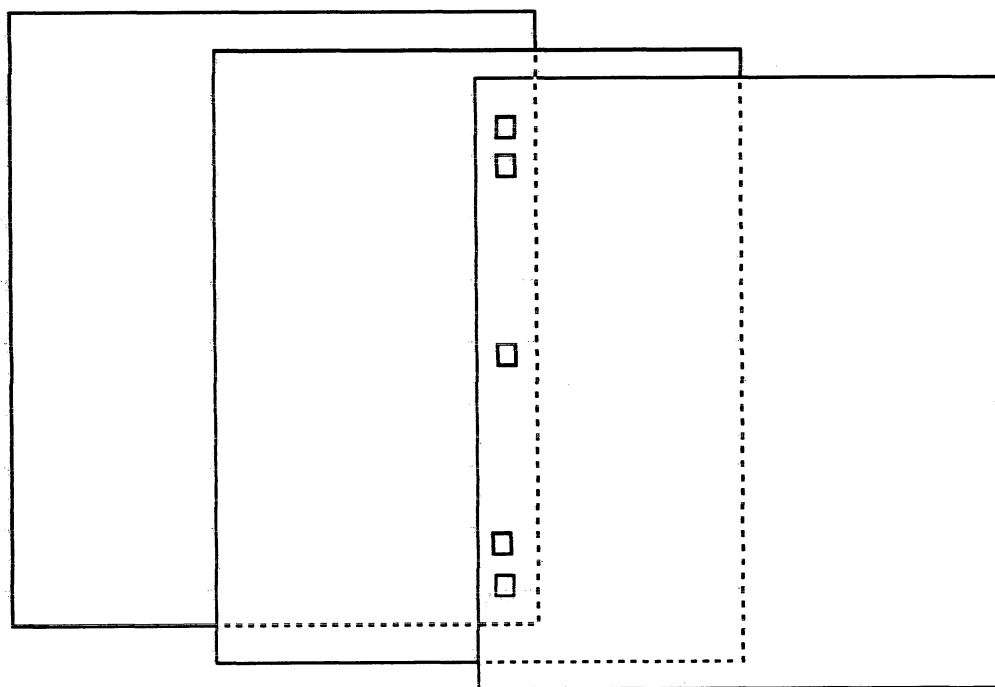
- 1- Não estar em encostas;
- 2- Ficar distanciado das bordas da fotografia;
- 3- Evitar pontos em árvores e;
- 4- Não estar em zonas muito claras ou escuras da fotografia, por dificultar a determinação da altura;

- 5- Evitar ponto próximo a espelho d'água ou superfície com grande poder de reflexão, pois causam reflexo na fotografia podendo prejudicar a visualização do ponto;
- 6- Apresentar um bom contraste e estar bem definido em pelo menos duas fotografias.

Os pontos escolhidos para realizar a ligação entre modelos devem situar-se na área de superposição entre eles, geralmente 10%. Escolhe-se no mínimo 3 pontos não alinhados, porém, na prática, utiliza-se 5 pontos distribuídos conforme a Figura 15.

Os pontos de ligação entre as faixas devem ser escolhidos em locais com boa nitidez em ambas as faixas e sempre que possível nas proximidades da linha do centro das fotos, podendo desse modo ser aproveitado como ponto de ligação entre modelos.

Figura 15 - Distribuição dos pontos fotogramétricos na fotografia para a aerotriangulação



□ Pontos escolhidos para a aerotriangulação

2.7.3 - Fototriangulação analítica

A medida das coordenadas dos pontos na fotografia pode ser realizada por monocomparação ou estereocomparação. Em observações monoscópicas executa-se a medição das coordenadas dos pontos em uma fotografia por vez. Para as observações estereoscópicas executa-se a medição das coordenadas dos pontos homólogos de pares fotogramétricos, simultaneamente.

A aerotriangulação pode ser realizada com dois procedimentos distintos:

- a - Pré-refinamento da imagem - neste caso, corrige-se as coordenadas dos pontos dos erros sistemáticos da imagem, presumindo-se que o ponto objeto, o centro perspectivo e o ponto imagem estejam na mesma reta, podendo utilizar as equações de colinearidade.
- b - Parametrização das distorções sistemáticas - neste caso, adiciona-se parâmetros que modelem as distorções e deformações da imagem às equações de colinearidade, fazendo com que o modelo se adapte à realidade física.

2.7.3.1 - Resseção Espacial ou Orientação Exterior

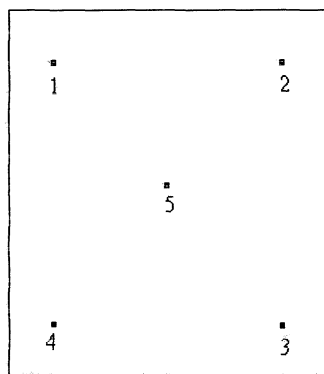
A resseção espacial consiste em determinar a posição e ângulos de rotação da câmara (X_o, Y_o, Z_o e ω, ϕ, κ) no momento de tomada da fotografia.

Para realizar a resseção espacial trabalha-se com as equações de colinearidade em sua forma direta, cujo modelo matemático relaciona o espaço imagem com o espaço objeto, usando como dados de entrada as coordenadas de pontos no espaço imagem e suas coordenadas correspondentes no espaço objeto. Cada ponto observado nos dois espaços dá origem a duas equações, portanto, 3 pontos fornecem solução única. Porém, a superabundância de observações faz-se necessária para assegurar uma correta determinação da

resseção espacial, permitindo a detecção de erros grosseiros e análise das precisões dos parâmetros obtidos.

Esta super abundância de observações geralmente é obtida com a observação de 5 pontos distribuídos na fotografia, conforme a Figura 16. O modelo matemático empregado é o paramétrico com injunções posicionais de peso, tal modelo pode ser encontrado em GEMAEL (1994) e MITISHITA (1986).

Figura 16 - Distribuição de pontos em uma fotografia aérea para a realização da resseção espacial



2.7.3.2 - Formação Analítica do Modelo

A formação analítica do modelo fotogramétrico consiste em determinar a orientação exterior e interior de duas fotos no espaço, envolvendo 12 parâmetros, sendo 7 parâmetros relativos a orientação absoluta e 5 relativos a orientação relativa. Optando-se por orientar relativamente um estereopar, fixa-se todos os movimentos de uma câmara e movimenta-se livremente a outra câmara. Ao fixar a fotografia da esquerda, ou seja, os parâmetros $(\kappa_1, \phi_1, \omega_1, X_0^1, Y_0^1, Z_0^1)$ e arbitrar um fator de escala ao modelo, automaticamente, fixa-se a base estereoscópica, X_0^2 . Assim, os parâmetros $(\kappa_2, \phi_2, \omega_2, Y_0^2, Z_0^2)$ da fotografia da direita serão calculados (LUGNANI, 1987).

Aplicando a equação da colinearidade para um ponto observado nas duas fotografias, obtém-se quatro equações. Como os parâmetros $\kappa_1, \phi_1, \omega_1, X_0^1, Y_0^1, Z_0^1$ da fotografia da esquerda estão fixos, a equação da colinearidade assume a seguinte forma:

$$x_i = Fx(X_i, Y_i, Z_i) \quad (36)$$

$$y_i = Fy(X_i, Y_i, Z_i) \quad (37)$$

Para a fotografia da direita:

$$x_i = Fx(\kappa_2, \phi_2, \omega_2, Y_0^2, Z_0^2, X_i, Y_i, Z_i) \quad (38)$$

$$y_i = Fy(\kappa_2, \phi_2, \omega_2, Y_0^2, Z_0^2, X_i, Y_i, Z_i) \quad (39)$$

Onde:

x_i, y_i - Coordenadas do i ésimo ponto no espaço imagem (sistema fotogramétrico);

X_i, Y_i, Z_i - Coordenadas do i ésimo ponto no espaço objeto no referencial estabelecido;

X_0^1, Y_0^1, Z_0^1 - Coordenadas do centro perspectivo da fotografia da esquerda;

X_0^2, Y_0^2, Z_0^2 - Coordenadas do centro perspectivo da fotografia da direita.

O modelo de ajustamento utilizado é o paramétrico, pois os valores observados ajustados podem ser expressos como uma função dos parâmetros ajustados.

2.8 - Modelo Digital do Terreno (MDT)

O primeiro trabalho utilizando a representação de um Modelo Digital do Terreno (MDT) em computador foi realizado por MILLER (1958) no Massachusetts Institute of Technology (MIT), com o objetivo de automatizar algumas fases do projeto de rodovias.

Segundo BURROUGH (1989), um MDT possui as seguintes finalidades:

- a - Armazenar dados altimétricos;
- b - Calcular os cortes e aterros em projetos rodoviários e em outros projetos de engenharia

- civil e militar;
- c - Visualização tridimensional da superfície topográfica;
- d - Análise da visibilidade no campo;
- e - Planejamento de rotas rodoviárias, localização de represas etc;
- f - Análise estatística e comparações de diferentes tipos de terrenos;
- g - Obtenção de perfis, mapas de relevo, mapas de declividade etc;
- h - Combinação de dados de relevo com dados temáticos como uso do solo, vegetação, solos etc;
- i - Modelos de simulação para processos ambientais;

A qualidade, quantidade e distribuição dos dados amostrados para a representação do terreno é essencial, tendo relação e consequência direta na qualidade do produto final. Uma amostragem imperfeita não pode ser compensada pela implementação do mais sofisticado interpolador. A aquisição de dados é usualmente a fase que consome mais tempo e a de maior custo em relação ao processo total de geração do MDT.

A distribuição espacial dos pontos a serem amostrados durante o processo de aquisição não pode ser conduzido de forma casual. A escolha dos pontos deve ser realizada de maneira que o conteúdo informativo dos mesmos represente o comportamento estrutural da superfície topográfica. Estes pontos podem ser obtidos a partir de:

- 1 - Levantamentos topográficos e geodésicos;
- 2 - Fotogrametria;
- 3 - Digitalização vetorial de curvas de nível de mapas analógicos;
- 4 - Geração de pontos com coordenadas tridimensionais, a partir de curvas de nível em formato digital.

2.8.1 - Métodos de Coleta dos Dados

Os métodos de coleta dos dados, referem-se aos padrões de distribuição dos pontos amostrados podem ser divididos em malha regular, malha irregular, pontos aleatórios, perfilamento e curvas de nível.

2.8.1.1 - Malha Regular

A aquisição dos dados altimétricos processa-se de forma ordenada, estando os pontos coletados nos nodos de uma malha com espaçamento entre linhas e colunas previamente determinados (geralmente quadrado, podendo ser retangular ou triangular). Sua desvantagem resulta na possibilidade de haver excesso de dados em determinadas regiões, escassez em outras e a não coincidência dos nodos da malha com as descontinuidades naturais ou artificiais do terreno. Tal fato impede a reprodução fiel da superfície a partir da malha interpolada.

2.8.1.2 - Malha Irregular

Malha irregular ou amostragem progressiva, foi o método proposto por MAKAROVIC (1973). A amostragem é feita em uma malha regular mais espaçada que vai sendo densificada pela subdivisão da célula primária em função do tipo de relevo existente na região amostrada. Quando mais acidentado for o relevo, maior será o número de subdivisões da célula primária. A amostragem progressiva diminui o volume de dados coletados sem perda significativa na qualidade do MDT.

2.81..3 - Pontos Aleatórios

Os pontos são tomados na descontinuidade do relevo, existente na superfície amostrada. Observa-se pontos ao longo de acidentes naturais e artificiais (rios, declives,

taludes, estradas, represas etc.).

2.8.1.4 - Perfilamento

Os dados são coletados ao longo de perfis. O registro dos pontos pode ser feita por tempo, por distância ou por controle do operador. Fixa-se a coordenada Y e coleta-se o par (X,Z) ou fixa-se X e coleta-se o par (Y,Z) para cada perfil. Existe a possibilidade de se perder dados de descontinuidade se o mesmo for paralelo as direções de perfilamento.

2.8.1.5 - Curvas de nível

A amostragem de um relevo pode ser realizada utilizando-se curvas de nível. Se as curvas de nível aparecem em cartas impressas utiliza-se de mesa digitalizadora ou *scanner*, armazenando o par ordenado (X,Y), pois o valor da altitude (Z) é constante para cada curva. Em regiões acidentadas a coleta de dados é mais abundante que nas planas. Se as curvas de nível estão em meio digital, basta importar o arquivo.

2.8.2 - Geração e Interpolação de um MDT

Segundo WEIBEL & HELLER (1991), na modelagem digital de terreno a interpolação tem o objetivo de estimar cotas em regiões onde não existem dados. A interpolação é utilizada para:

- 1 - Cálculo de altitudes (z) para localizações pontuais;
- 2 - Cálculo de altitudes (z) para uma malha particular a partir dos pontos amostrados originariamente;
- 3 - Cálculo de localização de coordenadas (x,y) de pontos ao longo de curvas de nível;
- 4 - Reamostragem de malhas regulares.

A qualidade do MDT é resultante da escolha do método de interpolação e do processo de amostragem dos pontos, não podendo afirmar que um determinado algoritmo de interpolação seja superior a outro ou que seja apropriado a todas as aplicações (WEIBEL & HELLER, 1991).

2.9 - Câmaras

Uma câmara fotográfica é uma caixa à prova de luz em que a imagem de um objeto exterior é projetada numa chapa sensibilizada ou filme, através de um orifício, equipado geralmente com uma ou várias lentes e um obturador de abertura variável.

Segundo OLIVAS (1995), câmaras digitais são sistemas fotográficos semelhantes à uma câmara fotográfica convencional, com sistema de lentes para a focalização da imagem e diafragma para controle da intensidade luminosa. Porém, não são dependentes de superfície foto-sensora *one-way*, ou seja, que necessita ser substituída à cada nova imagem obtida. Ao invés de filme, no plano focal, são utilizados arranjos de elementos foto-deteciores. Os sensores são dispostos de forma matricial (bi-dimensional), sendo a imagem de um objeto obtida instantaneamente.

Segundo OLIVEIRA (1987), uma câmara fotogramétrica, de levantamento ou métrica, é uma câmara aérea ou terrestre destinada especificamente à produção de fotografias para fins cartográficos. Esta câmara é equipada com mecanismos que assegurem e indiquem a orientação interna das fotografias com a necessária precisão para a finalidade implícita.

Segundo MIKHAIL (1985), as câmaras métricas são construídas com foco fixo, dando estabilidade à distância focal e marcas fiduciais, permitindo a recuperação dos elementos de orientação interna (distância focal e as coordenadas do ponto principal). Contém uma placa de vácuo para manter a planura do filme na hora da exposição. O sistema de lentes é construído

de modo a se ter pequena refração dos raios luminosos e alto poder de resolução; magazine de grande capacidade, o que permite uma linha de vôo maior, sem a necessidade da troca do filme; obturador de alta velocidade e bom rendimento. Sua disponibilidade comercial é limitada, devido ao elevado custo e aplicação específica.

ABDEL-AZIZ & KARARA (1974), denominam de câmara simples (não métrica) toda e qualquer câmara não projetada para propósitos de fotogrametria. De acordo com o tamanho do quadro do negativo as câmaras simples podem ser classificadas em 35 e 70 mm.

Câmaras fotográficas de 35 mm são aquelas que resultam um negativo de dimensões 24 x 36 mm. Possuem distância focal que varia de 28 a 300 mm com capacidade de utilização de filmes de 12, 24 ou 36 exposições, podendo ser expandidos até 250 exposições, se acopladas a um acessório especial (DISPERATI, 1991).

Câmaras fotográficas de 70 mm são aquelas que resultam um negativo de dimensões 60 x 60 mm ou 60 x 45 mm. Entre as diversas câmaras de 70 mm, algumas possibilitam o uso de chassis intercabeáveis, sendo que o chassis determina o tamanho do filme e do quadro do negativo. Normalmente, utilizam filmes de 12 ou 24 exposições, podendo ser expandido até 70 exposições. As câmaras de 70 mm possuem distância focal que varia de 40 a 80 mm e podem ser dotadas de uma placa de vidro contendo um reticulado, denominado *reseau*, que está instalada entre o plano focal e o negativo. Esta placa possui espaçamento de 5 x 5 mm ou 10 x 10 mm, resultando em matriz de 121 ou 25 marcas, de acordo com o fabricante. As marcas do *reseau* aparecem na imagem fotografada e geralmente são representadas por um sinal “+”. As câmaras dotadas de *reseau* são ditas semi-métricas (DISPERATI, 1991).

Uma câmara não métrica geralmente possui um sistema de lentes de boa qualidade, o que permite a obtenção de imagens com ótima nitidez, porém por apresentar distância focal

variável e não possuir marcas fiduciais, tornar-se difícil a recuperação dos elementos de orientação interna. Estes elementos podem ser obtidos com uma calibração. Possuem uma grande disponibilidade comercial, com vários tamanhos e utilizam diferentes tipos de filmes e lentes.

2.10 - Calibração de Câmaras

Calibrar significa obter as características individuais de um instrumento. A calibração é o procedimento realizado para determinação de um conjunto de parâmetros inerentes à câmara, os quais permitem a reconstituição do feixe perspectivo que deu origem a imagem (GALO, 1993).

Os métodos de calibração de câmaras podem ser divididos em métodos de laboratório e de campo. Os métodos de laboratório são utilizados geralmente pelos fabricantes de câmaras fotogramétricas e fornecem informações inerentes ao corpo da câmara e magazine. A calibração é realizada utilizando goniômetro, fotogoniômetro ou calibrador multi-colimador.

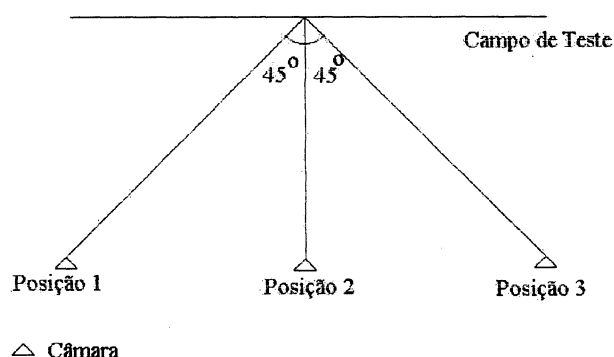
Nos métodos de campo, as fotografias para a calibração são obtidas em condições que se assemelham as de trabalho, por este motivo, são considerados melhores que os métodos de laboratório (OLIVAS, 1980).

Dentre os vários métodos de campo será descrito o método das câmaras convergentes, que foi utilizado neste trabalho. Este método foi desenvolvido por Duane C. Brown na calibração da câmara terrestre Hasselblad -500 utilizada na missão Apolo 14. Este método consiste na tomada de fotografias com alta convergência entre si, e pelo menos, uma rotação ortogonal da câmara, pois somente a convergência não é suficiente para quebrar a correlação existente entre as coordenadas da estação de exposição e os parâmetros de orientação interior da câmara. Na prática, este método tem mostrado que a convergência entre as câmaras deve

ser levada ao extremo, isto implica em raios formando entre si aproximadamente um ângulo de 90° , conforme Figura 17 (OLIVAS, 1980).

Existem duas possibilidades para executar a calibração por este método: fixa-se a posição e os ângulos de rotação de uma estação de exposição deixando que os demais feixes de raios se ajustem a este feixe fixo; ou fixa-se as coordenadas dos pontos de apoios de campo, fornecendo como parâmetros, a posição aproximada e os ângulos de rotação da câmara em cada estação de exposição, determinando os parâmetros de orientação interior e exterior da câmara.

Figura 17 - Posição da câmara para a tomada das fotografias



2.11 - Restituição fotogramétrica

Endente-se por restituição fotogramétrica a elaboração de um mapa, ou parte dele, a partir de fotografias aéreas ou terrestres e de dados de campo (OLIVEIRA, 1987).

As fotografias aéreas fornecem informações com detalhes suficiente para atender a maioria das atividades de mapeamento e sua escala pode ser definida pelo usuário, conforme a aplicação. Quando as medidas são realizadas diretamente sobre a fotografia ocorrem distorções, pois a fotografia possui projeção central; o terreno fotografado não é plano e a aeronave que conduz a câmara não realiza um voo retilíneo e nivelado, inserindo assim uma

série de distorções nas fotografias.

A restituição fotogramétrica pode ser realizada por estereorestituição ou monorestituição.

2.11.1 - Estereorestituição

A estereorestituição é realizada com estereorestituidores que utilizam pares estereoscópicos, proporcionando ao operador uma imagem tri-dimensional. Conhecendo-se a posição e os ângulos de rotação da câmara no exato momento da exposição, pode-se determinar a posição verdadeira de um ponto sobre o terreno pela interseção dos raios homólogos de um mesmo ponto contido em um par estereoscópico.

2.11.2 - Monorestituição

A monorestituição utiliza somente uma fotografia. Sua fundamentação matemática foi apresentada por MAKAROVIC (1973). A determinação das coordenadas planimétricas de um ponto é realizada por um processo iterativo que utiliza a equação inversa de colinearidade e o modelo digital do terreno, conforme Figura 18.

O processo iterativo segue as seguintes etapas:

1ª Etapa

Usando a resseção espacial, calcula-se a posição e os ângulos de rotação da câmara.

2ª Etapa

Com as coordenadas fotogramétricas do ponto digitalizado e usando a equação inversa da colinearidade, determina-se as coordenadas planimétricas aproximadas do ponto no referencial do objeto adotado, pois assume-se que a coordenada altimétrica inicial deste ponto seja igual a zero.

3ª Etapa

Com as coordenadas planimétrica aproximadas do ponto determina-se a sua cota (por interpolação) no modelo digital do terreno.

4ª Etapa

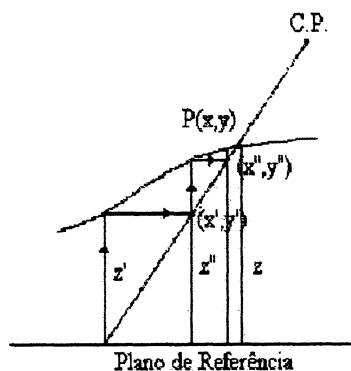
Usando a equação inversa da colinearidade e a cota do ponto determinada na 3ª etapa, calcula-se novas coordenadas planimétricas do ponto no referencial adotado.

5ª Etapa

As coordenadas planimétricas determinadas na 4ª etapa são mais precisas que as determinadas na 2ª etapa, então estas novas coordenadas planimétricas são usadas para o cálculo de nova coordenada altimétrica, mais precisa, por interpolação no MDT. Com esta nova informação altimétrica, determina-se outra coordenada planimétrica com a equação de colinearidade inversa, que são mais precisas que as determinadas anteriormente.

A 3ª etapa, onde se determina a coordenada altimétrica do ponto no MDT e a 4ª etapa, onde se usa a equação inversa de colinearidade para cálculo das coordenadas planimétricas do ponto, são repetidas até que a diferença entre as coordenadas planimétricas calculadas entre duas iterações consecutivas seja compatível com a precisão adotada.

Figura 18 - Iteração para a determinação das coordenadas de um ponto com a monorestituição



2.12 - Aplicações de Fotografia de Pequeno Formato

Em muitos trabalhos e pesquisas verifica-se o sucesso do uso de fotografias aéreas de pequeno formato com eficiência e precisão dentro do objetivo proposto. A seguir serão apresentados alguns exemplos.

FRAMER & ROBE (1977) determinaram o volume de iceberg com fotografias aéreas de pequeno formato, tiradas com uma câmara Hasselblad de 70 mm e distância focal de 100 mm. A planimetria foi realizada com fotografias verticais, sendo o fator de escala determinado pelas dimensões de um navio ao lado do iceberg. A altimetria foi obtida com fotografias terrestres, sendo o fator de escala dado pelas dimensões de um helicóptero. Com os dados planimétricos e altimétricos calculou-se o volume visível do *iceberg*, sendo o volume submerso estimado pela densidade da massa de gelo flutuante.

Segundo MORGAN *et al.* (1979), fotografias de pequeno formato podem ser úteis no controle da erosão do solo através da observação de dois dos fatores que compõe a equação universal de perda do solo, uso atual e presença de práticas conservacionistas; MORGAN *et al.* (1980), detectaram a erosão do solo pela observação visual das áreas plantadas e seus arredores, áreas de pastagens, condições físicas das práticas conservacionistas e a coloração das águas dos riachos em fotografias aéreas de pequeno formato coloridas e infravermelho;

POLLÉ (1984), estimou a população de Teerã - Irã e Colombo - Sri Lanka usando fotografias aéreas de pequeno formato inclinadas. Para tanto, dividiu a cidade em zonas residenciais homogêneas. Utilizou várias amostras para cada uma das diferentes zonas, contando a população e calculando a sua densidade (pessoas/ha) e a taxa de ocupação das residências (pessoas/casa), estimando assim a população para cada zona e conseqüentemente para a cidade;

HALL & WASSH (1977), verificaram a aplicação de fotografia aérea de pequeno formato no reconhecimento rápido de feições geológicas.

Outra grande utilidade das fotografias aéreas de pequeno formato, é a contagem e identificação de espécies vegetais em florestas naturais (PAINE & MCCADDEN, 1988; ALDRISH *et al.*, 1959; TUELER *et al.*, 1988; MCCARTHY *et al.*, 1982); GOBA & SENESE (1992) mostraram a utilidade dessas fotografias na identificação de espécies e classificação da vegetação aquática.

Pesquisas que englobam a estimativa do tamanho e espessura do fuste de *pinus* foram realizadas por SAYN-WITTGENSTEIN & ALDRED (1972), HAGAN & SMITH (1986) medindo-se a área e tamanho de sua copa do *pinus* em fotografias aérea de pequeno formato.

A avaliação da extensão e danos causados por incêndios florestais (TOZZINI *et al.*, 1984), e o monitoramento da população e hábitat de animais silvestres (POOLE, 1989; HIBY *et al.*, 1988) mostram a eficiência das fotografias aéreas de pequeno formato em aplicações florestais.

CHANOND e LEEKBHAI (1986) descrevem um trabalho realizado pela força aérea britânica em 1984/85, na região metropolitana de Bangkok, Tailândia. As fotos foram tomadas a 2.500 m acima do solo usando uma câmara Rolleiflex SLX e objetiva de 50 mm, negativo de 50 x 45 mm, superposição longitudinal de 60% e lateral de 20%, e escala de negativos 1/52.000. Cada fotografia cobriu uma área de 2 km² sendo recoberta uma área de 5.000 km². O bloco foi dividido em 4 regiões e cada linha de vôo com extensão de 30 km devido, a limitação do filme. Com a ampliação dos negativos foi produzido um mapa na escala 1/10.000, com o objetivo de verificar mudanças na situação das moradias

WARNER *et al.* (1996), descreve o trabalho realizado em julho de 1991 pelo

Australian Key Center for Land Information e Studies que usou fotografias aéreas de pequeno formato para cobrir aproximadamente 70 km² da cidade de Caloundra, com o objetivo de analisar o custo da cobertura e produzir um mapa digital da cidade. As fotografias aéreas foram obtidas com uma câmara Rolleiflex 6006 com *reseau* e objetiva de 50 mm, instalada em um avião Seneca, voando a 1.000 m acima do solo, para obter fotografias na escala do negativo 1/20.000. Foram feitas 7 faixas com cobertura longitudinal de 60% e lateral de 20%. Para auxiliar na navegação aérea usou-se um rastreador GPS (Global Positioning System) Pronav-100. A cobertura aérea custou cerca de 30% da convencional.

Os testes de mapeamento digital foram realizados utilizando o *stereoplotter* analítico MPS-2 (Adam Technology) e Planicomp (Zeiss), sendo que ambos atenderam aos objetivos.

WARNER *et al.* (1996), descrevem um projeto fotogramétrico realizado pela ADAM TECHNOLOGY no qual utilizam fotografias aéreas de pequeno formato e comparam o tempo e a precisão para obtenção de medidas tridimensionais em área urbana na cidade de Perth, Austrália. No projeto foi utilizada uma câmara Rolleiflex 6006 com objetiva de 80 mm instalada em um avião Cessna. As fotografias foram tomadas a uma altura de 1400 m acima do solo e a escala do negativo de 1/17.500. Os dados foram tratados no equipamento MPS-2 conectado ao programa MicroStation da Intergraph. Produziu-se um mapa, modelo digital do terreno e a vista da cidade em perspectiva. A precisão fotogramétrica determinada foi de X=0,25 m (RMS); Y=0,27 m (RMS) e Z=0,84 m (RMS).

3.0 - Materiais e Métodos

3.1 - Escolha da Área Teste

A área teste compreende uma região do Setor Sul na cidade de Goiânia - Goiás. É formada por duas quadras com 37 lotes, possuindo aproximadamente 300.000 m² e relevo plano. Está compreendida entre a Marginal Botafogo, Rua 88, Rua 115 e Rua 83. A razão primordial para esta escolha foi o levantamento topográfico cadastral realizado pela Escola Técnica Federal de Goiás - ETFGO em convênio com a Secretária Municipal do Meio Ambiente - SEMMA, em agosto de 1995.

3.2 - Materiais

Para a realização deste trabalho utilizou-se os seguintes equipamentos:

- Uma estação total Topcon CTS 1 de precisão angular de 1" e linear de 2 mm $\pm$ 10 ppm;
- Um coletor de dados Psion L34;
- Programa Topograph;
- Uma câmara fotográfica Rolleiflex SLX com objetiva de 50 mm, com reseau;
- 5 Filmes fotográficos Kodak Verichrome pan 120, ASA (*American Standard Association*) 100;
- Avião monomotor Cherokee 140, com uma abertura no piso de 20x20 cm;
- Tripé fotográfico;
- *Scanner* fotogramétrico da marca Vexcel modelo ZX-3000;
- Micro computador com 1.5 Gbyte de disco rígido e 16 Mbyte de memória;
- Programa FOTTER;

- Programa MicroStation, com o módulo gerenciador de imagens IRAS-C;
- Programa “Monorestituição Digital”.
- Levantamento planialtimétrico cadastral realizado pela ETFGO da área teste.

3.3 - Metodologia

A metodologia que será descrita aqui apresenta os procedimentos utilizados para a confecção de um mapa planimétrico por monorestituição de fotografias aéreas de pequeno formato digitalizadas. A verificação da precisão desse mapa será realizada comparando-se as coordenadas obtidas por monorestituição com as obtidas por topografia, supondo estas isentas de erros. As etapas seguintes compõem a metodologia adotada:

- Calibração da câmara;
- Distribuição e implantação dos pontos pré-sinalizados na área teste;
- Levantamento topográfico plani-altimétrico dos pontos pré-sinalizados;
- Realização da cobertura aérea;
- Aerotriangulação;
- Obtenção das informações altimétricas da região a ser restituída;
- Produção do mapa;
- Comparação das coordenadas obtidas com a topografia e a monorestituição;
- Classificação do mapa.

3.3.1 - Calibração da Câmara

A primeira etapa do trabalho consistiu na calibração da câmara Rolleiflex SLX, ou seja, na determinação dos parâmetros (distorção das lentes, distância focal calibrada e deslocamento do ponto principal), para o sistema de lentes de 50 mm. O desconhecimento desses parâmetros

impossibilita as correções dos erros sistemáticos na imagem.

3.3.1.1 - Método de Calibração

Realizou-se a calibração com o método das câmaras convergentes, sendo as fotografias tomadas de modo que o ângulo de convergência entre elas seja de 90°. Usou-se como campo de calibração uma parede plana com uma série de alvos, situada no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR), no bloco VI.

3.3.1.2 - Conversão Analógica/Digital

A conversão do meio analógico para o digital (forma matricial) das fotografias usadas na calibração foi realizada com o auxílio de um *scanner*, de resolução óptica e geométrica compatíveis com a precisão exigida para a leitura das fotocoordenadas. Com a ampliação da imagem, tornou-se possível a observação de detalhes pontuais com maior clareza, ficando a precisão em função da configuração do vídeo/placa gráfica e tamanho do *pixel*.

3.3.1.3 - Orientação Interior

A orientação interior da fotografia foi realizada escolhendo-se 16 (dezesseis) marcas do *reseau*, observadas no Sistema de Monorestituição Digital, obtendo-se suas coordenadas no referencial instrumental. Com estas coordenadas (em milímetros) e as coordenadas do *reseau*, determinou-se os parâmetros de transformação do sistema instrumental para o fiducial. Utilizou-se para tal, a transformação geral afim no plano e o ajustamento paramétrico, o que permitiu a conversão entre os sistemas de todos os pontos lidos na fotografia.

A análise dos resíduos e da matriz variância/covariância, provenientes do ajustamento, permitiu verificar a qualidade do modelo adotado em parametrizar as diferenças físicas existentes entre os dois referenciais. Também, permitiu verificar se a precisão dos resultados

obtidos estavam dentro do esperado pelo processo.

3.3.1.4 - Processamento

Com as coordenadas dos alvos, criou-se o arquivo de entrada de dados para a realização da calibração, no programa FOTTER. Neste programa fixou-se as coordenadas de campo dos alvos e tomou-se como dados de entrada a posição aproximada e os ângulos de rotação da câmara em cada estação de exposição, obtendo-se como saída os parâmetros de orientação interior e exterior da câmara.

Para verificar a eficácia do ajustamento na calibração aplicou-se o Teste Qui-quadrado (χ^2), ao sigma a priori e a posteriori.

3.3.2- Distribuição e Implantação dos Pontos de Pré-sinalização

A segunda etapa do trabalho consistiu na distribuição e implantação dos pontos pré-sinalizados na área teste.

Um molde de papelão foi utilizado para facilitar a pintura dos alvos no solo. Os alvos foram distribuídos no eixo do cruzamento de duas vias ou próximo ao meio fio, de tal modo que a distância entre dois alvos consecutivos não fosse superior a 50 metros. Os alvos foram distribuídos além da área teste.

O tamanho dos alvos está em função da escala das fotografias, como o indicado na Tabela 2, item 2.7.1.3.

3.3.3- Levantamento Topográfico Plani-altimétrico dos Pontos Pré-sinalizados

A terceira etapa do trabalho compreende o levantamento plani-altimétrico dos pontos

pré-sinalizados por caminhamento com irradiações. Este levantamento foi realizado com uma estação total e coletor de dados. As distâncias foram obtidas pela média aritmética de quatro medidas, sendo duas a ré e duas a vante, para a poligonal e medição dupla para as irradiações. A leitura dos ângulos foi realizada pelo processo direto e inverso, inclusive para as irradiações. Para uma melhor leitura angular, utilizou-se placas de sinalização ao invés de balizas. As coordenadas do levantamento plani-altimétrico foram calculadas no programa Topograph e deixadas no sistema topográfico local. Os erros angular e linear permitidos (E_{ap} e E_{lp} , respectivamente) foram obtidos pelas equações 40 e 41 (Cardão, 1970).

$$E_{ap} = p\sqrt{n} \quad (40)$$

$$E_{lp} = \frac{P}{5000} \quad (41)$$

onde:

p - precisão do aparelho;

n - número vértice da poligonal;

P - Perímetro da poligonal em metros.

3.3.4- Realização da Cobertura Fotográfica Aérea

A quarta etapa consistiu na realização da cobertura fotográfica aérea. O planejamento do voo foi realizado para se obter fotografias na escala de negativo de 1/9000 e recobrimento longitudinal de 70%. O voo foi programado para às 13 horas, quando a sombra projetada pelos objetos apresentava-se menor.

A aeronave foi previamente adaptada com uma abertura no piso, onde posicionou-se a câmara fotográfica

Para controlar a altitude de voo usou-se um altímetro e para o intervalo entre as

fotografias um cronômetro.

3.3.5- Aerotriangulação

A quinta etapa compreendeu a aerotriangulação. Seus principais objetivos foram: verificar a eficiência da aerotriangulação para fotografias aéreas de pequeno formato digitalizadas e testar a necessidade de se ter ou não uma câmara calibrada. Para tal, realizou-se dois processamentos da aerotriangulação. O primeiro processamento, utilizou-se as coordenadas fotogramétricas dos pontos, corrigidas do deslocamento do ponto principal, das distorções radial simétrica e descentrada e da deformação do filme; e o segundo, utilizou-se as coordenadas fiduciais dos pontos, corrigidas apenas da deformação do filme.

Para realizar a aerotriangulação seguiu-se os seguintes passos:

- Escolheu-se os pontos nas fotografias para serem aerotriangulados;
- Realizou-se a conversão analógica/digital das fotografias;
- Realizou-se a orientação interior das fotografias;
- Obteve-se as coordenadas dos pontos aerotriangulados;
- Aplicou-se um algoritmo para a detecção de erros grosseiros;
- Analisou-se os resultados da aerotriangulação;

A seguir serão descritos esses passos.

3.3.5.1 - Escolha dos Pontos para a Aerotriangulação

Escolheu-se de 5 a 10 pontos foto-identificáveis na região de superposição das fotografias, (em meio analógico), com o auxílio de um estereoscópio de espelho, sempre que possível sobre o solo. A distribuição dos pontos aerotriangulados procurou seguir os critérios apresentados no item 2.7.2 e na figura 16. Alguns pontos pré-sinalizados foram utilizados

como pontos de conferência.

3.3.5.2 - Conversão Analógica/Digital das Fotografias

A conversão analógica/digital, foi realizada do mesmo modo como apresentado no item 3.3.1.2.

3.3.5.3 - Orientação Interior da Fotografia

A orientação interior da fotografia, foi realizada do mesmo modo como apresentado no item 3.3.1.3.

3.3.5.4 - Obtenção das Coordenadas do Pontos para a Aerotriangulação

Para a leitura dos pontos, ampliou-se a imagem para obter melhor pontaria na determinação das coordenadas instrumentais. Para verificar a influência da calibração da câmara, determinou-se as coordenadas dos pontos aerotriangulados no sistema fiducial (somente corrigindo a deformação do filme) e no sistema fotogramétrico (corrigindo os erros sistemáticos da imagem).

3.3.5.5 - Detecção de Erros Grosseiros

A detecção de erros grosseiros foi realizada através da formação analítica do modelo e a sua concatenação.

3.3.5.6 - Análise dos Resultados da Aerotriangulação

A aerotriangulação foi realizada usando o programa FOTTER. A qualidade do ajustamento para a aerotriangulação foi verificada aplicando-se o Teste Qui-quadrado (χ^2), confrontando o sigma a priori contra o a posteriori. A precisão da aerotriangulação foi testada

comparando-se as coordenadas dos pontos pré-sinalizados obtidos por aerotriangulação e por topografia, supondo estas últimas, isentas de erros. A influência da calibração da câmara sobre o resultado da aerotriangulação foi avaliada por um teste de hipótese (usando a distribuição t-Student) onde comparou-se as médias dos erros existentes entre as coordenadas obtidas por topografia e as coordenadas obtidas pela aerotriangulação, com e sem correção do deslocamento do ponto principal e das distorções descentrada e radial simétrica.

3.3.6 - Obtenção de Informações Altimétricas da Região

A sexta etapa compreendeu a obtenção das informações altimétricas da área teste. Para isso foi utilizado o módulo varredura monoscópica do sistema de monorestituição digital, gerando-se as coordenadas tridimensionais no referencial do objeto. Para realizar a varredura monoscópica foi necessário realizar a orientação espacial aproximada e a orientação espacial exata, que serão descritas a seguir.

3.3.6.1 - Orientação Espacial Aproximada da Fotografia Aérea

Segundo MITISHITA (1997), a orientação espacial aproximada da fotografia aérea consiste na determinação de um modelo matemático aproximado para ser empregado na transformação de coordenadas fotogramétricas em coordenadas planas no referencial geodésico local e verificar os possíveis erros grosseiros nos pontos de apoio. Como não existe um modelo matemático capaz de modelar o deslocamento da imagem causado pela variação do relevo, de forma direta, utilizou-se a transformação projetiva no plano (equações 42, 43). Essa transformação, com oito parâmetros, apresenta resultados satisfatórios na obtenção de coordenadas aproximadas no referencial geodésico local. As coordenadas planimétricas assim determinadas são utilizadas como dados iniciais no processo iterativo de transformação entre o

espaço imagem e espaço objeto.

$$X_L = \frac{a_1 x_p + a_2 y_p + a_3}{a_4 x_p + a_5 y_p + 1} \quad (42)$$

$$Y_L = \frac{a_6 x_p + a_7 y_p + a_8}{a_4 x_p + a_5 y_p + 1} \quad (43)$$

onde:

X_L, Y_L - Coordenadas dos pontos no referencial geodésico local;

x_p, y_p - Coordenadas dos pontos no sistema fotogramétrico;

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$ - Parâmetros de transformação.

Os parâmetros de transformação foram determinados com técnicas de ajustamento, conhecendo-se as coordenadas dos pontos fotogramétricos, nos referenciais geodésico local e fotogramétrico.

3.3.6.2 - Orientação Espacial Exata da Fotografia Aérea

É o procedimento empregado para determinar os parâmetros de orientação exterior da fotografia aérea ($\chi, \varphi, \omega, X_o, Y_o, Z_o$). Para se determinar os parâmetros de orientação exterior utilizou-se as coordenadas dos pontos fotogramétricos no sistema fotogramétrico e referencial no geodésico local e as equações de colinearidade em sua forma direta, através do ajustamento paramétrico com injunções posicionais de peso. Analisou-se criteriosamente as precisões na determinação dos parâmetros de orientação exterior, pois é a partir deles que a retificação planimétrica é realizada.

3.3.6.3 - Varredura Monoscópica

Para realizar a varredura monoscópica, coloca-se as duas fotografias que formam o par estereoscópico no vídeo, fazendo-se a leitura dos pontos homólogos escolhidos para

representar a altimetria da região. Durante a leitura do pontos altimétricos, deve ser incluídos os pontos de apoio e os das aerotriangulação. De posse do conjunto de dados, o sistema forma analiticamente o modelo fotogramétrico, obtendo as coordenadas tridimensionais (x,y,z) do conjunto de pontos no referencial de modelo. Os pontos de apoio e da aerotriangulação com coordenadas tridimensionais (X,Y,Z) no sistema geodésico local, permitem a orientação absoluta do modelo, fornecendo, assim, subsídios para transformar as coordenadas tridimensionais do referencial de modelo para o sistema geodésico local (MITISHITA, 1997).

A posição de um ponto no modelo, encontra-se na interseção dos dois raios homólogos. Portanto, um erro de posicionamento na direção do eixo X é considerado como uma paralaxe horizontal e tal deslocamento é compensado na coordenada altimétrica Z. Os erros de posicionamento na direção Y são considerados como paralaxe vertical.

3.3.7 - Produção do Mapa

A sétima etapa consistiu na monorestituição das fotografias para a produção do mapa. Sendo necessário nesta etapa os seguintes passos:

- Digitalização das entidades gráficas de interesse;
- Transformações entre referenciais do espaço imagem e objeto;
- Procedimentos finais para a elaboração do mapa em meio digital;

3.3.7.1 - Digitalização Vetorial das Entidades Gráficas de Interesse

Durante o processo de digitalização vetorial foram consideradas como entidades gráficas de interesse: limites de lotes, meio-fio, hidrografia e pontos pré-sinalizados.

Com o módulo de gerenciamento de imagem IRAS-C, e a imagem digital no vídeo, utilizou-se as ferramentas gráficas do CAD *MicroStation* para digitalizar as entidades gráficas

de interesse diretamente sobre a imagem. Ao término da digitalização obteve-se um arquivo vetorial, onde todas as entidades materializadas estavam no referencial de desenho numa projeção central. O CAD *MicroStation* permite o gerenciamento, manipulação e edição das entidades já digitalizadas.

3.3.7.2 - Transformações entre referenciais do espaço imagem e objeto

O arquivo gráfico resultante do processo de digitalização possui suas coordenadas no referencial de desenho e como as feições foram digitalizadas diretamente sobre a fotografia, estas encontram-se numa projeção central, pois não sofreram nenhuma retificação.

Para realizar a retificação, gerou-se um segundo arquivo com projeção ortogonal a partir do primeiro. Os pontos digitalizados que definem as entidades gráficas foram transformados do referencial de desenho para o referencial geodésico local. Esses passos serão apresentados a seguir.

3.3.7.2.1 - Transformação das Entidades Gráficas do Referencial de Desenho para o Geodésico Local

Para transformar as coordenadas dos pontos que definem as entidades gráficas do referencial de desenho para o geodésico local, usou-se um processo iterativo sendo este dividido em 8 etapas:

1ª Etapa

Obtenção das coordenadas de um ponto (no referencial de desenho) de uma entidade gráfica oriunda da digitalização monoscópica da fotografia.

2ª Etapa

Transformação das coordenadas do referencial de desenho do ponto digitalizado para o sistema fiducial, e após, para o sistema fotogramétrico, realizando as correções dos erros

sistemáticos da imagem.

3ª Etapa

As coordenadas fotogramétricas do ponto digitalizado são transformadas para coordenadas topográficas utilizando a transformação linear projetiva, portanto estas coordenadas são aproximadas.

4ª Etapa

Com as coordenadas topográficas aproximada determina-se no modelo digital do terreno a coordenada altimétrica do ponto.

5ª Etapa

Com as coordenadas fotogramétrica do ponto digitalizado e com a coordenadas altimétrica aproximada do ponto, através da equação inversa da colinearidade, determina-se as coordenadas topográficas do ponto.

6ª Etapa

As coordenadas determinadas na 5ª etapa são imprecisas, pois a coordenada altimétrica do ponto foi obtida por interpolação no MDT, com valores aproximados de coordenadas planimétricas determinadas na 3ª etapa, porém são mais precisas que esta.

Utilizando as coordenadas topográficas obtidas na 5ª Etapa, determina-se nova coordenada altimétrica, mais precisa, no MDT. Com esta nova informação altimétrica, determina-se outra coordenada geodésica local plana com a equação inversa da colinearidade, que são mais precisas que as determinadas anteriormente.

7ª Etapa

Ocorre nova iteração, toda vez que a diferença entre as coordenadas geodésicas locais planas calculadas entre duas iterações consecutivas é maior que a precisão definida.

8ª Etapa

O fim do processo se dá quando a diferença entre as coordenadas geodésicas locais planas, calculada entre duas iterações consecutivas está dentro da precisão definida.

3.3.7.3- Procedimentos finais para a elaboração do mapa em meio digital

Como a restituição digital planimétrica de cada fotografia foi realizada isoladamente, tornou-se necessário concatenar os arquivos restituídos em um único arquivo gráfico. Na edição final, realizou-se a correção das imperfeições existentes nas entidades restituídas (polígonos abertos, linhas desencontradas, suavização de entidades curvas, etc) e adicionou-se a toponímia, e legenda, obtendo-se o mapa planimétrico final.

3.3.8 - Comparação das Coordenadas obtidas por Topografia e Monorestituição

Após a obtenção do mapa planimétrico em formato vetorial, usou-se a função *information* do CAD *MicroStation*, que forneceu as coordenadas dos pontos que compõem as entidades restituídas. Fez-se a comparação dessas coordenadas com as coordenadas obtidas por topografia, presumindo-se as mesmas isentas de erros. Verificou-se assim a precisão alcançada com a monorestituição. A comparação entre coordenadas foi realizada em pontos bem definidos, tais como: cantos de muro, pontos pré-sinalizados e nas edificações somente em locais onde não existe beiral, pois o mesmo não foi considerado no levantamento topográfico.

3.3.9 - Classificação do mapa

A comparação entre as coordenadas obtidas por topografia e monorestituição, permitiu a classificação do mapa em A, B ou C, de acordo com a lei 89.817 de 20 de junho de 1984.

4.0 - Resultados

A seguir serão apresentados os resultados de todas as etapas realizadas para a obtenção do mapa digital.

4.1 - Resultados da Autocalibração

Para realizar a autocalibração da câmara Rolleiflex SLX utilizou-se o método das câmaras convergentes com três estações de exposição. O campo de teste foi composto de 25 alvos, pintados de preto sobre um fundo branco e dispostos em uma parede plana, conforme Figura 19. A Figura 20, apresenta as dimensões dos alvos.

Figura 19 - Campo de teste usado para a autocalibração

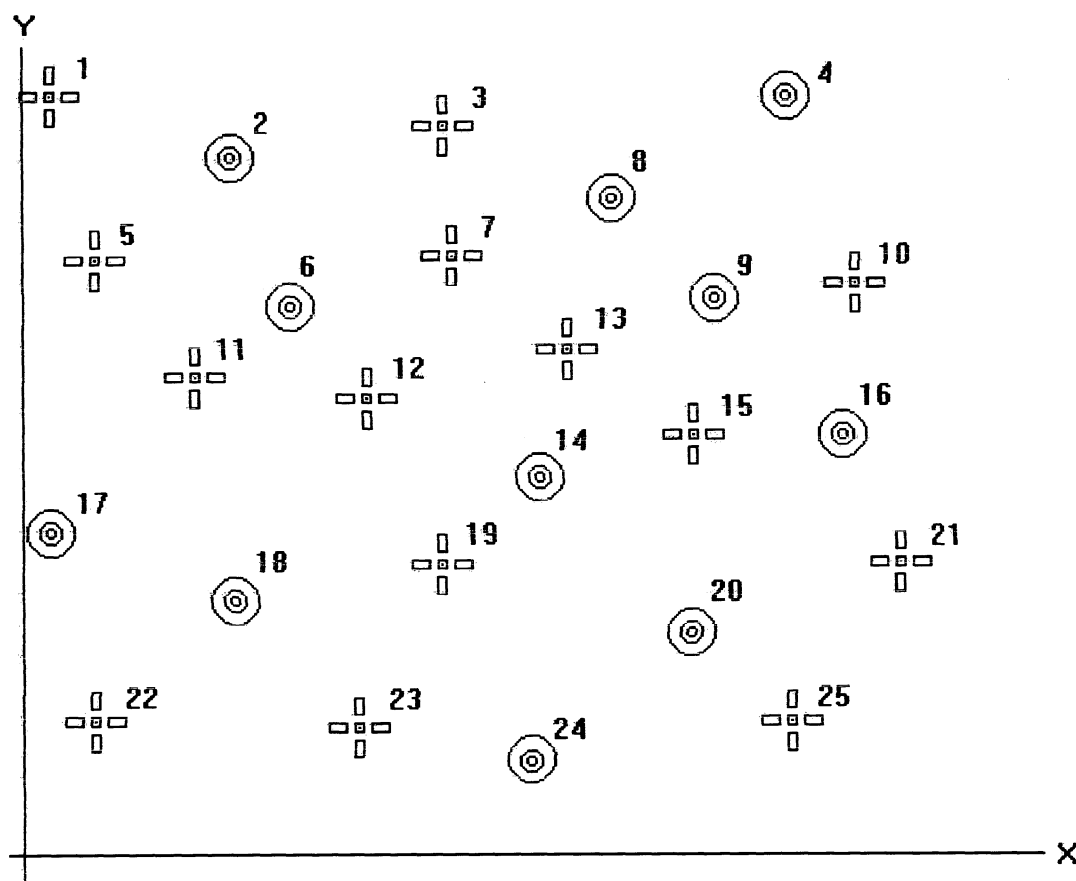
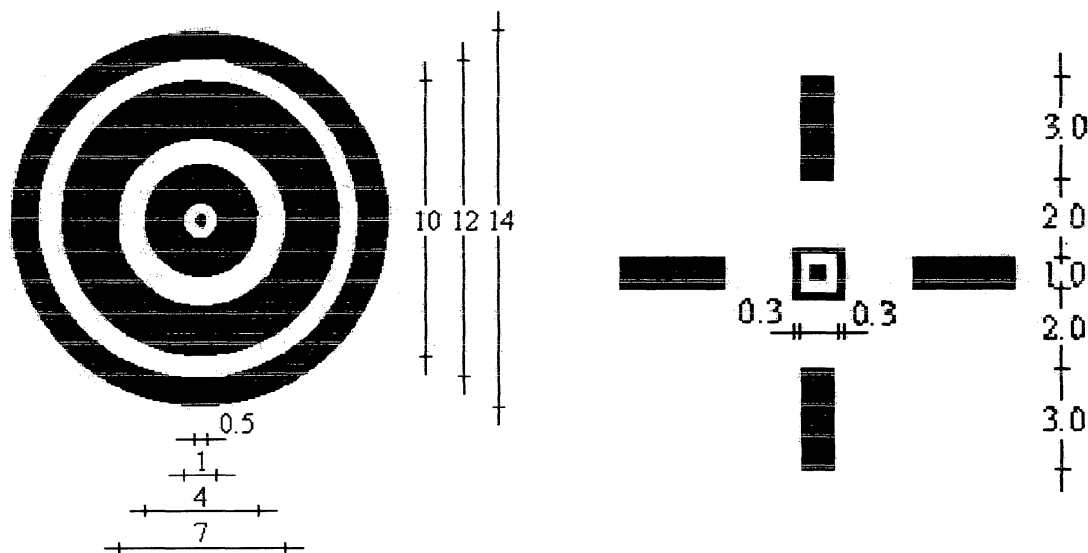
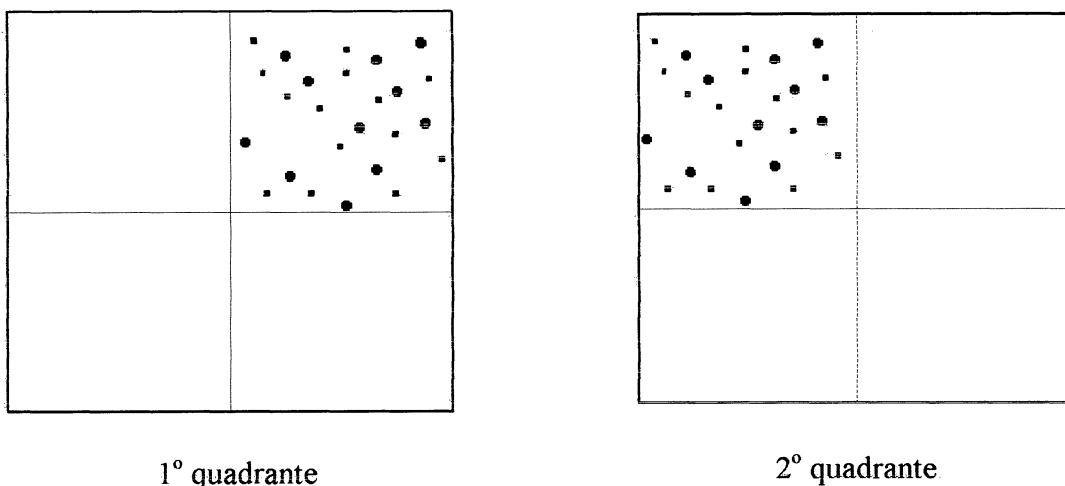


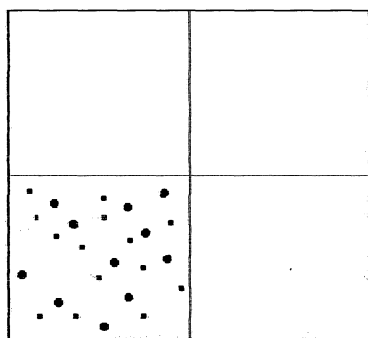
Figura 20 - Detalhes dos alvos do campo de calibração (medidas em centímetros)



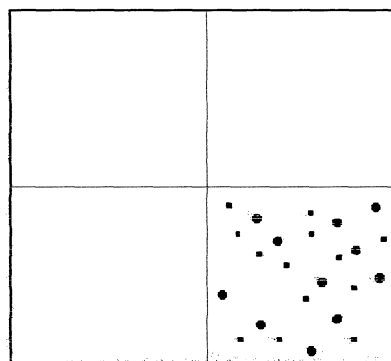
As fotografias foram obtidas com a câmera apoiada em um tripé e foco ajustado para o infinito, fixando-se a objetiva com uma fita crepe para evitar sua movimentação. Devido a distância entre a câmera e a parede que continha o campo de teste, os alvos ocuparam aproximadamente 22% do campo visual. Para explorar totalmente o sistema de lentes, dividiu a mesma em quatro quadrantes, tirando-se 4 fotografias por estação sendo uma fotografia por quadrante, conforme figura 21. A escala do negativo foi de 1/70.

Figura 21 - Posição ocupada pelos alvos no negativo





3º quadrante



4º quadrante

Para quebrar a correlação existente entre a distância focal e as coordenadas do ponto principal, rotacionou-se a câmara fotográfica em 90°. A Tabela 3, apresenta a posição e os ângulos de rotação do centro óptico da câmara, em cada estação de exposição.

Tabela 3 - Estação de exposição e posição e os ângulos de rotação da câmara

Foto	Posição Câmara	Coord. (X;Y;Z) Câmara em m	Quadrante objetiva	Ang. Vertical
01	1	3.40;0.50;9.00	I	0°
02	1	3.40;0.50;9.00	II	0°
03	1	3.40;0.46;9.00	III	90°
04	1	3.40;0.46;9.00	IV	90°
05	2	11.50;0.60;12.80	I	0°
06	2	11.50;0.60;12.80	II	0°
07	2	11.50;0.56;12.80	III	90°
08	2	11.50;0.56;12.80	IV	90°
09	3	20.50;1.20;9.80	I	0°
10	3	20.50;1.20;9.80	II	0°
11	3	20.50;1.16;9.80	III	-90°
12	3	20.50;1.16;9.80	IV	-90°

As coordenadas dos alvos foram obtidas mediante a realização de 74 medidas de distância entre os mesmos, com ajustamento no programa NETZ 2D².

A transformação analógica/digital dos negativos foi realizada pela empresa Universal S.A., usando um *scanner* da marca Vexcel modelo ZX-3000, com resolução óptica de 2500 DPI, ou seja, 10,12 µm.

Conhecendo-se as coordenadas fiduciais das 121 marcas do *reseau* da câmara Rolleiflex SLX, calibradas por BÄHR et al. (1982), escolheu-se 16 para simulação das marcas fiduciais da fotografia, conforme Figura 22. Para realização da leitura das coordenadas fotogramétricas dos alvos usou-se o sistema de monorestituição digital, que funciona como um módulo do MicroStation. Todas as leituras das marcas do *reseau* foram realizadas com a imagem ampliada, o que permitiu observar as marcas com maior clareza e precisão.

Figura 22 - Marcas do *reseau* escolhidas como marcas fiduciais

	1		2		3		4		5	
	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	6
	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
15	+	+	+	+	+	+	+	+	+	7
	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
14	+	+	+	+	+	+	+	+	+	8
	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
13		12			11			10		9

² Programa desenvolvido na Universidade de Karlsberk, Alemanha pelos Prof. Dr. Ing. G. Schmitt e Dr. Ing. R. Jaeger e diponível no curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná.

A orientação interior foi realizada utilizando-se a média aritmética de 3 leituras feitas nas 16 marcas do *reseau*. Após a determinação dos parâmetros de transformação do sistema instrumental para o fiducial, verificou-se os resíduos das observações. Os pontos cujos resíduos foram superior a 10 micra tiveram a sua leitura refeita ou foram eliminados do processamento.

Com as coordenadas dos alvos, no sistema fiducial, preparou-se o arquivo de entrada de dados para realizar a autocalibração no programa FOTTER. Para maiores informações sobre este programa veja SILVA (1995).

O processamento da calibração da câmara, apresentou os seguintes resultados:

Nº de iterações : 5

Graus de Liberdade: 462

Variância a priori (σ_0^2) : 1,00

Variância a posteriori $(\hat{\sigma}_0^2)$: 1,06

As variâncias a priori e a posteriori foram avaliadas pelo teste de hipótese:

$$H_0: (\hat{\sigma}_0^2) = (\sigma_0^2) \quad (\text{Hipótese nula})$$

$$H_1: (\hat{\sigma}_0^2) \neq (\sigma_0^2) \quad (\text{Hipótese alternativa})$$

$$\alpha = 0,05 \quad (\text{Nível de significância})$$

$$\text{Intervalo de aceitação } \chi_{\frac{\alpha}{2}}^2 = 403,87 \text{ a } \chi_{\frac{\alpha}{2}}^2 = 522,97$$

$$\text{Qui-quadrado } (\chi^2) \text{ calculado: } 487,653$$

Como o Qui-quadrado calculado, pertence ao intervalo de aceitação, a hipótese H_0 é aceita, ou seja, a variância a priori é igual a variância a posteriori, no nível de significância de 5%.

Os resíduos dos pontos de controle são observados na tabela 4.

Tabela 4 - Resíduos dos Pontos de Controle

Ponto	VX(μm)	VY(μm)	VZ(μm)	Ponto	VX(μm)	VY(μm)	VZ(μm)	Ponto	VX(μm)	VY(μm)	VZ(μm)
1	0,7	-0,7	1,9	10	0,2	0,7	-0,3	18	-0,6	-0,8	1,2
2	0,8	-0,8	-0,3	11	0,9	-0,5	-0,7	19	-0,4	0,5	-0,8
3	0,8	0,8	1,2	12	1,4	-0,7	-2,0	20	-0,8	-1,1	2,1
4	-0,8	2,1	1,5	13	0,6	0,2	-2,2	21	-0,3	0,2	1,1
5	0,8	-0,6	0,7	14	0,1	0,8	-1,1	22	-1,3	-1,8	0,7
6	0,6	0,8	-1,5	15	0,3	-0,7	0,1	23	-0,7	0,9	-0,2
7	1,3	0,3	-0,7	16	-0,4	-0,0	0,7	24	-1,8	-0,6	-0,7
8	-0,3	0,2	-0,3	17	-0,2	-0,6	0,5	25	-1,1	0,5	0,3
9	0,1	1,1	-1,1								

A calibração do sistema de lentes de 50mm da câmara Rolleiflex SLX forneceu os seguintes parâmetros para a distância focal Guassiana equivalente:

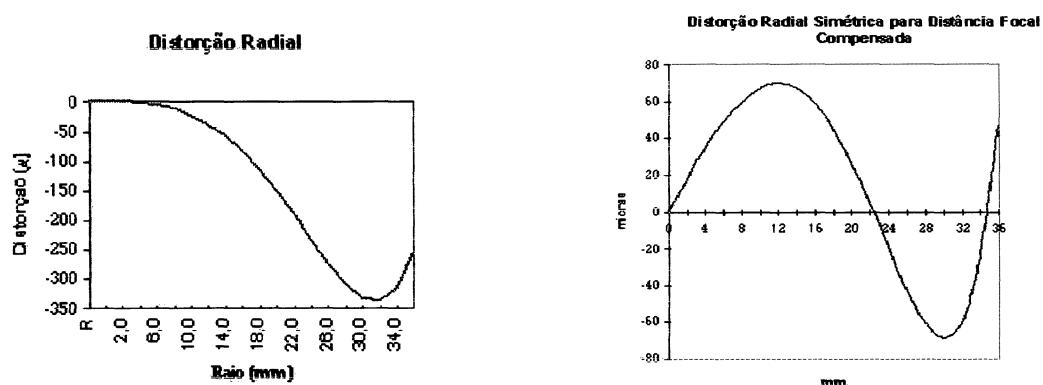
		Variância
F	= 51,2164 mm	5.26E-03
CX	= $-1,734155 \cdot 10^{-1}$ mm	8.24E-03
CY	= $-4,355509 \cdot 10^{-1}$ mm	7.61E-03
K ₁	= $-2,277362 \cdot 10^{-5}$	4.19E-12
K ₂	= $7,643411 \cdot 10^{-9}$	3.40E-17
K ₃	= $4,436058 \cdot 10^{-12}$	3.09E-23
P ₁	= $-5,090197 \cdot 10^{-6}$	1.05E-10
P ₂	= $3,005445 \cdot 10^{-6}$	1.08E-10

Calculando-se a distância focal compensada, onde a máxima distorção radial simétrica positiva é igual a máxima distorção radial negativa, obteve-se os novos parâmetros:

$$\begin{aligned}
 C' &= 50,7900 \text{ mm} & P_1 &= -5,090197 \cdot 10^{-6} & P_2 &= 3,005445 \cdot 10^{-6} \\
 K_0 &= 8,8 \cdot 10^{-3} & K'_1 &= -2,2549 \cdot 10^{-5} & K'_2 &= 7,5526 \cdot 10^{-9} & K'_3 &= 4,4104 \cdot 10^{-12}
 \end{aligned}$$

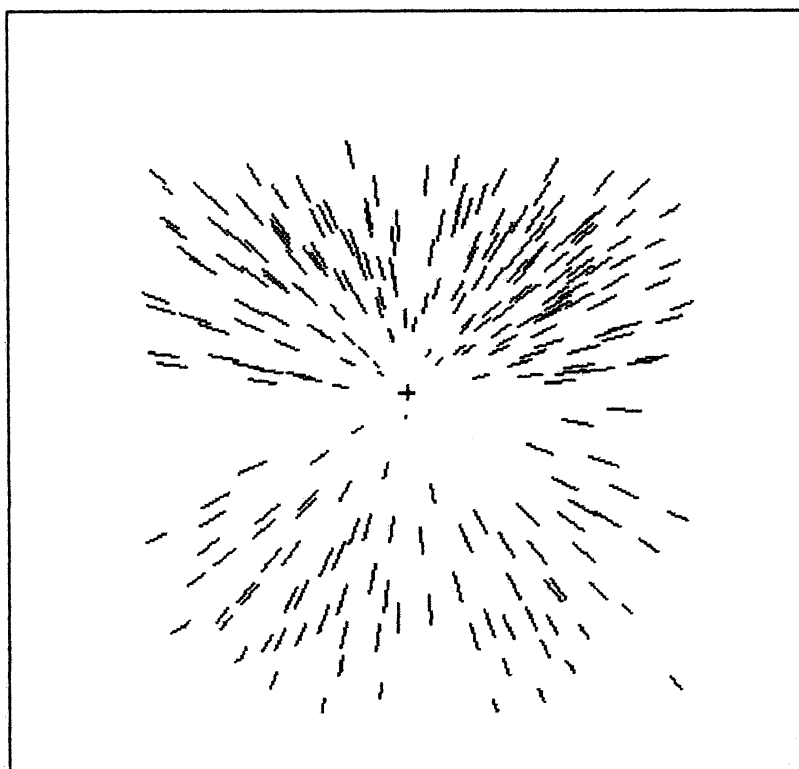
A Figura 23 apresenta dois gráficos da distorção radial simétrica: no primeiro usando a distância focal calibrada e no segundo usando a distância focal Guassiana equivalente.

Figura 23 - Gráficos da distorção radial simétrica



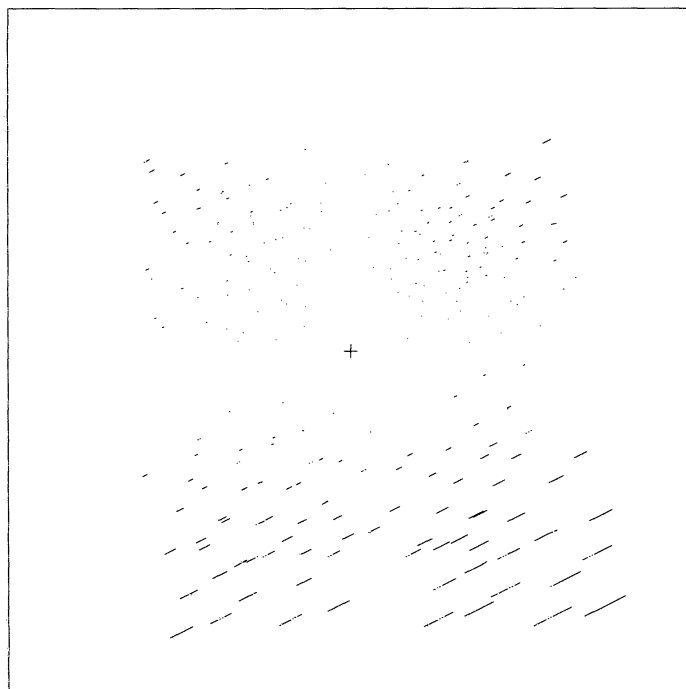
A Figura 24 apresenta os vetores de distorção radial simétrica e a Figura 25, os vetores de distorção descentrada dos pontos utilizados na calibração da câmara.

Figura 24 - Distribuição dos vetores de distorção radial simétrica no quadro do negativo



1 cm = 100 micra

Figura 25 - Distribuição dos vetores de distorção descentrada no quadro do negativo



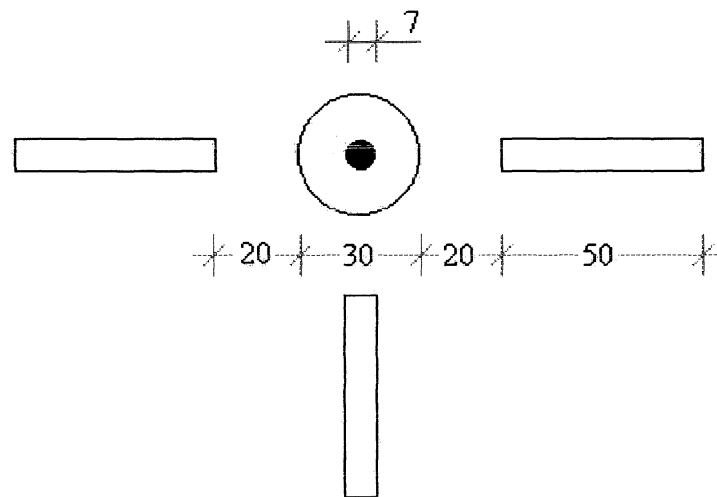
1 cm = 500 micra

4.2 - Implantação e Distribuição dos Alvos de Pré-Sinalização

Como a área teste é pequena e devido a necessidade de pontos de verificação, além dos pontos de apoio, não se utilizou fórmulas específicas para calcular a distribuição e o espaçamento entre os alvos de pré-sinalização, visto que a quantidade implantada foi bem superior a recomendada. A distribuição dos 98 alvos não se restringiu somente a área de estudo, mas a uma faixa de aproximadamente 200 metros além dela. Os alvos foram implantados no sistema viário, principalmente em cruzamento de ruas.

Os alvos foram confeccionados com dois círculos concêntricos, sendo o interno pintado de preto e o externo de branco, com diâmetros de 7 e 30 cm, respectivamente. Para facilitar a localização dos alvos na fotografia pintou-se três faixas de 8 x 50 cm, distanciados aproximadamente 20 cm deste, conforme Figura 26. A dimensão do alvo no negativo foi de 32,6 μm (micra).

Figura 26 - Alvo de pré-sinalização



4.3 - Levantamento Topográfico

Os levantamentos topográficos foram realizados em duas etapas. Devido ao grande volume de dados não serão apresentadas cópias das cadernetas de campo, dando ênfase aos principais resultados destes levantamentos.

4.3.1 - Primeiro Levantamento Topográfico

O primeiro levantamento plani-altimétrico da área foi realizado no período de 11 a 31 de agosto de 1995, por método topográfico, utilizando-se caminhamento com irradiações. Para as medidas lineares usou-se trena, e para as angulares um teodolito eletrônico Nikon de 6". Por se tratar de um levantamento cadastral, todos os detalhes, como cantos de lotes e quadras, meio-fio, postes, bocas de lobo foram irradiados. As construções foram levantadas por triangulação com trena e baliza, sendo desprezada as áreas ocupadas por beiral.

Para realizar o levantamento plani-altimétrico da área usou-se uma poligonal com 12 vértices, perímetro de 1989,15 m, erro linear de 0.232 m, erro altimétrico de 0.326 m, e erro

angular de $0^{\circ} 00' 17''$, obtendo uma precisão linear de $1/8573.92$, com 949 pontos levantados.

Adotou-se como precisão linear e angular, respectivamente, os seguintes parâmetros, $1/5000$ e $n\sqrt{p}$, onde n - número de vértices da poligonal e p - precisão do aparelho. Os dados foram processados no *software* Topograph, com coordenadas locais; a escolha da escala do mapa foi de $1/1.000$, com curvas de nível espaçadas de 1 em 1 metro. O mapa planimétrico realizado pela Escola Técnica Federal de Goiás encontra-se no Anexo 1.

4.3.2 - Segundo Levantamento Topográfico

O segundo levantamento plani-altimétrico foi feito no período de 23 a 30 de junho de 1997, com o objetivo de obter as coordenadas dos alvos de pré-sinalização distribuídos na área. Este levantamento foi realizado com uma estação total Topcon CTS 1 acoplada a um coletor de dados Psion L 34. Para o levantamento dos 98 alvos de pré-sinalização foi necessário 3 poligonais (os dados de cada poligonal podem ser observados na Tabela 5). Como não foi possível recuperar os vértices da primeira poligonal, irradiou-se todos os cantos de quadras e alguns cantos de lotes, para obter dados suficientes para realizar uma transformação afim no plano, fazendo com que todas as coordenadas planas retangulares de ambos os levantamentos topográficos, permanecessem no mesmo sistema de referência.

Tabela 5 - Dados das poligonais para o levantamento dos alvos de pré-sinalização

Poligonal	1	2	3
Nº Vértice	25	10	6
Nº irradiações	120	65	28
Perímetro (m)	4113.328	2685.071	721.326
Erro linear (m)	0.378	0.265	0.067
Erro angular	$0^{\circ} 00' 22''$	$0^{\circ} 00' 09''$	$0^{\circ} 00' 13''$
Erro Altimétrico (m)	0.040	0.016	0.018
Precisão linear	$1/10891$	$1/10137$	$1/10757$

4.4 - Cobertura Fotográfica da Área

Realizou-se a cobertura fotográfica da área com um avião Cherokee previamente adaptado com uma abertura no assoalho de aproximadamente 20 x 20 cm, onde foi posicionada a câmara. O azimuth da linha de vôo foi determinado por método gráfico utilizando uma carta da cidade de Goiânia, na escala de 1/50.000. Para evitar problemas com sombreamento e a não dissipação do vapor d'água do córrego Botafogo, o vôo foi executado às 11 horas, a 460 metros acima do solo, velocidade de 130 km/h. A câmara foi ajustada para um tempo de exposição de 1/500 segundo, com o objetivo de evitar o arrastamento da imagem; o foco ajustado para o infinito, sendo a objetiva fixada com fita crepe para evitar alterações da distância focal; a abertura do diafragma em 11 e o intervalo entre fotografias reduzido para 3 segundos; obteve-se assim, um recobrimento de 85%. Cada faixa teve 12 fotografias, sendo repetida quatro vezes por motivo de segurança. Os cálculos do planejamento do vôo são encontrados no Anexo 2.

Para a tomada das fotografias, segurou-se a câmara com as mãos, não utilizando nenhum dispositivo especial para apoio da mesma. O intervalo entre fotografias foi marcado com um cronômetro.

4.5 - Resultados da Aerotriangulação

A aerotriangulação foi realizada com as fotografias pares (2,4,6,8,10 e 12), ficando o recobrimento longitudinal em torno de 70%, e não 85% como era originalmente.

A escolha dos pontos para a aerotriangulação foi realizada com o auxílio de um estereoscópio de espelho, escolhendo-se pontos fotoidentificáveis, sempre que possível, diretamente no solo. O total de pontos selecionados nas 6 fotografias foi de 49, conforme Figura 27. A numeração desses pontos seguiu a seguinte nomenclatura: iniciando com o

número 1 (identificando os pontos da aerotriangulação) e sequência de 2 dígitos que representam o número de ordem. Os pontos pré-sinalizados iniciam com o número 5, e sua distribuição na faixa é ilustrada na Figura 28.

Figura 27 - Distribuição dos pontos para a aerotriangulação em cada fotografia aérea

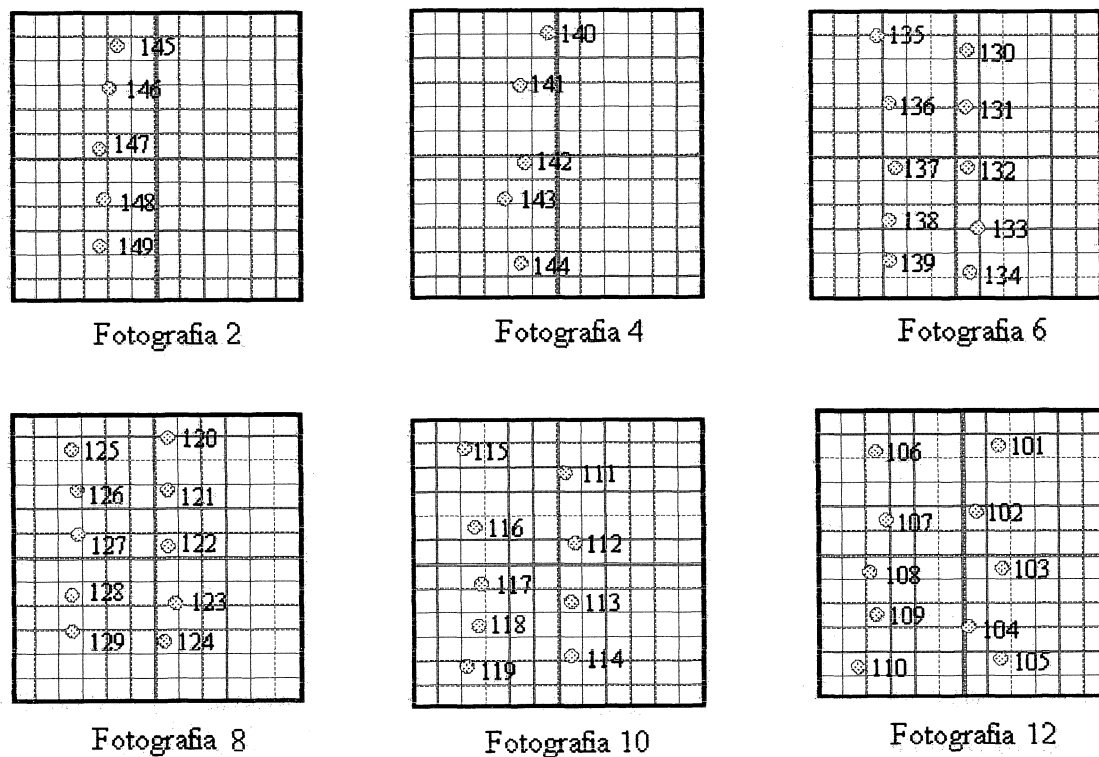
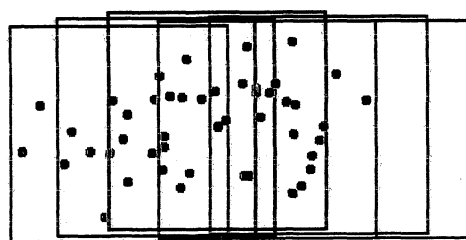


Figura 28 - Distribuição dos pontos pré-sinalizados na faixa



A conversão analógica/digital foi realizada de forma análoga a da calibração.

A orientação interior foi realizada de forma semelhante a da calibração.

Usando o programa de monorestituição digital leu-se as coordenadas instrumentais dos pontos para a aerotriangulação e dos alvos de pré-sinalização em cada fotografia. Para verificar a influência da calibração da câmara determinou-se as coordenadas desses pontos no sistema fiducial (corrigindo somente a deformação do filme) e no sistema fotogramétrico (corrigindo os erros sistemáticos da imagem).

Antes de iniciar o processamento da aerotriangulação no programa FOTTER fez-se a detecção de erros grosseiros no sistema de monorestituição digital. Para tal, formou-se analiticamente os modelos fotogramétricos lidos monoscopicamente nas fotografias com a sua posterior concatenação. Os pontos que apresentaram resíduos superiores a 45 μm tiveram as suas fotocoordenadas relidas ou foram eliminados.

Dos 98 pontos pré-sinalizados, 46 deles ficaram fora da faixa fotografada, ou seja, não apareceram na fotografia. Dos 52 pontos restantes, 22 ficaram parcialmente ou totalmente encoberto por veículos, pessoas ou sombras. Dos 30 pontos restantes, 9 foram eliminados no processo de depuração das fotocoordenadas para a aerotriangulação por erro de pontaria. Dos 21 pontos restantes 9 foram utilizados como pontos de apoio para a aerotriangulação e 12 como pontos de verificação. Dos 49 pontos escolhidos para serem aerotriangulados, 25 foram eliminados no processo de depuração das fotocoordenadas por erro de pontaria.

O primeiro processamento com coordenadas dos pontos no sistema fiducial (corrigidas da distorção do filme), apresentou os seguintes resultados:

Nº de iterações: 4

Graus de Liberdade: 86

Variância a priori $\left(\hat{\sigma}_0^2\right)$: 1,00

Variância a posteriori $\left(\sigma_0^2\right)$: 1,29

As variâncias a priori e a posteriori foram avaliadas pelo teste de hipótese:

$$H_0: \left(\hat{\sigma}_0^2 \right) = \left(\sigma_0^2 \right) \quad (\text{Hipótese nula})$$

$$H_1: \left(\hat{\sigma}_0^2 \right) \neq \left(\sigma_0^2 \right) \quad (\text{Hipótese alternativa})$$

$$\alpha = 0,05 \quad (\text{Nível de significância})$$

$$\text{Intervalo de aceitação: } \chi_{\frac{\alpha}{2}}^2 = 61,79 \text{ a } \chi_{\frac{\alpha}{2}}^2 = 113,05$$

$$\text{Qui-quadrado } (\chi^2) \text{ calculado: } 111,37$$

Como o Qui-quadrado calculado pertence ao intervalo de aceitação, a hipótese H_0 é aceita, ou seja, a variância a priori é igual a variância a posteriori, no nível de significância de 5%.

Os resíduos nos pontos de apoio são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resíduos dos pontos de apoio (com correção da distorção do filme)

Pontos	VX (m)	VY (m)	VZ (m)
505	-0.0650	0.0247	0.0168
509	-0.0154	-0.1228	0.0443
513	0.0141	0.1209	-0.0029
517	0.0924	0.0248	-0.0617
527	-0.0012	-0.0339	-0.0268
529	-0.0177	0.0455	-0.0253
534	-0.0381	-0.0375	0.0273
539	-0.0457	-0.0401	-0.0167
541	0.0767	0.0183	0.0450
Desvio. Padrão	0.0536	0.0685	0.0362

O segundo processamento da aerotriangulação foi realizado com as coordenadas dos pontos no sistema fotogramétrico (corrigidas da deformação do filme, deslocamento do ponto principal e distorção do sistema de lentes), e apresentou os seguintes resultados:

Nº de iterações: 4

Graus de Liberdade: 86

Variância a priori $(\hat{\sigma}_0^2)$: 1,00

Variância a posteriori (σ_0^2) : 0.89

As variâncias a priori e a posteriori, foram avaliadas pelo teste de hipótese

$$H_0: (\hat{\sigma}_0^2) = (\sigma_0^2) \quad (\text{Hipótese nula})$$

$$H_1: (\hat{\sigma}_0^2) \neq (\sigma_0^2) \quad (\text{Hipótese alternativa})$$

$$\alpha = 0,05 \quad (\text{Nível de significância})$$

$$\text{Intervalo de aceitação: } \chi_{\frac{\alpha}{2}}^2 = 61,79 \text{ a } \chi_{\frac{\alpha}{2}}^2 = 113,05$$

$$\text{Qui-quadrado } (\chi^2) \text{ calculado: } 76.84$$

Como o Qui-quadrado calculado pertence ao intervalo de aceitação, a hipótese H_0 é aceita, ou seja a variância a priori é igual a variância a posteriori, no nível de significância de 5%.

Os resíduos nos pontos de apoio são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resíduos dos pontos de apoio (com correção dos erros sistemáticos da imagem)

Pontos	VX (m)	VY (m)	VZ (m)
505	0.0311	0.0906	-0.0274
509	-0.0043	-0.0568	0.0197
513	-0.0584	-0.0320	-0.0040
517	-0.0342	-0.0287	0.0168
528	0.0711	-0.0630	0.0219
529	-0.0614	0.0576	-0.0331
534	0.0083	0.0324	-0.0069
539	0.0056	-0.0317	-0.0069
541	0.0422	0.0316	0.0201
Desvio. Padrão	0.04511	0.05435	0.02095

A Tabela 8 apresenta a comparação realizada entre as coordenadas dos pontos de pré-sinalização obtidas por topografia com as obtidas pela aerotriangulação (com a correção dos erros sistemáticos da imagem). Ao passo que, a Tabela 9, apresenta a mesma comparação, porém sem a correção dos erros sistemáticos da imagem. Esta comparação foi realizada com o objetivo de testar eficácia da aerotriangulação.

Tabela 8 - Comparação entre as coordenadas dos alvos pré-sinalizados obtidas pela aerotriangulação com a correção dos erros sistemáticos e por levantamento topográfico

Ponto	Aerotriangulação		Topografia		Dif. Coord.		Resultado (m)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	
505	10229,063	10567,759	10229,125	10567,859	-0,062	-0,100	0,118
506	10233,656	10549,094	10233,610	10548,920	0,046	0,174	0,180
509	10302,444	10392,307	10302,712	10392,382	-0,268	-0,075	0,278
511	10284,740	10301,452	10284,833	10301,362	-0,093	0,090	0,129
512	10255,747	10244,485	10255,758	10244,494	-0,011	-0,009	0,014
513	10189,761	10412,372	10189,850	10412,330	-0,089	0,042	0,098
516	10104,774	10442,878	10104,510	10442,680	0,264	0,198	0,330
517	10034,159	10417,516	10034,270	10417,480	-0,111	0,036	0,117
518	10030,431	10371,304	10030,340	10371,490	0,091	-0,186	0,208
520	10081,995	10575,660	10081,933	10575,475	0,062	0,185	0,195
521	10029,098	10593,450	10028,973	10593,355	0,125	0,095	0,157
525	10474,933	10452,674	10475,085	10452,819	-0,152	-0,145	0,210
526	10339,636	10352,720	10339,990	10352,940	-0,354	-0,220	0,417
528	10322,987	10092,419	10322,980	10092,530	0,007	-0,111	0,111
529	10287,036	9968,409	10286,900	9968,360	0,136	0,049	0,144
534	9915,509	10088,711	9915,632	10088,866	-0,123	-0,155	0,198
536	9878,500	10148,589	9878,490	10148,570	0,010	0,019	0,021
539	10121,522	10169,385	10121,503	10169,382	0,019	0,003	0,019
541	10131,790	10056,572	10131,521	10056,889	0,269	-0,317	0,416
542	10175,267	10099,754	10175,117	10099,781	0,150	-0,027	0,152
550	9992,758	10007,612	9992,786	10007,863	-0,028	-0,251	0,253
Média					-0,007	-0,023	0,176
Desv. Pad					0,159	0,140	0,114

Tabela 9 - Comparação entre as coordenadas dos alvos pré-sinalizados obtidas pela aerotriangulação sem a correção dos erros sistemáticos e por levantamento topográfico

Ponto	Aerotriangulação		Topografia		Dif. Coord.		Resultante (m)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	
505	10228,76	10567,94	10229,13	10567,86	-0,37	0,08	0,38
506	10233,55	10549,44	10233,61	10548,92	-0,06	0,52	0,53
509	10302,74	10392,46	10302,71	10392,38	0,03	0,08	0,09
511	10285,02	10301,53	10284,83	10301,36	0,19	0,16	0,25
512	10256,15	10244,83	10255,76	10244,49	0,39	0,34	0,52
513	10189,82	10412,36	10189,85	10412,33	-0,03	0,03	0,05
516	10104,96	10443,13	10104,51	10442,68	0,45	0,45	0,64
517	10034,25	10417,48	10034,27	10417,48	-0,02	0,00	0,02
518	10030,95	10371,54	10030,34	10371,49	0,61	0,05	0,61
526	10339,79	10352,55	10339,69	10352,94	0,10	-0,39	0,40
528	10323,06	10092,42	10322,98	10092,53	0,08	-0,11	0,14
529	10286,84	9968,48	10286,90	9968,36	-0,06	0,12	0,14
534	9916,52	10089,90	9915,63	10088,87	0,89	1,03	1,36
536	9879,34	10149,43	9878,49	10148,57	0,85	0,86	1,21
539	10122,13	10170,10	10121,503	10169,382	0,63	0,71	0,95
541	10132,39	10057,39	10131,521	10056,889	0,87	0,50	1,01
Média					0,28	0,28	0,52
Desv Pad.					0,39	0,38	0,42

Para verificar se as duas médias eram iguais fez-se um teste de hipótese, aplicando-se a Distribuição t-Student, pois os desvios padrões das populações são desconhecidos:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad (\text{Hipótese nula})$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \quad (\text{Hipótese alternativa})$$

$$\alpha = 0,10 \quad (\text{Nível de significância})$$

$$\text{Intervalo de aceitação: } -t_{\frac{\alpha}{2}} = -1,70 \text{ a } t_{\frac{\alpha}{2}} = 1,70$$

$$t \text{ (calculado): } -3,054$$

Como $|t| > t_{\frac{\alpha}{2}}$, rejeitou-se a hipótese H_0 , ou seja, rejeitou-se a hipótese de igualdade entre as duas médias populacionais, no nível de significância de 10%. Pode-se concluir que a calibração da câmara influenciou nos resultados da aerotriangulação.

4.6 - Geração do Modelo Digital do Terreno (MDT)

O modelo digital do terreno poderia ter sido obtido pela digitalização das curvas de nível de mapas da área ou pela importação do arquivo digital com as informações altimétricas da área, realizado pela Escola técnica Federal de Goiás. Porém, na prática este tipo de informação nem sempre está disponível. Optou-se, então, pela geração do MDT utilizando o módulo “varredura monoscópica” do sistema de monorestituição digital.

Para realizar a varredura monoscópica fez-se uma malha de 50 x 50 metros, que foi colocada sobreposta a fotografia. Próximo ao nodo da malha, escolheu-se um ponto fotoidentificável no par estereoscópico, e sobre o solo, como fornecedor de coordenada altimétrica. O mesmo procedimento foi repetido para todas as fotografias. O total de pontos lidos para a geração do MDT foi de 148.

4.7 - Resultados da Produção do Mapa

4.7.1 - Digitalização das Entidades Gráficas

A vetorização das feições de interesse foi realizada no programa CAD (Computer Aided Design) da MicroStation e módulo gerenciador de imagem Iras-C. No MicroStation criou-se 4 níveis de trabalho designados de: construção, lotes, hidrografia e ruas, com as cores, amarela, laranja, azul e verde, respectivamente. Utilizando os recursos de edição gráfica do MicroStation e sobre a imagem matricial no vídeo, seguiu-se as entidades: meio-fio, muros, construções e córrego Botafogo. Durante a digitalização utilizou-se linhas e polilinhas, deixando sempre nos encontros de duas entidades, um ponto (isto evitou a descontinuidade de elementos gráficos).

Devido a vegetação existente na área, algumas entidades não foram digitalizadas. Porém, alguns pontos encobertos foram determinados pelo prolongamento de duas retas, fazendo com que a interseção determinasse o local aproximado do ponto encoberto.

4.7.2 - Retificação

O arquivo gráfico resultante do processo de digitalização possui suas coordenadas no referencial de desenho e como as feições foram digitalizadas diretamente sobre a fotografia, as feições encontram-se numa projeção central, pois não sofreram nenhuma retificação.

Para realizar a retificação, gerou-se um segundo arquivo com projeção ortogonal, a partir do primeiro. Os pontos digitalizados que definem as entidades gráficas foram transformados do referencial de desenho para o referencial topográfico.

4.7.2.1 - Transformação das Entidades Gráficas

Seguiu-se o procedimento descrito no item 3.3.7.2.1, para transformar as coordenadas

dos pontos que definem as entidades gráficas do referencial de desenho para o topográfico.

4.7.3 - Edição Gráfica

A edição gráfica constituiu-se em agrupar os arquivos digitais restituídos de cada fotografia, em um único arquivo. Acrescentou-se ao arquivo final a toponímia, o carimbo e a legenda.

O mapa proveniente da restituição das fotografias aéreas de pequeno formato na escala de 1/5000, encontra-se no Anexo 3.

4.7.4 - Resultados da Restituição Monoscópica

Após os arquivos vetoriais serem restituídos, unidos e editados, leu-se as coordenadas dos pontos de interesse usando a função *information* do CAD MicroStation (esta função fornece as coordenadas dos pontos pertencentes a uma entidade, e não as coordenadas da posição do cursor). Estas coordenadas foram comparadas com as obtidas pelos levantamentos topográficos, fazendo-se a diferença entre elas e calculando-se os erros resultantes.

Como o modelo digital do terreno influencia nos resultados da monorestituição, os pontos foram divididos em 4 grupos:

- 1 - pontos sobre o solo (Tabela 10);
- 2 - pontos sobre o muro (Tabela 11);
- 3 - pontos sobre as casas (Tabela 12);
- 4 - pontos obstruídos pela vegetação, mas que podiam ser determinados pela interseção de duas retas (Tabela 13).

Entidades como meio-fio, calçada e margens do córrego foram restituídas, porém por não possuírem pontos bem definidos não foi possível a comparação de suas coordenadas topográficas com as obtidas por monorestituição.

Tabela 10 - Comparação das coordenadas topográficas e monorestituídas de pontos no solo

Pontos	Topografia		Monorestituição		Dif Coord.		Resultan
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	
505	10229,125	10567,859	10229,505	10567,742	-0,379	0,118	0,397
506	10233,610	10548,919	10233,483	10548,379	0,127	0,540	0,555
509	10302,711	10392,382	10303,006	10391,981	-0,294	0,401	0,498
511	10284,833	10301,362	10285,063	10301,735	-0,229	-0,372	0,438
512	10255,758	10244,494	10256,065	10244,885	-0,307	-0,390	0,497
513	10189,848	10412,332	10189,636	10411,810	0,212	0,522	0,563
516	10104,513	10442,680	10103,944	10442,877	0,569	-0,197	0,602
517	10034,267	10417,483	10034,428	10417,494	-0,161	-0,011	0,161
518	10030,337	10371,488	10030,463	10372,052	-0,126	-0,563	0,577
520	10081,933	10575,475	10082,529	10575,863	-0,596	-0,388	0,711
521	10029,098	10593,450	10028,862	10593,831	0,236	-0,381	0,448
525	10475,085	10452,819	10474,521	10452,160	0,564	0,659	0,867
526	10339,993	10352,941	10340,255	10352,668	-0,262	0,273	0,378
528	10322,987	10092,528	10323,222	10092,854	-0,235	-0,326	0,402
529	10286,899	9968,364	10286,961	9967,872	-0,061	0,492	0,496
534	9915,932	10088,866	9916,268	10089,686	-0,336	-0,820	0,886
536	9878,486	10148,573	9878,863	10149,114	-0,377	-0,541	0,659
539	10121,503	10169,382	10121,918	10169,673	-0,415	-0,291	0,507
541	10131,521	10056,889	10131,200	10056,764	0,321	0,125	0,344
542	10175,117	10099,781	10174,469	10099,169	0,648	0,612	0,891
550	9992,786	10007,863	9991,963	10007,798	0,823	0,065	0,826

O desvio padrão foi de 0,193 m e a média de 0,557m, sendo que a maior distância resultante entre as diferenças de coordenadas de 0,891 m. Esta distância representa 0,178 mm na representação do mapa, o que é menor que a acuidade visual (erro gráfico). A distância equivalente a acuidade visual para a escala na qual o mapa restituído foi confeccionado foi de 1,25m.

Tabela 11 - Comparação das coordenadas topográficas e monorestituídas de pontos sobre o muro

Pontos ³	Monorestituição		Topografia		Dif Coord.		Resultante (m)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	
181	10235,475	10712,152	10235,380	10712,130	0,095	0,022	0,098
185	10235,405	10647,162	10235,130	10647,540	0,275	-0,378	0,467
186	10234,827	10636,395	10235,140	10637,160	-0,313	-0,765	0,827
187	10234,778	10629,731	10235,330	10629,700	-0,552	0,031	0,553
209	10259,615	10664,815	10260,430	10665,870	-0,815	-1,055	1,333
218	10278,776	10579,537	10280,090	10579,170	-1,314	0,367	1,364
219	10274,469	10578,796	10275,880	10578,830	-1,411	-0,034	1,411
240	10292,366	10476,945	10293,390	10476,820	-1,024	0,125	1,032
248	10282,710	10324,526	10283,380	10324,180	-0,670	0,346	0,754
253	10245,593	10248,732	10246,480	10247,680	-0,887	1,052	1,376
255	10219,889	10196,343	10220,930	10196,270	-1,041	0,073	1,044
262	10202,468	10159,896	10202,880	10159,560	-0,412	0,336	0,532
263	10195,215	10146,379	10195,520	10146,460	-0,305	-0,081	0,316
264	10180,363	10132,866	10180,420	10132,390	-0,057	0,476	0,479
267	10169,523	10105,635	10170,010	10104,850	-0,487	0,785	0,924
268	10160,953	10094,435	10161,230	10093,710	-0,277	0,725	0,776
277	10099,621	10042,404	10099,890	10042,200	-0,269	0,204	0,338
280	10060,777	10012,777	10061,320	10012,180	-0,543	0,597	0,807
303	10002,000	10024,971	10001,930	10025,530	0,070	-0,559	0,563
319	10022,615	10044,947	10022,880	10044,790	-0,265	0,157	0,308
320	10026,625	10046,041	10026,790	10046,530	-0,165	-0,489	0,516
322	10026,093	10048,204	10026,030	10048,320	0,063	-0,116	0,132
333	10087,800	10105,848	10087,300	10105,670	0,500	0,178	0,531
346	10097,836	10115,920	10097,670	10116,220	0,166	-0,300	0,343
348	10108,662	10126,215	10108,280	10126,170	0,382	0,045	0,385
349	10109,249	10125,861	10108,990	10125,700	0,259	0,161	0,305
351	10115,539	10133,441	10115,390	10133,160	0,149	0,281	0,318
352	10123,580	10144,559	10123,540	10144,630	0,040	-0,071	0,081
354	10128,973	10153,911	10129,000	10153,050	-0,027	0,861	0,861
355	10136,990	10166,976	10136,690	10167,230	0,300	-0,254	0,393
357	10143,172	10182,240	10143,150	10181,660	0,022	0,580	0,580
371	10155,536	10226,063	10155,410	10225,750	0,126	0,313	0,337
372	10167,471	10269,214	10167,200	10268,980	0,271	0,234	0,358
385	10188,569	10351,007	10188,830	10350,990	-0,261	0,017	0,262
386	10197,181	10385,828	10197,770	10385,280	-0,589	0,548	0,805
403	10222,313	10481,066	10222,910	10481,310	-0,597	-0,244	0,645
406	10235,000	10539,735	10234,920	10540,510	0,080	-0,775	0,779
414	10236,036	10559,082	10236,550	10558,740	-0,514	0,342	0,617
415	10236,306	10575,045	10236,690	10574,580	-0,384	0,465	0,603
416	10236,000	10583,367	10236,220	10582,750	-0,220	0,617	0,655
417	10240,242	10583,820	10240,310	10583,240	-0,068	0,580	0,584
418	10239,565	10592,054	10240,120	10592,010	-0,555	0,044	0,557
430	10186,882	10130,046	10187,040	10130,130	-0,158	-0,084	0,179
501	10236,351	10629,757	10236,850	10629,740	-0,499	0,017	0,499
502	10236,367	10633,481	10236,760	10633,430	-0,393	0,051	0,396
503	10237,289	10633,410	10237,620	10633,450	-0,331	-0,040	0,333
752	10029,249	10043,598	10029,110	10044,290	0,139	-0,692	0,706
803	10280,249	10572,056	10281,360	10572,400	-1,111	-0,344	1,163
925	10186,917	10344,271	10187,090	10344,420	-0,173	-0,149	0,228

³ A numeração deste pontos foi a mesma utilizada no levantamento topográfico

O desvio padrão e a média das diferenças de coordenadas dos pontos sobre o muro foram de 0,339 m e 0,601 m, respectivamente, sendo que a maior distância resultante entre as diferenças de coordenadas de 1,441 m, gerando um erro de representação gráfica de 0,28 mm. Na amostra de 49 pontos, verificou-se 4 pontos com erro superior a acuidade visual, o que representou 8,16% do total. No processo de monorestituição ocorre uma degradação na determinação das coordenadas de uma entidade restituída, a medida que a mesma se afasta do solo.

O levantamento das edificações foi realizado com trena e baliza, desprezando-se na maioria dos casos, a área ocupada pelo beiral. Por este fato, a comparação das coordenadas das edificações limitou-se somente àquelas em que não existia beiral, ou em locais onde os mesmos foram considerados no levantamento de campo (Tabela 11).

Tabela 12 - Comparação entre as coordenadas das edificações obtidas pela monorestituição e por levantamento topográfico

Pontos	Monorestituição		Topografia		Dif Coord		Resultante (m)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	
198	10239,520	10714,894	10241,12	10716,22	-1,600	-1,326	2,078
205	10282,195	10608,186	10283,67	10609,01	-1,475	-0,824	1,690
206	10278,431	10621,522	10279,34	10621,51	-0,909	0,012	0,909
220	10272,194	10598,000	10273,59	10597,83	-1,396	0,170	1,406
279	10076,167	10023,312	10076,12	10023,29	0,047	0,022	0,052
419	10239,477	10616,378	10240,30	10616,46	-0,823	-0,082	0,827
441	10235,740	10665,408	10235,60	10666,48	0,140	-1,072	1,081
443	10233,775	10347,494	10233,21	10347,90	0,565	-0,406	0,696
504	10237,389	10636,385	10237,52	10637,17	-0,131	-0,785	0,796
510	10235,043	10615,739	10237,22	10615,89	-2,177	-0,151	2,182
514	10241,415	10601,850	10240,19	10602,19	1,225	-0,340	1,271
812	10236,824	10591,813	10237,48	10591,96	-0,656	-0,147	0,672
813	10236,178	10601,038	10237,27	10601,55	-1,092	-0,512	1,206

O desvio padrão e a média das diferenças de coordenadas dos pontos sobre as edificações foram de 1,144 m e 0,594 m, respectivamente. A maior distância resultante entre as diferenças de coordenadas foi de 2,18 m, o que corresponde a um erro de representação gráfica de 0,44 mm. Na amostra de edificações, 38,46% dos pontos tiveram o seu erro superior a acuidade visual.

Tabela 13 - Comparação entre as coordenadas de muros obtidas por interseção de retas na monorestituição e por levantamento topográfico

Pontos	Monorestituição		Topografia		Dif. Coord		Resultado (m)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	
182	10235,57	10695,09	10235,12	10696,57	0,452	-1,475	1,543
183	10235,66	10679,33	10235,49	10680,60	0,172	-1,263	1,275
207	10276,21	10636,51	10277,52	10637,25	-1,308	-0,732	1,499
265	10172,94	10120,01	10172,77	10118,52	0,171	1,497	1,507
266	10165,75	10107,57	10164,75	10107,87	1,002	-0,299	1,046
326	10053,90	10074,16	10053,49	10074,20	0,413	-0,033	0,414
340	10034,78	10056,34	10034,93	10056,82	-0,149	-0,479	0,502
380	10174,13	10291,65	10173,02	10290,78	1,115	0,879	1,420
383	10180,95	10317,36	10179,69	10316,52	1,265	0,844	1,521
808	10273,22	10587,28	10274,92	10586,77	-1,698	0,510	1,773

O desvio padrão e a média das diferenças de coordenadas dos pontos definidos por interseção de retas sobre o muro foram de 1,144 m e 0,594 m, respectivamente. A maior distância resultante entre as diferenças de coordenadas foi de 1,77 m, o que corresponde a um erro de representação gráfica de 0,35 mm. Nesta amostra, 70% dos pontos tiveram o seu erro superior a acuidade visual.

4.8 - Classificação da Carta

De acordo com o Decreto Lei 89.817 de 20 de junho de 1984, o mapa planimétrico confeccionado a partir da monorestituição de fotografias de pequeno formato foi classificado como “A”, pois mais de 90% de seus pontos encontraram-se bem definidos. Tiveram erro inferior a 0,5mm e desvio padrão de 0,3 mm, na escala da carta (esses pontos foram testados isoladamente em campo). Para a escala de 1/5000, 0,3 e 0,5 mm correspondem a 1,5m e 2,5m, respectivamente. Como em toda a amostra não obteve-se nenhum desvio padrão e erro superior a estes valores, pode-se aceitar a metodologia, inclusive para restituição de edificações com apenas um pavimento.

Segundo SEVILLA (1991), o erro planimétrico em uma carta não deve ultrapassar a acuidade visual. Assim, na escala de 1/5.000, o erro deve ser inferior a 1,25 m. Neste caso, a metodologia mostrou-se eficiente para restituir feições sobre o solo e até 2 metros acima dele.

4.9 -Viabilidade Econômica

A viabilidade econômica da monorestituição de fotografias de pequeno formato digitalizadas será mostrada pela comparação do tempo de execução do trabalho e custo final com a topografia e a aerofotogrametria convencional.

Os custos do levantamento topográfico foram obtidos por pesquisa de mercado, sendo o valor final, a média da cotação realizada em 5 empresas especializadas em prestação de serviços topográficos em Goiânia - Goiás. O tempo gasto para a execução do levantamento (incluindo trabalho de campo e escritório) também foi estimado por tais empresas, chegando-se ao valor de R\$ 5.800,00 e 10 dias úteis para a execução do mesmo.

O mapeamento por aerofotogrametria convencional foi considerado inviável por

empresas que atuam na área.

Como no mercado não existem empresas atuando com monorestituição digital, adotou-se o seguinte critério para estimativa de custos: imaginou-se uma empresa composta por um profissional graduado com ganho mensal de R\$ 2.600,00 reais, trabalhando com três auxiliares com ganho mensal de R\$ 180,00 (cada). A Tabela 14 apresenta o custo e tempo de execução estimado para um trabalho de monorestituição.

Tabela 14 - Estimativa dos custos da confecção do mapa digital usando monorestituição

Especificação do trabalho	Unidade	Valor
Mão de obra para a implantação do alvos de pré-sinalização	2 d/h	28,80
Material dos alvos (Tintas, pincéis e moldes)		35,00
Obtenção das coordenadas dos alvos (Topografia)	4 d/e	499,20
Hora de voo	1	300,00
Revelação e fotografias		36,00
Conversão analógica/digital	06	300,00
Monorestituição	60 h/d	600,00
Total		1799,00

Onde:

d/h - Dia homem (serviço realizado mão de obra desqualificada);

d/e - dia equipe (um técnico e dois auxiliares);

h/d - Hora de um profissional diplomado.

Levando-se em consideração a ociosidade da mão de obra (geralmente compensada com o acréscimo de 25% da folha de pagamento), pagamento de encargos sociais (57% da folha de pagamento) e lucro de 50% do valor do serviço, este trabalho custaria

aproximadamente R\$ 3.000,00. O tempo de execução seria de 12 dias.

Tal resultado confirma a viabilidade econômica do procedimento adotado para pequenas aéreas.

5.0 - Conclusões e Recomendações

Conclui-se que:

A calibração da câmara forneceu os parâmetros necessários para realizar a correção dos erros sistemáticos da imagem. Esta correção influenciou diretamente sobre os resultados da aerotriangulação e da monorestituição, pois sem a mesma os resultados seriam degradados e não apresentariam a mesma precisão. A influência da calibração pode ser constatada nos resultados da aerotriangulação, onde realizou-se a mesma com e sem a correção dos erros sistemáticos da imagem, sendo os resultados diferentes, conforme o teste de hipótese realizado com o qui-quadrado no nível de significância de 5%.

A aerotriangulação usando alvos pré-sinalizados para a densificação dos pontos de controle mostrou-se eficiente, apresentando uma resultante de 0,035 mm quando comparando as coordenadas dos pontos de conferência obtidas por topografia com as obtidas por aerotriangulação. Este erro é inferior ao erro gráfico que é de 0,25 mm.

O mapa planimétrico na escala de 1/5.000, gerado a partir da monorestituição de fotografias aéreas de pequeno formato na escala de 1/9.000, atendeu as exigências do Decreto Lei nº 89.817, sendo classificado como “A”, pois mais de 90% dos pontos amostrados tiveram erro resultante inferior a 0,5 mm e desvio de 0,3 mm na escala da carta. Tal fato, foi observado inclusive para restituição de edificações, ou seja, a metodologia utilizada pode ser empregada para a realização de mapas cadastrais.;

A produção de mapas cadastrais em pequenas áreas utilizando a monorestituição de fotografias de pequeno formato, apresenta custo inferior a topografia e aerolevanteamento, apesar de necessitar de um maior tempo para a obtenção do produto final, fato perfeitamente

compensado pela diminuição dos custos.

Recomenda-se :

A utilização de uma aeronave equipada com instrumentos de navegação (GPS, bússola de precisão e altímetro) e um piloto que consiga orientar-se pelos mesmos;

O desenvolvimento de um equipamento capaz de manter a câmara na vertical, durante o processo de aquisição das fotografias, possibilitando assim fotos verticais;

Um estudo para a determinação da área máxima a ser mapeada, na qual prevaleça a relação custo/benefício, ou seja, a determinação do número máximo de fotografias, a partir da qual a relação custo/benefício seja igual ao da topografia;

O desenvolvimento de uma técnica que permita a monorestituição de objetos acima do solo, levando em consideração a sua altura, já que neste trabalho tal fato foi ignorado;

Testar a metodologia utilizando câmaras digitais, pois tal fato diminuiria os custos de produção com a eliminação do processo de conversão analógica/digital, além de agilizar o processo de confecção do mapa.

6.0 - Referências Bibliográficas

- ABEL-AZIZ, Y. I. & KARARA, H.M. **Photogrammetric Potentials of Non-Metric Cameras**. Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign – Urbana, Illinois, 1974.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) **NBR 13133 - Execução de Levantamento Topográfico**. Rio de Janeiro, 1994.
- ALDRISH, R. C.; BAILEY, W. F. & HELLER, R. C. Large-Scale 70 mm Colour Photography Techniques and Equipment and Theirs Application to Forest Sampling Problem. **Photogrammetric Engineering**, Vol. 25, 1959, pp. 747-754.
- ANDRADE, J. B. **Photogrammetric Refraction**. Columbus, Ohio, 1977. PhD dissertation - Department of Geodetic Science, The Ohio State University.
- BÄHR, H.P., ANDRADE, J. B. & OLIVAS, M. A. de A **Calibration and Resolution Test of Rollei-SLX Réseau Camera**. Anais IPRS - Camberra, Austrália, 1982.
- BROWN, D. C. Close-Range Camera Calibration. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol. 37, nº 8, 1971, pp. 855-866.
- BROWN, D. C. Decentring Distortion of Lenses. **Photogrammetric Engineering**, Vol. 32, nº 3, 1966, pp.444-462.
- BURROUGH, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Ressources Assessment**. Clarendon: Press - Oxford, 1989.
- Cardão, C. **Topografia**. Belo Horizonte: Edições Arquitetura e Engenharia, 1970.
- CHANOND, C. & LEEKBHAI, C. Small Format Aerial Photography for Analyzing Urban Housing problems: a Case study in Bangkok **I.T.C. Journal**, Vol.3, 1986, pp. 197-205.
- DISPERATI, A. A. **Obtenção e Uso de Fotografias Aéreas de Pequeno Formato**. Universidade Federal do Paraná - Fundação de Pesquisas Florestais, Curitiba, 1991.
- FARMER, L. D. & ROBE, R. Q. Photogrametric Determination of Iceberg Volumes. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol. 43, 1977, pp. 183-189.
- FRASER, C. S. On Use of Non Metric Camaras in Analytical Close-Range Photogrammetry. **The Canadian Surveyor**, Vol. 36, nº 3, 1982, pp. 259-279.
- FRYER, J. G. & BROWN, D. C. Lens Distortion for Close-Range Photogrammetry. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol. 52, nº 1, 1986, pp. 51-58.
- GALO, M. **Calibração e Aplicação de Câmaras Digitais** Curitiba, 1993. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

- GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações**. Curitiba: Editora da Universidade Federal do Paraná, 1994.
- GOBA, N. L. & SENESE, E. M. The Status of Supplementary Aerial Photography in Ontario. **Photogrammetric Record**, Vol. 80, 1992, pp. 283-291.
- HAGAN, G. F. & SMITH, J. L. Predicting Tree Groundline Diameter from Crown Measurements Made on 35 mm Aerial Photography. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol. 52, 1986, pp. 687-690.
- HALL, W. B. & WASSH, T. B. **Color Oblique Stereo Aerial Photographs for Planning rapid Geological Reconnaissance and Other Types of Geological Programs**. Wyoming Geological Association Guidebook, pp. 741-760, 1977
- HIBY, A. R.; THOMPSON, D & WARD, A. J. **Census of Grey Seals by Aerial Photography**. **Photogrammetric Record**, Vol. 12, 1988, pp. 589-594.
- KENNEFICK, J. F. Ultra Precise Analytics. **Photogrammetric Engineering**, Vol. 37, nº 11, 1971, pp. 1167-1187.
- KOLBI, O. R. Metric or Non Metric Cameras. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol. 42, nº 1, 1976, pp. 103-113.
- KURE, J. Oberschwaben Reseau Investigation. **Photogrammetria**, Vol 27, 1971, pp. 169-199.
- LUGNANI, J. B. **Introdução à Fototriangulação**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1987.
- MAKAROVIC, B. Digital Mono-Ploters. **I.T.C. Journal**, Vol. 1, 1973, pp. 101-122.
- MAKAROVIC, B. Progressive Sampling for Digital Terrain Models. **ITC Journal**, Vol. 3, 1973, pp. 397-416.
- MARSHALL, A.R. **Network Design and Optimization in Close Range Photogrammetry**. Kensington, Austrália, University of New South Wales, 1989.
- MCCARTHY, J.; OLSON JR, C.E. & WITTER, J. A. Evaluation of Spruce-Fir Forests Using Small Format Photographs. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol. 48, 1982, pp. 771-778.
- MEIER, H. K. Film Flattening in Aerial Camaras. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol. 38, nº 4, 1972, pp. 367-372.
- MIKHAIL, E **Introduction to Metrology Concepts**. Photogrammetry & Surveying, 1985.
- MILLER, C. L.& LAFLAMME, R. A. The Digital Terrain Model - Theory & Application. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Vol. 24, nº 3, 1958, pp. 433-442.
- MINISTÉRIO DO EXÉRCITO **Aerotriangulação**. Manual Técnico T34-304. 2ª Edição

1984.

- MITISHITA, E. A. **Monorestituição Digital de Aerofotos, Associada com Sistema de Computação Gráfica C.A.D., para fins de Mapeamento na Área Florestal** Curitiba, 1997. Dissertação (Doutorado em Ciências Florestais) Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná.
- MORGAN, K. M.; MORRIS-JONES, D. R.; LEE, G. B. & KIEFER, R.W. Airphoto Analysis of Erosion Control Practices. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol. 46, 1980, pp. 637-640.
- MORGAN, K. M.; MORRIS-JONES, D. R.; LEE, G. B. & KIEFER, R.W. Cropping Management Using Color and Color Infrared Aerial Photographs. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol. 45, 1979, pp. 769-774.
- OLIVAS, M. A. de A. **Calibração de Câmaras Fotogramétricas**. Curitiba, 1980. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
- OLIVAS, M. A. de A. **Imagens Digitais**. Curitiba, 1995. Boletim - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
- OLIVEIRA, C. de **Dicionário Cartográfico**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 3ª edição, Rio de Janeiro, 1987.
- PAINE, D. P. & MCCADDEN, R. J. Simplified Forest Inventory Using large-scale 70 mm Photography and Tariff Tables. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol. 54, 1988, pp. 1423-1427.
- POLLÉ, V. F. L. Population Estimation of non-Homogenous Residential Áreas. **I.T.C. Journal**, Vol.2, 1984, pp. 116-122.
- POOLE, P. J. The Prospects for Small Photography in Arctic Animal Surveys. **Photogrammetric Record**, Vol. 13, 1989, pp. 229-236.
- SAYN-WITTGENSTEIN, L. & ALDRED, A. H. Tree Size from Large-Scale Photos. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol. 45, 1972, pp. 971-973.
- SCARIN, P. L. & TEIXEIRA, L. A. Digitalização e Conversão Raster/Vector de Mapas. **Fator GIS**, nº 6, 1994, pp. 16-21.
- SEVILLA, M. J. de L. Criterios de Precision Cartografica. **Catastro**, nº 8, 1991, pp. 12-20.
- SILVA, D. C. **Considerações Práticas em Fotogrametria a Curta Distância Aplicada ao Levantamento de um Tanque e a Questão de Precisão e Exatidão**. Curitiba, 1995. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
- TORGE, W. **Geodesy**. Walter de Gruyter, Berlin, 1980.

- TOZZINI, D. S.; HERKENHOFF, F.E DISPERATI, A. A. **Mapeamento dos Danos Causados por um Incêndio Florestal em Reflorestamento de Pinus taeda através de fotografias aéreas Obíquas e Imagens MSS Landsat**, Simpósio Brasileiro de Sensoramento Remoto, Vol. 3, 1984.
- TUELLER, P. T.; LENT, P. C.; STAGER, R. D.; JACOBSEN, E. A. & PLATOU, K. A. Rangeland Vegetation Changes Measured form Helicopter-borne 35 mm Aerial Photography. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol. 47, 1988, pp. 609-614.
- VANICEK, P & KRAKIWSKY, E **Geodesy: The Concepts**. Elsevier, Amsterdam, 2^a ed., 1986.
- WARNER, W.S., GRAHAM, R. W. & READ, R. E. **Small Format Aerial Photography**. Whittles Publishing Services, Scotland, UK, 1996.
- WEIBEL, R. & HELLER, M. **Digital Terrain Modelling**. In: MAGUIRE, D. J.; GOODCHILD, M. F. & RHIND, D. W., **Geographical Information Systems: Principles**. 1^a ed. New York: John Wiley and Sons, 1991.

Anexo 1

Mapa realizado por levantamento topográfico pela Escola Técnica Federal de Goiás.

Anexo 2

Cálculos para a execução do vôo

Determinação da altura de vôo (H)

$$H = \frac{f}{E} \therefore H = \frac{0.050}{\frac{1}{9000}} \therefore H = 500\text{m}$$

Onde:

H - Altura do vôo acima do solo;

f - Distância focal da câmara em metros;

E - Escala do negativo.

Determinação da base estereoscópica (B)

$$B = 0.40 * \frac{g}{E} \therefore B = 0.40 * \frac{0.06}{\frac{1}{9000}} \therefore B = 216\text{m}$$

Onde:

g - Lado do negativo em metros

Determinação do intervalo entre duas linhas de vôo (I)

$$I = 0.7 * \frac{g}{\frac{1}{9000}} \therefore I = 0.7 * \frac{0.06}{\frac{1}{9000}} \therefore I = 378\text{m}$$

Determinação do intervalo de tempo entre duas exposições consecutivas (T)

$$T = 0.40 * \frac{g}{V * E} \therefore T = 0.40 * \frac{0.06}{36 * \frac{1}{9000}} \therefore T = 6.0s$$

Onde:

V - Velocidade do avião em m/s

Determinação do tempo de exposição (t)

$$t = \frac{a}{V * E} \therefore t = \frac{0.00005}{36 * \frac{1}{9000}} \therefore t = 0.0125 \therefore t = \frac{1}{80} s$$

Numero de fotos para recobrimento da área (N)

$$N = \frac{S}{s} \therefore N = \frac{0.7}{0.540 * 0.216} \therefore N = 6$$

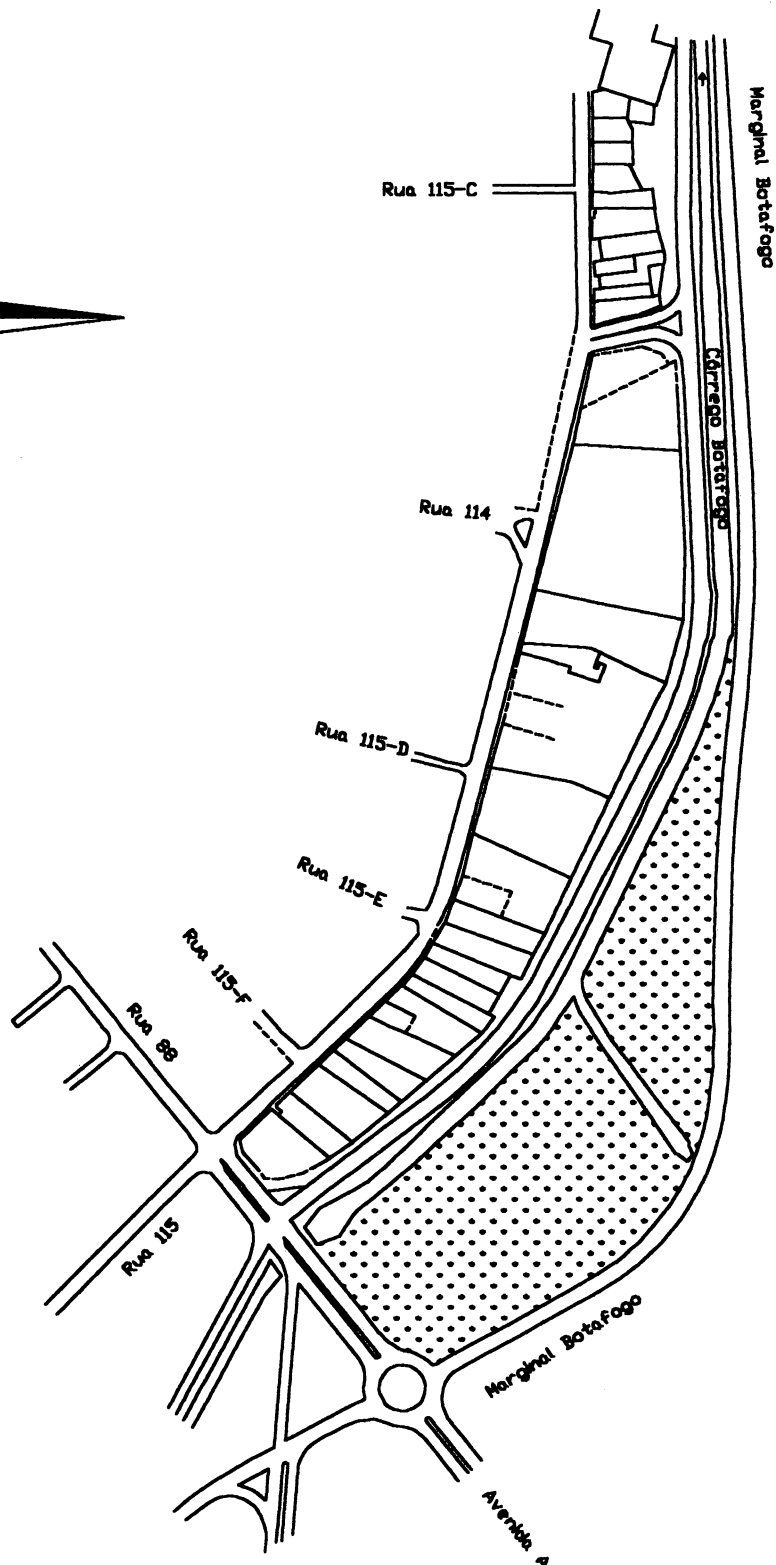
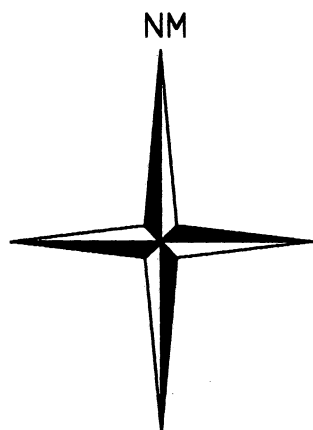
S - Superfície a ser recoberta em m²;

s - Superfície recoberta por uma fotografia, em m².⁴

⁴ As dimensões úteis da imagem fotografada é de 216 x 540m ao invés de 216 x 378m, pois o voo foi composto de uma única faixa.

Anexo 3

Mapa obtido por monorestituição de fotografias aéreas de pequeno formato



0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 metros

Universidade Federal do Paraná - UFPR		
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - CPGCG		
Projeto:	Monorestituição de Fotografias Aéreas de Pequeno Formato Digitalizadas em Escala de 1:9200	
Prop.:	Prefeitura Municipal de Goiânia	Escala: 1:5000
Mestrando:	João Batista Ramos Cortes	Data: janeiro/98
		Prancha: 1/1