

I – CONCEITOS BASICOS

1 – Introdução

A ortofoto é um tema que desperta interesse da comunidade científica há pelo menos três décadas. Houve interesse do autor em investigar os procedimentos, precisão e a tecnologia adotada para o ajuste automatizado de imagens juntamente com a combinação do processamento digital.

Ao gerar uma ortofoto, busca-se a representação matemática da distribuição espacial da característica de um fenômeno vinculada a uma superfície real (rios, vales, picos, entre outros). A superfície é em geral contínua e o fenômeno que representa pode ser variado. Por este motivo utiliza-se o Modelo Digital de Terreno (MDT), para representar a superfície e gerar a ortofoto.

A utilização do MDT permite, por exemplo, armazenar dados de altimetria, elaboração de mapas de declividade, entre outras possibilidades.

Para obter os dados que permitem gerar o MDT utiliza-se a aerotriangulação. Uma técnica fotogramétrica utilizada para determinação das coordenadas do terreno dos pontos escolhidos sobre um conjunto de fotografias aéreas superpostas.

As coordenadas do terreno dos pontos escolhidos são obtidas através dos pontos de apoio lidos no sistema GPS. O sistema **GPS**, também chamado de **NAVSTAR** (Navigation Satellite Time And Ranging) foi concebido de forma que em qualquer lugar do mundo e a qualquer momento a posição geográfica de um ponto da superfície terrestre seja determinada.

2 – Conceitos Fundamentais

A ortofoto é uma imagem retificada isenta de distorções devido à geometria (posição e inclinação) e ao deslocamento devido ao relevo. Quando se conhece a inclinação, posição e distorção da câmera aérea no instante da tomada de uma foto aérea é possível restabelecer o centro de projeção e calcular as coordenadas de terreno de pontos desta foto.

Pode-se destacar as principais vantagens da ortofoto em relação ao mapa como sendo os seguintes:

- A) - A ortofoto não está pré-interpretada como um mapa. Isto dá oportunidade ao usuário de extrair as informações desejadas a qualquer momento.
- B) - Os atributos geométricos da ortofoto são os mesmos de um mapa com a vantagem da riqueza de dados pictóricos.
- C) - Fornece ao usuário uma visão do terreno muito mais compreensível que um mapa, informações visuais completas e suscita a discussão de soluções otimizadas.

ANDRADE (1998) afirma que a ortofoto digital é uma imagem digital submetida à projeção cartográfica, pode ser gravada na mídia eletrônica ou nas tradicionais impressões em papel. São, portanto, imagens que podem ser tratadas com os inúmeros recursos já disponíveis e aqueles que ainda virão na área de processamento digital de imagens (PDI). Um dos componentes primordiais para a feitura e a garantia de qualidade métrica da

ortofoto é o modelo digital de terreno (MDT) - modelar um terreno significa reproduzir sua forma.

ALMEIDA (1989) concluiu no estudo desenvolvido na dissertação intitulada *Ortofoto digital* que a ortofoto pode ser produzida com a adoção de dois métodos: direto ou indireto.

3 - Ortofoto Analógica

A ortofoto analógica é uma imagem que sob uma emulsão fotossensível pode conter informações e detalhes da superfície fotografada.

As imagens gravadas podem suceder os seguintes procedimentos:

- A) Escolha dos pontos fotogramétricos;
- B) Marcação dos pontos fotogramétricos;
- C) Transferência dos pontos fotogramétricos;
- D) Medição de coordenadas;
- E) Correção de erros sistemáticos;

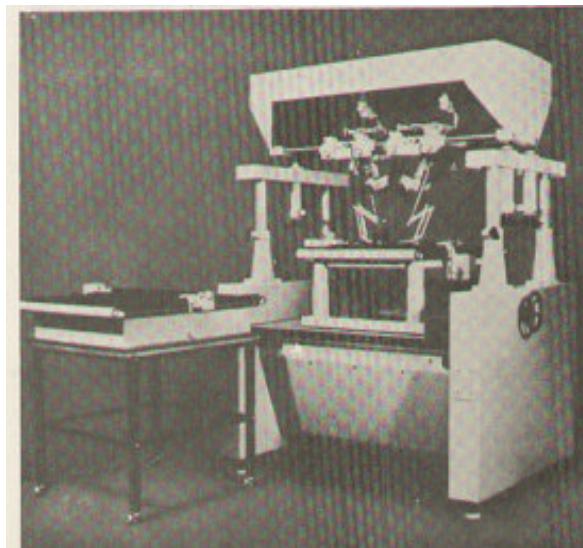


Figura – 1.1 – Ortofotógrafo / Estereoplottador SFOM – modelo 920

O ortofotógrafo (figura 1.1) é um aparelho que converte as fotografias perspectivas convencionais, notadamente de projeção cônica, na equivalente fotografia de projeção ortogonal. Os procedimentos realizados com os recursos óptico-mecânicos fazem o plano da imagem na câmara ser paralelo ao plano de referência a todos os raios correspondentes à imagem. Não haverá deslocamento das imagens devido à inclinação ou relevo e o resultado será uma fotografia que corresponde a um mapa com escala uniforme. Assim sendo, as distâncias horizontais medidas nessas fotografias, são corretas, negligenciando-se o relevo da terra. Isto é uma prova contrastante do deslocamento do relevo nas fotografias-perspectiva convencionais. Se a fotografia-perspectiva convencional sofreu uma inclinação no momento da exposição é evidente que há uma distorção na escala. A fotografia

ortográfica, por definição, não tem inclinação e, portanto não tem distorção na escala e são denominadas de ortofotografias.

Uma ortofotografia é o equivalente de uma fotografia ortográfica da terra tomada de um ponto no espaço. Isto pode ser feito removendo-se os efeitos da inclinação, relevo e muitas das aberrações das lentes a partir de fotografias perspectivas convencionais da terra. O uso de retificadores, em terrenos planos, é possível preparar mosaicos aéreos com características geométricas correspondendo plenamente com as posições verdadeiras dos mapas. Torna-se impossível usar medidas nas escalas verdadeiras utilizando a mesma técnica com fotografias tiradas de um terreno acentuado.

Para esclarecer melhor essa situação os retificadores são muito úteis na preparação de mosaicos aéreos, sendo compostos de fotografias selecionadas e retificadas de áreas com declives aproximados. Uma perfeita solução para o problema da retificação no caso do relevo da terra, consiste em retificar todo o negativo através de “linhas de varredura” (**strips**). A técnica permite a retificação de terreno suavemente ondulado a montanhoso, com o desejado grau de acuracidade, dependendo da largura do orifício que irá “varrer” a área e a velocidade de “varredura”.

Assim, a fotogrametria torna realidade à obtenção do verdadeiro foto-mapa. Durante esse período foi comprovada a obtenção de foto-mapas, para a revisão de mapas e preparação de mosaicos aéreos de terrenos desiguais ou acidentados.

Pode-se obter fotografias do ortonegativo em qualquer escala por meio de uma câmara copiadora usada como uma impressora de projeção. O ortofoto tem suas limitações como pouca precisão planimétrica, onde o erro pode ser muito pequeno (menos do que 0,1mm); seria muito difícil reduzir esse erro para a ordem de 0,01 mm e talvez desnecessário para a maioria dos usos do ortofoto.

04 - Ortofoto Digital

Segundo ANDRADE, (1998), a ortofoto digital é uma imagem digital em projeção cartográfica.

As ortofotos digitais são imagens fotográficas, onde as feições nela contidas são apresentadas em suas verdadeiras posições digitais, geometricamente equivalentes a um mapa de linhas e símbolos, onde, a medida de posição, distância, ângulos horizontais e áreas, podem ser feitos diretamente.

Para confeccionar uma ortofoto digital, um novo arranjo de pixels deve ser feito, pois, compondo um mosaico de duas ou mais ortofoto digitais obtém-se uma ortofoto e observando ambas é possível pode-se concluir que cada pixel, numa ou noutra, estará implicitamente georeferenciado.

As ortofotos digitais são de fácil manuseio, permitindo a extração de um grande numero de informações em razão de sua riqueza de detalhes.

Estas imagens que podem ser trabalhadas com os inúmeros recursos já disponíveis e aqueles que ainda virão na área de processamento de imagens digitais. Um dos requisitos para elaboração de ortofotos digitais é o modelo digital de terreno MDT (figura 1.2), modelar um terreno significa reproduzir sua forma.

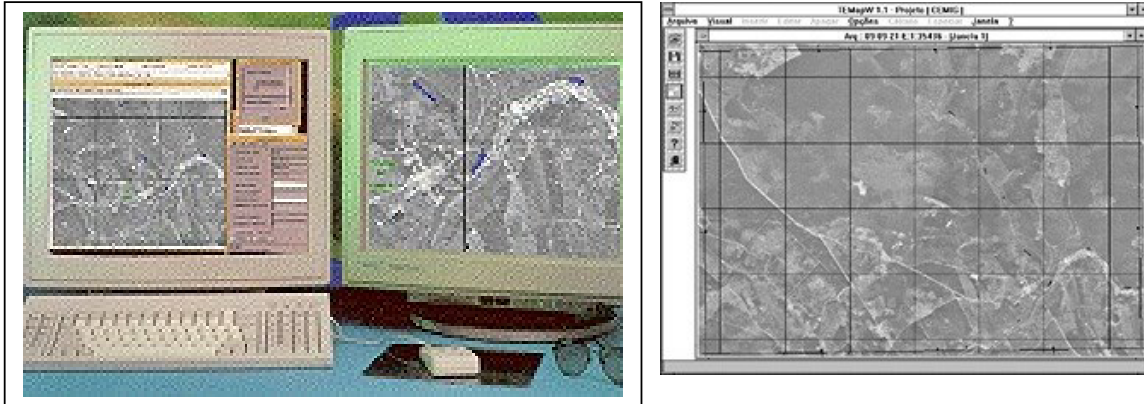


Figura 1.2 - Tratamento de Imagem Digital e Geração de Ortofoto Digital no Sistema Computacional. Socet Set da LH Systems – CEMIG/MG

5 – Tipos de métodos

5.1 – Método Direto

O **método direto** para a produção de ortofoto digital parte de coordenadas de máquina e reprojeta o tom de cinza, a elas associadas, sobre uma malha regular da ortofoto (figura 1.3). Para isto, as coordenadas de máquina (referencial digital) são transformadas em coordenadas do espaço-imagem (sistema de referência fotogramétrico) através do modelo matemático da transformação afim geral no plano. Em seguida, as coordenadas do espaço-imagem são transformadas em coordenadas do espaço-objeto através da inversa da equação de colinearidade.

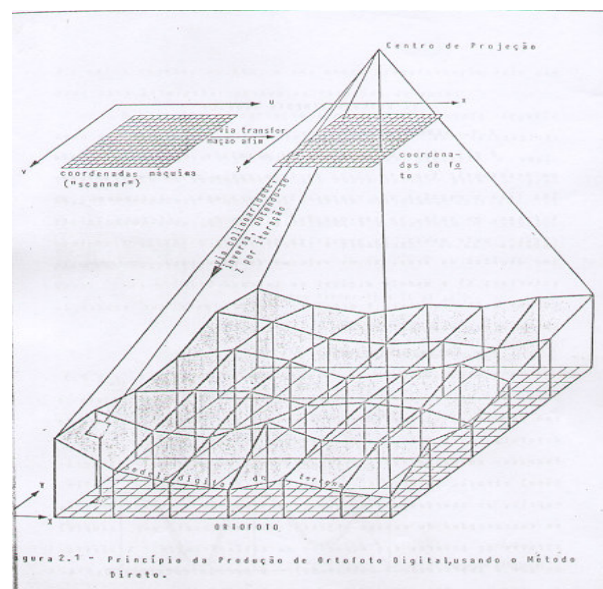


Figura 1.3: Princípio de produção de Ortofoto digital pelo método direto

5.2 – Método Indireto

O **método indireto** contempla uma metodologia que busca transformar inicialmente as coordenadas do espaço-objeto (elementos contidos no plano da superfície adotada como referência) em coordenadas do espaço-imagem (elementos contidos no plano da imagem) aplicando as equações de colinearidade (figura 1.4). A seguir, transformam-se as coordenadas do espaço-imagem em coordenadas de máquina aplicando as equações da transformação afim. Uma vez obtido as coordenadas do espaço-imagem, busca-se o tom de cinza numa matriz gerada pela digitalização matricial da fotografia aplicando-se interpolação - método usualmente conhecido no processamento digital como reamostragem, ou busca-se diretamente na fotografia extraíndo-o através digitalização matricial não-ortogonal, ou seja, o tom de cinza da foto é extraído discretamente. Este método exige menor custo operacional do que o método direto.

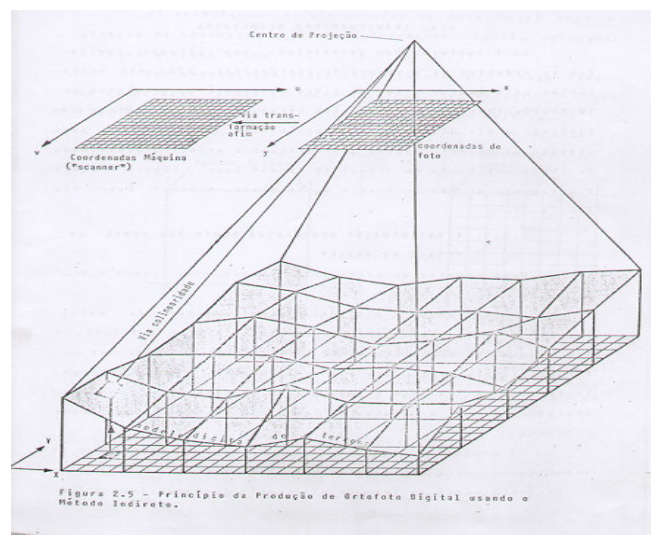


Figura 1.4 – Princípio de produção da Ortofoto digital pelo método indireto

6 – Ortoprojeção

A ortoprojeção digital pode ser realizada em qualquer plano cartográfico, ANDRADE (1998). É necessário que os dados de posição, atitude da câmera e as coordenadas planas da superfície terrestre estejam referenciados ao sistema de projeção em que se deseja registrar a ortofoto. A construção de uma ortofoto digital é realizada com o auxílio da orientação interior, função das características da câmara e a orientação exterior – determinação dos parâmetros de orientação exterior. Quais sejam, as coordenadas cartesianas do centro perspectivo (CP) da foto(X_0, Y_0, Z_0) e a atitude da câmara no momento da exposição (κ, ϕ e ω).

Segundo TSAI (1999) a edição nas ortofotos tem por objetivo:

- A) Fazer o controle de qualidade;

- B) Inserir informações complementares: curvas de nível, que podem ser geradas em MDT, nomenclatura, rede de projeção cartográfica, convenções, etc. sobrepor traçados de engenharia;
- C) - preparar dados para gravar em meios computacionais; ex. CD;
- D) - preparar dados para impressão, quando solicitado.

7 – Modelos Digitais de Terreno - MDT

O Modelo Digital de Terreno – MDT pode ser definido como uma representação matemática da distribuição espacial da característica de um fenômeno vinculada a uma superfície real. A superfície é em geral contínua e o fenômeno que representa pode ser variado. Dentre alguns usos do MDT pode-se citar:

- A) - Armazenamento de dados de altimetria para mapas topográficos;
- B) - Análises de corte-aterro para projeto de estradas e barragens;
- C) - Elaboração de mapas de declividade e exposição para apoio à análise de geomorfologia e erodibilidade;
- D) - Análise de variáveis geofísicas e geoquímicas;
- E) - Apresentação tridimensional (em combinação com outras variáveis).

Para a representação de uma superfície real no computador é indispensável à criação de um modelo digital, podendo ser por equações analíticas ou por uma rede de pontos na forma de uma grade de pontos regulares e ou irregulares. A partir dos modelos podem-se calcular volumes, áreas, desenhar perfis e seções transversais, gerar imagens sombreadas ou em níveis de cinza, gerar mapas de declividade e exposição, gerar fatiamentos em intervalos desejados e perspectivas tridimensionais.

No processo de modelagem numérica de terreno podemos distinguir três fases: aquisição dos dados, geração de grades e elaboração de produtos representando as informações obtidas.

A superfície de um terreno, em função da complexidade das variações do modelado do terreno, é impossível de ser representada matematicamente em todos os seus detalhes, sendo necessário, uma criteriosa filtragem de dados, cujos valores discretos sejam representativos e permitem uma representação fiel do terreno. Desta forma é importante assinalar os pontos notáveis de máxima e mínima cota, mudança de declive, linhas de cumeeada ou vale, linhas d'água e outras feições que podem minimizar as distorções da posterior interpolação.

A elaboração do algoritmo para dividir uma região é complexa; sugere-se utilizar a triangulação de Delaunay. A composição de superfícies é feita baseando-se em cada função interpoladora no triângulo. O desenho das curvas de nível pode ser feito baseando-se na equação correspondente a cada triângulo, ou com a geração de uma malha quadrada de referência.

8 - AEROTRIANGULAÇÃO

A aerotriangulação pode ser definida como uma técnica fotogramétrica utilizada para determinação das coordenadas do terreno dos pontos escolhidos sobre um conjunto de fotografias aéreas superpostas.

MITISHITA (1986) afirma que a aerotriangulação é considerada o método de maior aplicabilidade na extensão do controle e orientação absoluta dos modelos fotogramétricos na restituição estereofotogramétrica.

Os primórdios das práticas destinadas a aerotriangulação datam do início do século vinte. Métodos gráficos de aerotriangulação radial determinavam as coordenadas planas no espaço objeto de pontos imageados nas fotografias. Mas o maior empecilho para o seu desenvolvimento era a imprecisão instrumental e o volume de cálculo. Na década de 30 os métodos gráficos foram substituídos pelos analógicos mecânicos. A aerotriangulação passou a ser desenvolvida nos instrumentos analógicos de multiprojetores.

8.1 – Métodos de Aerotriangulação

8.1.1 – Método Analógico

No método analógico é realizado no modelo fotogramétrico, reconstituído a posição relativa idêntica ao instante da tomada da foto. De outro modo afirma-se que, teoricamente, o modelo após uma série de rotações, translações e uma ampliação, coincidirá com o terreno. É separado o efeito da refração e da curvatura terrestre para a compreensão deste método, pois tais efeitos poderão ser corrigidos posteriormente. As medidas são normalmente realizados em aparelhos fotogramétricos universais, possuidores de dispositivo ótico mecânico para uso de base interna e base externa, tal dispositivo possibilita a orientação continua de todos os pares de fotos de uma faixa, sempre pela manutenção da segunda foto do par anterior na câmera do projetor, sem alterar seus elementos de orientação.

Neste método são apontadas as seguintes desvantagens:

- a) intervenção humana na ligação dos modelos;
- b) necessidade de emprego de aparelhos especiais, dotados de dispositivo para inversão de base e de movimentos que possibilitem a orientação relativa com uma câmera fixa de custo elevado se comparado à câmera não métrica.
- c) - a perda de tempo para forçar às coordenadas dos modelos posteriores coincidirem com as anteriores

8.1.2 – Método Analítico

No método analítico a medição é realizada apenas no plano da foto. Em cada foto, as coordenadas (x, y) , onde as orientações são realizadas analiticamente a partir das coordenadas de foto e da distância focal da câmera. As seguintes soluções baseiam-se na *condição de colinearidade* ou na *condição de coplanaridade*. Sendo que na colinearidade

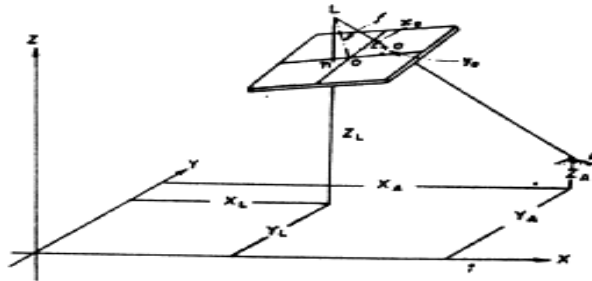


Figura 1.5 – Condição de colinearidade

um ponto objeto e sua respectiva imagem na foto, se encontram sempre na mesma reta (figura 1.5).

Na condição de coplanaridade, (figura 1.6), as duas estações de exposição de um estereopar, qualquer ponto objeto e suas correspondentes imagens nas duas aerofotos, estão contidas no mesmo plano.

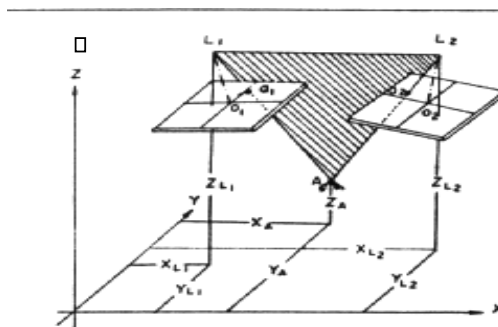


Figura 1.6 – Condição de coplanaridade.

Neste método existem dois procedimentos: **o seqüencial e o simultâneo**.

No seqüencial, a orientação relativa é executada após a medição das coordenadas de foto. Dá-se tratamento similar ao adotado no método semi-analítico, no que se refere ao ajustamento da faixa ou do bloco (figura 1.7). **No simultâneo**, as coordenadas de foto (x, y) são os dados de entrada para o programa de ajustamento.

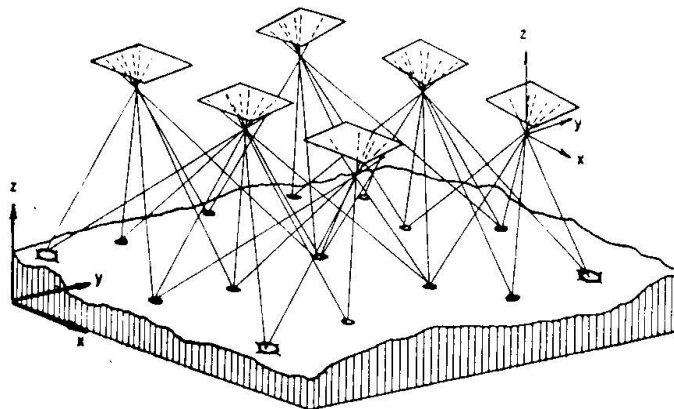


Figura 1.7: Ajustamento de fotos ou feixes de raios perspectivas (Bundle Block Adjustment)

Vantagens do método analítico:

- Alta precisão, tornando seu uso conveniente às escalas grandes;
- Utilização de equipamentos mais simples e de custo mais baixo;
- Medição muito simples, não exigindo grande experiência dos operadores;
- Como as medições são feitas no plano da foto, não existe limitação de distância focal para o instrumental.

As desvantagens podem ser indicadas pelo grande volume de cálculo, exigindo uso de computadores com capacidade maior que a necessária aos outros métodos (vide figura 1.7).

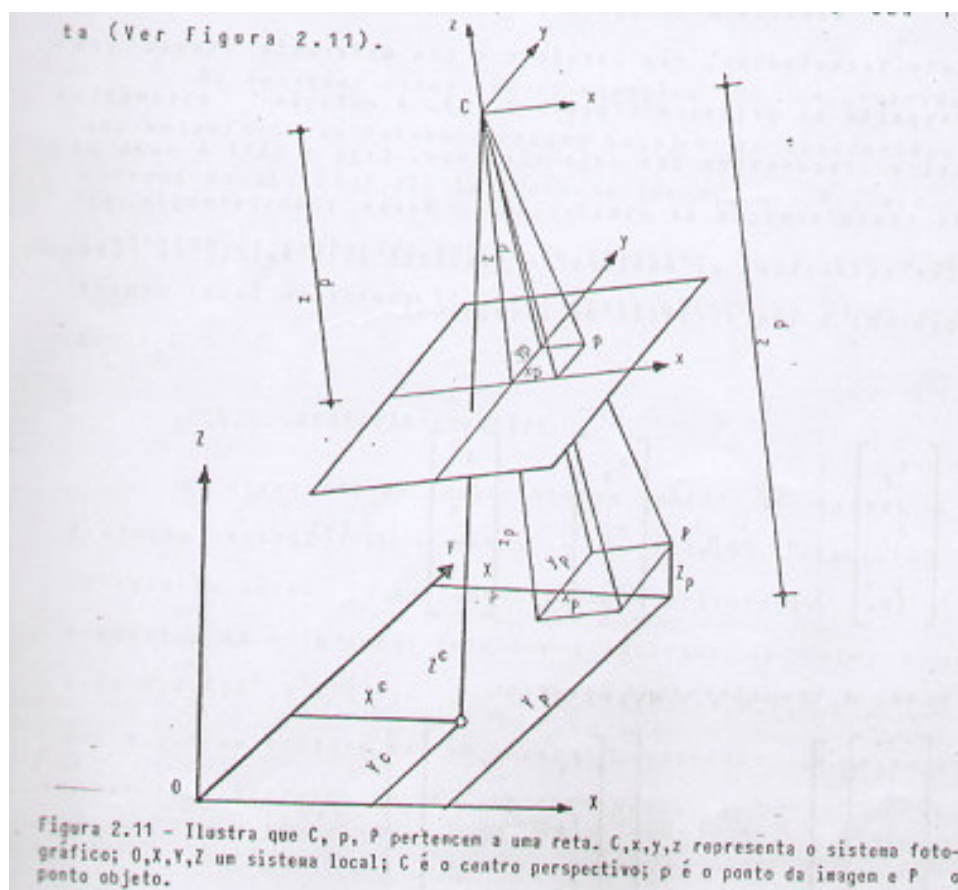


Figura 1.8: Mostra a equação de colinearidade sendo utilizada em uma retificação analítica, segundo Lugnani. A figura mostra que C, p, P pertencem a uma reta. C, x, y, z , representa o sistema fotográfico; O, X, Y, Z , um sistema local; C é o centro perspectivo; p é o ponto de imagem. E P é o ponto objeto.

A aerotriangulação digital (figura 1.8) (figura 1.9) é realizada a partir de medições com estações fotogramétricas digitais e softwares específicos, baseando na correlação digital de imagem. Sendo que esta operação é realizada normalmente com a utilização da estação fotogramétrica

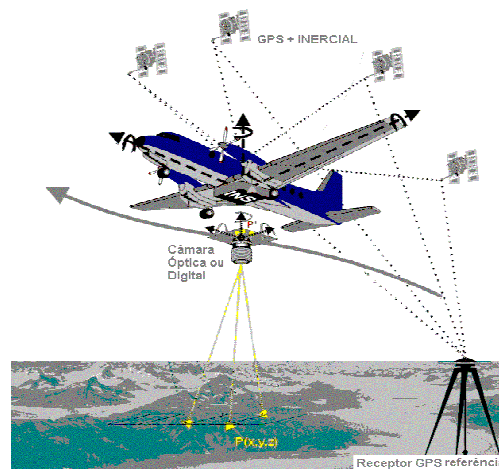


Figura 1.9 – Esquema básico da Aerotriangulação Digital

A confecção de produtos cartográficos no sistema digital permite aos usuários, executarem com mais precisão as atividades do projeto, pois, a visualização é completa e mais rápida, permitindo análises e correções.

Para se formar um bloco de aerofotos é necessário usar operações de **orientação interior** e **exterior**. Concluída as orientações os blocos estarão aerotriangulados (figura 1.10).



Figura 1.10 - Blocos de aerofotos aerotriangulados

8.2 – Orientação Interior

A orientação interior permite a reconstrução do feixe perspectivo que gerou as perspectivas, ou seja, as fotografias, ou seja, é a recuperação da posição da fotografia em relação à câmera.

Nos aparelhos analógicos esta orientação é feita forçando a coincidência das marcas fiduciais da câmera com as correspondentes marcas no restituidor e ajustando a distância principal do restituidor para coincidir com a câmera fotogramétrica. E por este motivo que os instrumentos analógicos só aceitam um valor de distância focal, permitindo apenas uma pequena variação.

Nos aparelhos analíticos a orientação interna é executada a partir de um arquivo com os parâmetros necessários, são as coordenadas calibradas das marcas fiduciais; o valor das coordenadas do ponto principal; a distância focal calibrada e os parâmetros das distorções radiais simétricas e descentrada.

Em geral uma transformação afim geral é utilizada para transformar coordenadas de máquina para o sistema fiducial. Esta transformação absorve o trabalho do filme, garantindo a boa qualidade métrica. Portanto, é importante ter um arquivo do certificado de calibração de cada câmera fotogramétrica.

Baseando nos dados coletados, todas as coordenadas lidas de cada imagem fotogramétrica, podem ser transformadas para o sistema fiducial ou o fotogramétrico, com uma transformação que absorva o trabalho do filme e com a correção de outros erros sistemáticos, como os provocados pelas distorções da objetiva da câmera. Na recuperação do feixe perspectivo deve ainda considerar a refração fotogramétrica total (atmosférica e a provocada pelo deslocamento da aeronave).

8.3 – Orientação Exterior

Esta operação permite a recuperação da posição e atitude de cada aerofoto segundo um referencial terrestre – em geral aquele em que se pretende realizar o trabalho fotogramétrico.

Uma aerofoto pode ser orientada externamente quando se conhecem as coordenadas **XO**, **YO** e **ZO** do ponto de onde foi tomada (centro de perspectiva), bem como os ângulos que definem a sua atitude, como, por exemplo, os ângulos de Euler: ϖ, ϕ, χ .

Estes ângulos representam rotações que se aplicadas ao sistema terrestre fazem-no coincidir com o fotogramétrico.

São doze os parâmetros para a determinação da orientação externa de um par de aerofotos.

Os parâmetros são calculados na aerotriangulação de um bloco de aerofotos, ou em cada foto isolada quando são conhecidas as coordenadas de três ou mais pontos.

Nos instrumentos analógicos a orientação externa é feita em duas etapas: orientação relativa e a orientação absoluta, pois, em geral não existem dispositivos de leitura de coordenadas e de ângulos.

8.3.1 – Orientação Relativa

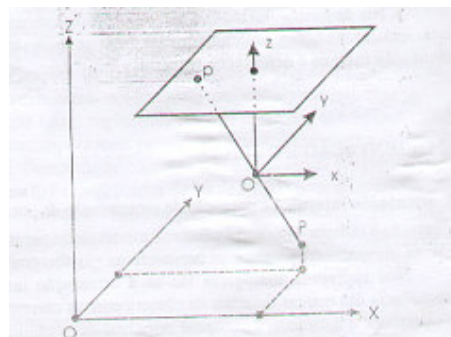


Figura: 1.11 – Orientação Relativa

Segundo ANDRADE (1998) a orientação relativa é a etapa destinada a promover a medição da coordenada do centro perspectivo (cp), as coordenadas dos pontos de apoio suplementar e a atitude da câmara para o consecutivo de aerofotos. Não depende, portanto, do referencial terrestre.

O princípio defendido por Gruber prevê que quando cinco raios homólogos do par estereoscópico se cruzam, todos os demais pontos residentes na área de sobreposição longitudinal se cruzarão. O método de Gruber levado ao termo, para os aparelhos de restituição, tradicionalmente utilizados conduz a obtenção de um modelo estereoscópico do terreno sem escala (figura 1.11).

Cinco condições são impostas e cinco parâmetros dos doze da orientação externa são aqui determinados.

Partindo do princípio que as fotografias aéreas tenham sido feitas com o eixo óptico da câmara bem próximo da vertical, é possível dizer que os valores aproximados da orientação de uma aerofoto em relação à outra são conhecidos. Desta forma é possível adotar os diferenciais das equações projetivas para a determinação dos parâmetros de orientação.

Podemos entender orientação relativa como a determinação do sistema fotogramétrico de uma fotografia em relação ao de outra. A resolução do sistema de equações pode ser realizada por métodos analíticos ou por processos ópticos mecânicos de resolução.

Se considerarmos $\mathbf{O}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$ é o sistema de coordenadas de máquina; $\mathbf{o}, \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ é o sistema de coordenadas fotogramétricas; “ \mathbf{P} ” é um ponto do espaço-objeto e “ \mathbf{p} ” é a imagem de “ \mathbf{P} ”.

$$\mathbf{P} \rightarrow \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_m ; \mathbf{p} \rightarrow \begin{Bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{Bmatrix}_m ; \mathbf{p} \rightarrow \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}_f ; \mathbf{o} \rightarrow \begin{Bmatrix} X0 \\ Y0 \\ Z0 \end{Bmatrix}_m$$

Os pontos \mathbf{P}, \mathbf{o} e \mathbf{p} estão alinhados. Assim no sistema de máquina, seus vetores de posição têm de atender as relações abaixo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{x - x0}{z - z0} = \frac{x' - x0}{z' - z0} \\ \frac{y - y0}{z - z0} = \frac{y' - y0}{z' - z0} \end{array} \right\} \text{ (eq. 01)}$$

O vetor $\{X', Y', Z'\}_m^T$ pode ser substituído pelo vetor $\{x, y, c\}_f^T$ através da transformação:

$$\begin{Bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{Bmatrix}_m = \frac{1}{k} \times M^T \begin{Bmatrix} x \\ y \\ c \end{Bmatrix}_f + \begin{Bmatrix} X0 \\ Y0 \\ Z0 \end{Bmatrix}_m \text{ (eq. 02) ou } \begin{Bmatrix} X' - X0 \\ Y' - Y0 \\ Z' - Z0 \end{Bmatrix}_m = \frac{1}{k} \times M^T \begin{Bmatrix} x \\ y \\ c \end{Bmatrix}_f \text{ (eq. 03)}$$

onde, M^T é a matriz transposta de M (e sua inversa, por ser ortogonal) obtida do produto de três matrizes de rotação numa determinada ordem, dando a transformação foto-máquina.

Os instrumentos analógicos são diferentes entre si e possuem características construtivas quanto aos movimentos disponibilizados para cada porta-foto, isto exige uma orientação relativa específica para cada tipo de instrumento. Alguns instrumentos não possuem movimentos em $Y(dY0)$ ou em $Z(dZ0)$, por razões econômicas, deste modo, os movimentos angulares dos dois projetores devem ser determinados na orientação relativa.

Por outro lado, as rotações dos ângulos de Euler, são realizadas em torno das últimas posições dos eixos do referencial. Por injunção construtiva, um eixo do projetor terá que ser fixa, outro parcialmente fixo e o terceiro poderá ter toda a liberdade de movimento. Desta forma a primeira rotação a ser aplicada ao vetor a ser transformado deverá ser em torno do eixo mais fixo e a última para o eixo livre:

Primeiro caso $\rightarrow \omega$ como rotação primária, φ secundária e χ terciária – ou seja a primeira rotação a ser aplicada ao vetor a ser transformado deve ser em torno do eixo ox ; a segunda em torno de oy ; e a terceira em torno de oz .

Segundo caso $\rightarrow \varphi$ como rotação primária; ω como secundária e χ terciária;

Terceiro caso $\rightarrow \chi$ como rotação primária; φ secundária e ω terciária

A matriz M tem as expressões de seus elementos m_{ij} , determinadas pela ordem em que as rotações são aplicadas ao vetor que se está transformando.

Na pratica para a realização da orientação relativa implica em utilizar equações diferenciais, através do processo de aproximações sucessivas, ou seja, um processo iterativo, em geral com cinco iterações o problema é resolvido.

No caso proposto: $R_z(\chi) \cdot R_y(\varphi) \cdot R_x(\omega)$ (eq.04)

$$R_x(\omega) = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \text{sen } \omega \\ 0 & -\text{sen } \omega & \cos \omega \end{Bmatrix} \text{ (eq. 05)}$$

$$R_y(\varphi) = \begin{Bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\text{sen } \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen } \varphi & 0 & \cos \varphi \end{Bmatrix} \text{ (eq. 06)}$$

$$R_z(\chi) = \begin{Bmatrix} \cos \chi & \text{sen } \chi & 0 \\ -\text{sen } \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \text{ (eq. 07)}$$

Sendo:

$$M = \begin{Bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{Bmatrix} \quad (\text{eq. 08})$$

Seus elementos serão:

$$\left. \begin{array}{l} m_{11} = \cos \varphi \cdot \cos \chi \\ m_{12} = \cos \omega \cdot \sin \chi + \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \chi \\ m_{13} = \sin \omega \cdot \sin \chi - \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \chi \\ m_{21} = -\cos \varphi \cdot \sin \chi \\ m_{22} = \cos \omega \cdot \cos \chi - \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \chi \\ m_{23} = \sin \omega \cdot \cos \chi + \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \chi \\ m_{31} = \sin \varphi \\ m_{32} = -\sin \omega \cdot \cos \varphi \\ m_{33} = \cos \omega \cdot \cos \varphi \end{array} \right\} \quad (\text{eq. 09})$$

A transposta inversa de M, será:

$$M^T = \begin{Bmatrix} m_{11} & m_{21} & m_{31} \\ m_{12} & m_{22} & m_{32} \\ m_{13} & m_{23} & m_{33} \end{Bmatrix} \quad (\text{eq. 10})$$

Substituindo a equação matricial M^T (eq.10) na (eq.03) e o resultado na segunda das equações (eq.01):

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{m_{12}X + m_{22}Y + m_{32}C}{m_{13}X + m_{23}Y + m_{33}C} \quad (\text{eq.11})$$

Substituindo as igualdades (eq.09) na (eq.11) e determinando as suas derivadas parciais em relação a Y_0 , Z_0 , χ , φ e ω com os valores angulares igualados a zero, que são as condições iniciais do restituidor, ressaltam as equações:

$$\begin{cases} \frac{\partial Y}{\partial Y_0} = 1 \\ \frac{\partial Y}{\partial Y} = \frac{y}{c} \\ \frac{\partial Z_0}{\partial Y} = (Z - Z_0) \frac{x}{c} \\ \frac{\partial \chi}{\partial Y} = (Z - Z_0) \frac{xy}{c^2} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial Y} = -(Z - Z_0) - \frac{y^2}{c^2} (Z - Z_0) \end{cases} \quad (\text{eq.12})$$

Quando a orientação relativa está relacionada, a coordenada Y de máquina de um ponto genérico P deverá assumir o mesmo valor para ambas as fotografias e para o mesmo valor de Z de máquina. Em outras palavras, a orientação relativa significa a intersecção de todos os raios homólogos de um par de fotografias. Conseqüentemente, o resultado das orientações interna e relativa, é um modelo estereoscópico do terreno fotografado.

A diferença dY , devida , devida à falta de orientação relativa, é função, como se vê em (eq.11) de Y_0 ; Z_0 ; e dos ângulos de Euler contidos em M: ω (rotação em torno de x); φ (rotação em torno de y) e χ (rotação em torno de z). Portanto, existe a necessidade do estabelecimento de cinco equações diferenciais para determinar as alterações dY_0 ; dZ_0 ; $d\chi$; $d\varphi$ e $d\omega$; que provavam alterações dY para cinco ponto.

Existem aparelhos restituidores que possuem movimentos Y_0 , Z_0 , χ , φ e ω . E podem ter a orientação relativa realizada com os movimentos de apenas dois projetores. Outros possuem apenas os movimentos angulares. Os registros dos movimentos angulares dos aparelhos eletro-ópticos realizados por técnicos são precisamente ajustados em função de modelos matemáticos consagrados.

9 – SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL - GPS

9.1 – Definição

O sistema **GPS** foi concebido de forma que em qualquer lugar do mundo e a qualquer momento existam no mínimo quatro satélites acima do plano do horizonte do observador (foto 1.1). Os estudos iniciaram em 1973 seriam apenas para contornar as limitações do sistema **TRANSIT**, principalmente com relação à navegação. Esta é a condição mínima para que seja possível navegar em tempo real com o sistema.



Foto: 1.1 – GPS instalado no centro do gramado do Mineirão

O sistema GPS, também chamado de **NAVSTAR** (Navigation Satellite Time And Ranging), em função de suas aplicações na navegação subdivide-se em três segmentos, dos quais destacamos dois, que estão diretamente ligados no desenvolvimento do trabalho:

É composto por uma constelação de satélites que ao final da implantação do sistema serão 21 satélites de operação orbitando a terra e três satélites de reserva, totalizando ao final 24 satélites, orbitando a uma altitude de 20.000 km da terra, em 6 planos orbitais com inclinação de 55°, com o período de revolução de 12 horas siderais, onde a configuração dos satélites se repete 4 minutos mais cedo em um mesmo local.

A função do segmento espacial é gerar e transmitir os sinais GPS (códigos, portadoras e mensagens de navegação). Estes sinais são derivados da frequência fundamental “f” de 10,23 Mhz, apresentando a seguinte estrutura:

Ondas portadoras L1 = 154 . f₀ = 1575,42 Mhz

L2 = 120 . f₀ = 2.227, 60 Mhz.

Modulados em fase com as portadoras, os códigos são seqüências de +1 e -1 emitidos a frequências de:

Código C/A: f₀/10 = 1,023 Mhz

Código P : f₀ = 10,23 Mhz

A identificação dos satélites utiliza o numero do segmento do código **PRN**, onde, o código **C/A** (coarse/Acquisition code) se repete a cada 01 milisegundo, enquanto que o **P** (Precision Code) a cada 267 dias. O período de 267 dias é subdividido em segmentos de 07 dias.

Existe ainda o código **Y**, similar ao **P**, sendo gerado a partir de uma equação secreta (anti-spoofing), que será futuramente implementado no lugar do **P**. A qualidade dos resultados da navegação em tempo real será muito melhor, no entanto, o seu uso que irá ser exclusivo dos militares do EUA e seus aliados.

A **portadora L1** é modulada com os códigos **C/A** e **P** (ou **Y**), enquanto a **L2** apenas com o **P** (ou **Y**). As portadoras carregam a mensagem de navegação, que é uma seqüência de

dados transmitidos a 50 bits por segundo, informando aos usuários sobre as efemérides transmitidas.

O sistema geodésico adotado para referencia tanto das efemérides transmitidas quanto das precisas é o **WGS-84** (World Geodetic System de 1984), Quando se posiciona o GPS, os resultados obtidos devem ser transformados para o sistema **SAD-69**, que é o sistema adotado pelo Brasil. Ressalta-se ainda que os resultados fornecidos pelo GPS são de altitude elipsoidal, sendo obrigatório, o uso do Mapa Geoidal do Brasil, para a obtenção as altitudes referenciadas ao nível dos mares (geóide).

Sendo que a combinação mais usada é a dupla diferença de fase, por corresponder ao modelo matemático que fornece a melhor rigidez geométrica para a solução.

9.2 – Tipos de Posicionamento

9.2.1 - Posicionamento Estático:

Dois (02) ou mais receptores fixos, observam os mesmos satélites durante uma hora ou mais, sendo determinadas as componentes dos raios vetores definidos pelas estações com uma precisão de 1 a 2 partes por milhão (ppm);

9.2.2 - Posicionamento Cinemático Contínuo ou Semi-Cinemático (stop-and-go):

Um receptor é mantido fixo, enquanto outros são moveis. Se for Cinemático contínuo a taxa de observação é de 1 segundo; se for semi-cinemático o tempo de ocupação nas estações móveis é reduzido a alguns minutos, no mínimo 2 segundos, o suficiente para duas observações distintas. É importante definir as ambigüidades no inicio do processo através do rastreo de uma base, ou linha de base ou através de trocas de antenas para que seus valores sejam válidos durante o levantamento.

9.2.3 - Posicionamento Pseudo-cinemático ou Pseudo-estático:

Um receptor é mantido fixo, enquanto outros ocupam as mesmas estações, durante períodos de alguns minutos, para serem observadas duas épocas distintas separados pelo intervalo de 01 hora.

Os serviços proporcionados pelo GPS são divididos em dois tipos:

- A) Serviço de posicionamento Preciso:** os usuários deste serviço têm acesso aos dados dos relógios dos satélites não adulterados, às correções às efemérides transmitidas e ao código descriptografado; são os militares americanos, os aliados e os amigos privilegiados.
- B) Serviço de Posicionamento Padrão:** os usuários deste serviço acessam os dados GPS como são transmitidos, com todos os tipos de degradação e criptografia; é a comunidade civil, de uma forma geral.

9.3 – Classificação dos Levantamentos GPS

Os trabalhos desenvolvidos com GPS podem ser classificados de acordo com a sua utilização; levantamentos de alta precisão (âmbito nacional) subdividem-se em dois grupos: científico e fundamental (de 1ª ordem), com precisões melhores que 1/500.000 e 1/100.000 respectivamente (IBGE, 1983). Atualmente os levantamentos fornecem precisões da ordem de 1 a 2 ppm (1/1000.000 a 1/500.000).

Os levantamentos do GPS podem ser divididos entre três categorias no nível científico:

9.3.1 - Geodinâmica Global e Regional

Medidas de deformação; emprega a técnica de integração orbital no processamento das observações; as exatidões almejadas são melhores que 0,01 ppm; representam os trabalhos conduzidos internacionalmente, por exemplo, estudo da deriva continental, determinação do movimento do pólo, entre outros.

9.3.2 - Sistemas Geodésicos Nacionais - (redes primárias)

Geodinâmica regional e local; emprega a técnica de relaxação orbital nas determinações decorrentes; medidas de deformação: buscam exatidões melhores que 0,1 ppm; estrutura de controle definida pelas estações pertencentes a RBMC.

9.3.3 - Sistemas Geodésicos Nacionais - (rede secundária)

Geodinâmica local; medidas de deformação; levantamentos de engenharia altamente precisos; contemplam os trabalhos determinantes de resultados com exatidões melhores que 1 ppm; consistem nos levantamentos do SGB, sejam eles realizados pelo IBGE ou outras empresas credenciadas.

Como o GPS esta em processo de implantação, as informações fornecidas retratam a situação atual; estas precisões referem-se tanto ao posicionamento horizontal como ao vertical, sendo que a qualidade da vertical esta diretamente relacionada aos posicionamentos por satélite, elipsóide de revolução. Portanto, faz-se necessário adequar a altitude elipsoidal, já que altitude é o geóide, para tal é necessário usar o Mapa geoidal, que pode ocasionar erro nas determinações altimétricas se a qualidade dos valores de ondulação geoidal obtidos do mapa forem inferiores aos fornecidos pelo GPS.

II – OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo da pesquisa é elaborar um produto cartográfico decorrente do processamento digital de imagens obtidas de câmaras analógicas — a ortofoto. A necessidade de operação das matrizes digitais demanda do uso de um equipamento responsável pela reprodução das imagens impressas em arquivos digitais o scanner. A obtenção da ortofoto é sustentada por uma metodologia criteriosa e com atenção aguçada aos erros cometidos em cada etapa da atividade. Os controles não foram submetidos à análise estatística do estudo da propagação de variâncias, mas contou com a verificação dos relatórios produzidos pelos aplicativos usados no processamento das imagens digitais e, também, das observações de campo.

III – METODOLOGIA DO TRABALHO

1.- Atividades preliminares

1.1 - Tecnologia GPS

Inicialmente foi selecionada a coleção de fotos da área do campus da UFMG em um mosaico (foto 3.1).

O mosaico é a colagem das aerofotos justapostas de uma região na escala em que foram tomadas (foto 3.2). O mosaico foi idealizado com dois propósitos:

- a. investigar a possibilidade de distribuir os pontos adequados segundo a metodologia citada por NOTARI (1976) e
- b. indicar os pontos a serem coletados com o uso do GPS e estação total para os levantamentos planimétrico e altimétrico, respectivamente.
- c. indicar os pontos a serem coletados com o uso do GPS e estação total para os levantamentos planimétrico e altimétrico, respectivamente.



Foto 3.1 – Seleção de fotos da área do campus da UFMG



Foto 3.2 – Colagem das fotos justapostas para montagem do mosaico.

A escolha de um ponto depende das condições de clareza e visibilidade na imagem e, sobretudo no registro inequívoco do local. Logo é de fundamental importância observar se o mesmo ponto está em uma interseção. Por exemplo, esquina de uma rua, cruzamento de cercas, junção de canteiros, entre outros. A relevância desta particularidade na identificação de um ponto na imagem é que o mesmo fica de fácil identificação no desenvolvimento de medições realizadas no campo – superfície terrestre.

Para o levantamento dos registros topográficos, qual seja, o referenciamento dos pontos coletados com o uso dos receptores GPS e a estação-total. Foram identificados os vértices (traz os registros de coordenadas plano-cartesianas) e as **RRNN** (traz os registros de coordenadas verticais) medidas segundo inventário de pontos topográficos publicados no volume intitulado Mapeamento do município de Belo Horizonte.

O levantamento em campo com o GPS teve início dentro do campus da UFMG, no marco topográfico S4. Localizado ao lado da caixa d'água na obra anexa ao prédio do IGC, onde foi instalado receptor fixo (foto 3.3).

O método adotado para o levantamento em campo, foi à medição estática que usa no mínimo dois receptores fixos nos pontos durante toda a seção de observação. Em cada coleta de pontos o receptor rastreou no intervalo de uma hora.

Os problemas mais comuns encontrados foram às dificuldades na coleta dos pontos relacionados com os limite do **PDOP** (sigla do termo em inglês *Planimetric Dilution of Precision* – erro de dispersão planimétrica). É o efeito da geometria dos satélites nas coordenadas planimétricas para a posição tri-dimensional, quanto maior os valores numéricos dos fatores, pior a qualidade da determinação correspondente, ou seja, maior a influência dos erros de observação dos resultados do posicionamento.



Foto 3.3 - O levantamento de campo com o GPS, no campus da UFMG, no marco topográfico S4. Localizado ao lado da caixa d'água anexa ao prédio do IGC, onde foi instalado o receptor fixo

O instrumento possui uma frequência (L1) e precisão horizontal – $5\text{mm} + 1\text{ppm}$ posicionado em vértices identificados no mosaico.

Uma particularidade que se observa em relação aos receptores e as fases de ondas portadoras, também fornece indiretamente o medidor distância - receptor satélite. Nesse caso específico como se mede e a diferença de fase entre o sinal que chega do satélite e o gerado pelo oscilador do receptor, existe uma incógnita adicional na observação de distância chamada ambigüidade. Número inteiro de ciclos que a onda leva para chegar ao

receptor no início do período de rastreamento. Por esse motivo estas observações não são utilizadas em tempo real, são aplicadas para o posicionamento estático. Foram utilizados quatro receptores no levantamento planimétrico (foto 3.4).



Foto 3.4 – Programação do receptor instalado na Reitoria do campus

A partir da base S4, foi feito o caminhamento para os demais pontos escolhidos sobre o mosaico. Na tentativa de medir o marco topográfico 4, que estava localizado próximo a USIMINAS foram encontradas algumas dificuldades relacionadas ao PDOP. Especula-se que possa ter ocorrido empobrecimento do sinal em função da densidade da rede de alta tensão. No dia seguinte houve outro problema, que foi um erro de programa no equipamento, impedindo a atividade em campo que foi cancelada e uma nova coleta destes mesmos pontos teve que ser feita em outro dia. O levantamento foi finalizado quando os pontos foram descarregados e processados no computador. No entanto durante o processamento das informações outra coleta de pontos foi necessária e realizada na região do bairro São Francisco, pois, o aplicativo de ajustamento de pontos – módulo STERTRI (sistema fotogramétrico DVP) não estava reconhecendo os limites da coleção de aerofotos.

O sistema geodésico adotado é o **SAD 69**, sistema adotado no Brasil, os parâmetros utilizados nas aplicações do GPS estão baseadas nas Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS, normas estas estabelecidas pelo **IBGE**.

1.2 – Estação Total – Coleta de Pontos

A estação total tem a opção de medir os pontos por coordenadas. As coordenadas digitadas ou transmitidas do microcomputador para o instrumento através da saída serial (cabo) ou digitado diretamente pelo teclado do instrumento usando a opção de gerenciador de memória. As coordenadas digitadas ou transmitidas pelo microcomputador são armazenadas no arquivo de coordenadas, ficando separadas do arquivo de medição. A rotina de locação apresenta três telas de informações como Estação, Ré, e locação. Uma vez definida a Estação, que é o ponto onde deve estar instalado o aparelho, é feita a visada da ré e então é possível dar início aos trabalhos de locação.

A locação e a ida do projeto para o campo foi feita levando o mosaico. O planejamento da atividade foi necessária para a localização das referências de nível (RRNN) para ajustar os pontos a serem levantados.

A primeira RN foi localizada no prédio do IGC (foto 3.5) e as demais RRNN, no total de três, na área externa do campus da UFMG. Durante o caminhamento um croqui foi desenhado, onde, foram identificados os pontos visados. O objetivo do croqui é para facilitar identificação dos pontos logo que houver necessidade de processar os dados no

computador. Alguns problemas ocorreram também neste levantamento. As principais dificuldades encontradas nesse levantamento foi em relação à intervisibilidade entre o pontos medidos e problemas de leitura do aparelho. No ponto de área da medição próximo ao Colégio Militar ocorreu um erro na unidade de medida que marcou em centímetros sendo que a medida teria que ser em metros com isso houve necessidade de repetição do levantamento nesse trecho. Próximo ao Estádio do MINEIRÃO a visualização fora comprometida em função de disposição de árvores. Outro problema foi o volume de carros que comprometiam na leitura do aparelho. O trabalho de orientação e apoio terrestre finaliza quando os pontos no levantamento altimétrico são descarregados no computador, através de software próprio que analisa a qualidade e a confiabilidade da coleta de pontos. Estando os pontos coletados, tanto pelo GPS quanto pela estação total dentro dos parâmetros, tem início a 2ª etapa da aerotriangulação.



Foto 3.5 - Primeira RN visada prédio do IGC, placa metálica identificada no prédio do IGC.

2 – Atividades em Laboratório

O trabalho de laboratório é realizado com o uso do software específico **DVP** (foto 3.6).

No primeiro momento, são conferidas as calibrações dos instrumentos usados na realização da fotogrametria, pois são estes parâmetros que garantiram a exatidão e confiabilidade dos trabalhos fotogramétricos.

O conhecimento do grupo de parâmetros também é necessário para a reconstrução do feixe perspectivo gerador da imagem fotográfica, no instante da exposição do filme à luz refletida no objeto fotografado.

Feita a verificação, as fotos irão para montagem do modelo fotográfico, depois são digitalizadas matricialmente no scanner Umax Mirage IIse – resolução óptica de 700 dpi. e então é feita a conferência digital em relação a equalização das imagens com o uso do histograma de imagens.

Aplica-se a orientação interior, que é a operação de recuperação da posição da fotografia em relação à câmera, ela permite a reconstrução do feixe perspectivo que gerou as fotografias.

A orientação relativa é a determinação do sistema fotogramétrico de uma fotografia em relação ao de outra. Tal determinação pode ser realizada através dos processos óptico-mecânicos, métodos analíticos ou métodos digitais de resolução de sistema de equações. A orientação exterior permite a recuperação da posição e atitude de cada aerofoto segundo um referencial terrestre geralmente aquele no qual se pretende realizar o trabalho fotogramétrico. Conseqüentemente, o resultado das orientações: interior, orientação exterior, é um modelo estereoscópico do terreno fotografado. Todas essas orientações estão contidas no processo de restituição que é a reconstrução do terreno fotografado a partir de suas fotografias. Algumas dificuldades encontradas como a escolha de pontos na imagem digital. Outro fator importante a ser verificado na foto é as marcas fiduciais que são as marcas com coordenadas determinadas num documento conhecido como certificado de calibração da câmara.



Foto 3.6 - O trabalho de laboratório é realizado com o uso do software específico DVP

As marcas fiduciais definem um sistema de coordenadas ligadas à câmera, denominadas de

Sistema de Coordenadas Fiduciais esse sistema tem origem na interseção de retas passantes por marcas fiduciais opostas, imaginando o eixo Ox que coincide com a reta passante pelas marcas fiduciais alinhadas com a direção do voo e é positivo no sentido das imagens dos relógios como vistos em cópias positivas das fotos, o eixo Oy é perpendicular ao eixo Ox e forma com este um sistema dextrógiro de coordenadas. Um método importante que envolve esse trabalho é a visão estereoscópica (dá o efeito de profundidade para o operador do sistema) que na própria orientação relativa o efeito é direto devido a visão binocular. Sendo que nessa visão binocular as imagens de um mesmo objeto nas retinas dos dois olhos são, como nas fotografias aéreas, perspectivas centrais diferentes entre si, pois os centros de perspectivas centrais diferentes entre si, pois os centros de perspectiva não são coincidentes. Um efeito importante em relação à diferença na posição relativa de cada imagem tem o nome de paralaxe, esse fator é percebido durante a orientação relativa em que é visto o objeto na imagem mais próximo através do método do estereoscópio NuVision. Um sistema composto por óculos de lente polaróide, um sintonizador de frequência ligado a um filtro ajustado a tela de um monitor de 17 polegadas.

2.1 – Digitalização das aerofotos

De acordo com OLIVEIRA, SANTIAGO & MITTMANN (1999) a digitalização das imagens pode ser feita em diversas resoluções, mas a qualidade final depende do equipamento disponível, da qualidade dos originais, (foto 3.7) se colorido ou preto e branco, e do uso do material final. Cabe destacar que o tamanho dos arquivos de imagens são proporcionais à sua resolução e ao tamanho do original. Imagens grandes e resoluções densas, resultam na necessidade de grandes quantidade de memória, tanto para o seu armazenamento, quanto para a manipulação. É importante salientar que a qualidade de impressão de imagens digitais será proporcional a sua resolução de digitalização. Os testes realizados visam estabelecer qual a resolução mais adequada, levando em conta os seguintes fatores:



Foto 3.7 – Digitalização matricial de fotos

↳ Compatibilidade da escala da aerofoto com o seu uso:

Para as aerofotos de 1:25000 era determinante que a resolução de digitalização possibilitasse a impressão de mapas até a escala 1:10000, onde fosse possível perceber o contorno de ruas e os limites entre público x privado, diferenças de coberturas vegetais, diferenciação de massas construídas e não construídas (sem necessidade da definição clara da forma da construção). Para a escala de 1:8000 disponibilizada para a realização da atividade corrente.

↳ Tamanho do arquivo:

O tamanho dos arquivos gerados devem ser compatíveis com as capacidades de armazenamento e processamento dos computadores. dos alunos e aqueles disponíveis nos laboratórios.

Concluiu-se que a resolução que mais se adequava aos objetivos do projeto era a de 700dpi (sigla do termo em inglês dots per inch significa pontos por polegadas), ou seja, para cada polegada linear, tem-se 700 pontos.

3 – Orientação Interior

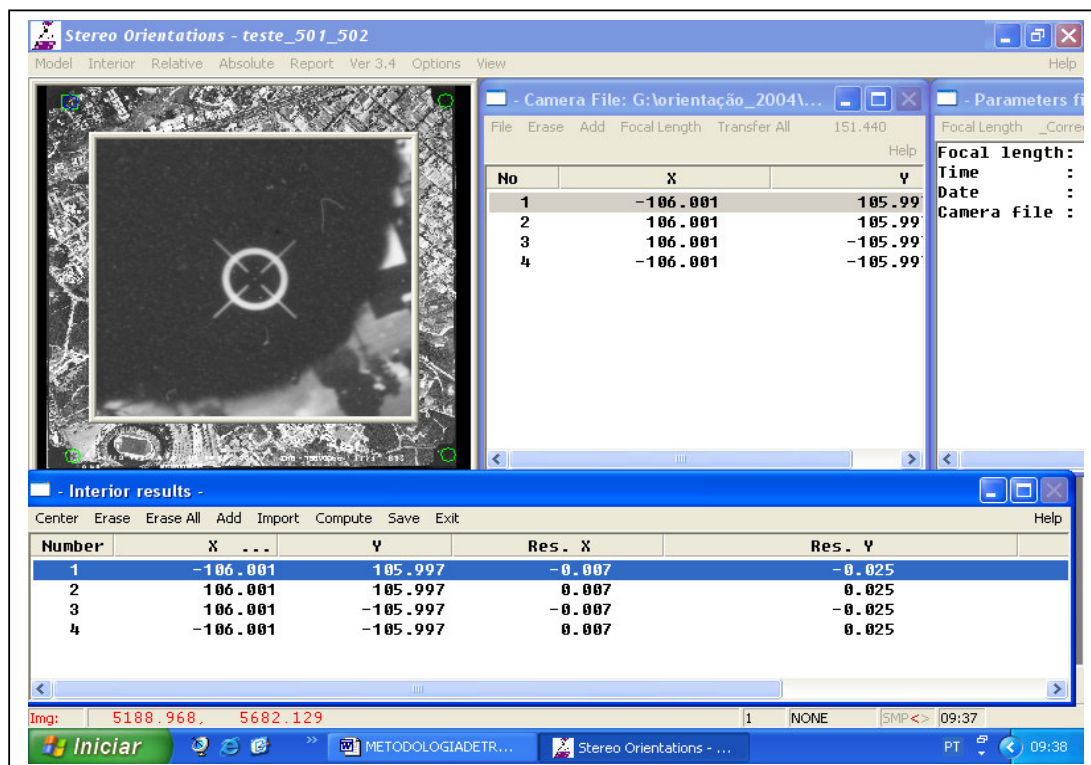


Figura 3.1 – Orientação Interior – edição e ajuste das marcas fiduciais

De acordo com o Manual técnico de aerotriangulação do exército (1984) define a orientação interior através da medição e ajuste das marcas fiduciais, determinando assim a posição dos diafilmes e, por conseguinte, os parâmetros necessários à transformação dos pontos medidos do sistema de coordenadas do monitor para o referencial de foto. A

orientação interna corrige ainda os erros de deformação do diafilme e outro ruído conhecido como arrastamento da imagem.

A figura 3.1 mostra a operação de recuperação da posição da fotografia em relação à câmera, através da orientação interna que permite a reconstrução do feixe perspectivo que gerou nas perspectivas as fotografias. A figura mostra a marca fiducial do canto esquerda superior da foto. A orientação é realizada ao determinar o centro da marca fiducial. Os valores são identificados no certificado de calibração como mostra a tabela ao lado da foto. A tabela abaixo da foto, mostra na terceira coluna o resultado em relação ao resíduo (em pixel) decorrente do processo de ajustamento matemático. Um fator muito importante para realizar a orientação interior é o modelo matemático usado pelo sistema: a transformação afim. É uma transformação linear, ou seja, transforma as coordenadas de um sistema para outro, este sistema envolve uma rotação, fator de não perpendicularidade dos eixos, duas trocas de escala e duas translações.

No modelo matemático da transformação afim é expressa pelas seguintes equações:

$$X_2 = a_1 x_1 + b_1 y_1 + c_1$$

$$Y_2 = a_2 x_1 + b_2 y_1 + c_2$$

X_2, Y_2 = coordenadas no sistema que se deseja

X_1, Y_1 = coordenadas no sistema que se tem

A_1, \dots, c_2 = parâmetros da transformação afim ou em forma matricial, como:

$$\begin{Bmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{Bmatrix} \text{ lembrando que } = \begin{Bmatrix} A_1 & b_1 \\ A_2 & b_2 \end{Bmatrix}$$

$$U = a_1 + a_2 x + a_3 y$$

$$V = b_1 + b_2 x + b_3 y$$

U, v = coordenadas máquinas (“scanner”)

X, y = coordenadas de foto (sistema fotográfico)

A_1, \dots, b_3 = parâmetros da transformação afim.

Os coeficientes desconhecidos a_1, \dots, b_3 são obtidos a partir do conhecimento das coordenadas de pelo menos três pontos idênticos no sistema de coordenadas de máquina e no sistema fotogramétrico. Geralmente são conhecidas as coordenadas das marcas fiduciais. Os coeficientes são determinados apenas uma vez para cada foto.

4 – Orientação Exterior

A realização da orientação exterior é antecedida com um planejamento para a distribuição dos pontos de apoio suplementar. Foram previstos dezoito pontos nas duas faixas de vôo que cobrem a região do projeto.

Segundo ANDRADE (1998), é recomendável que os pontos sejam distribuídos próximos aos pontos principais e aos vértices dos quadrados justapostos à linha de base e com os lados.

PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO SUPLEMENTAR

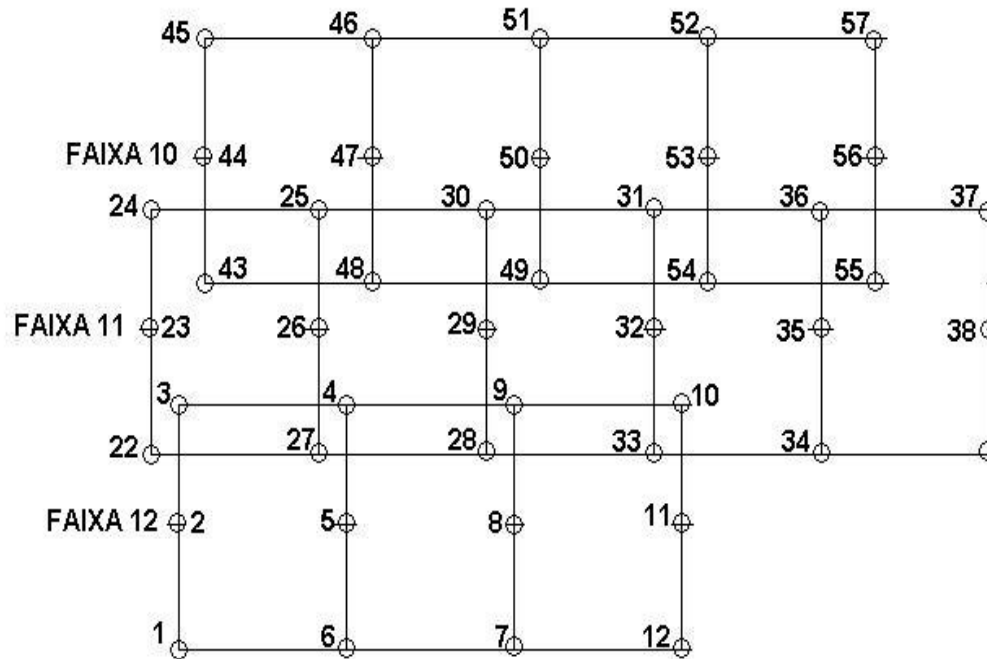


Figura 3.2 – Planejamento da distribuição de pontos suplementares - Esquema de Gruber

de comprimento igual ao da base (esquema de distribuição Von Gruber – figura 3.2). Gruber afirmou que essa distribuição elimina a paralaxe vertical (p_y) na foto. Os pontos fotogramétricos escolhidos devem ser marcados artificialmente nos diapositivos a fim de garantir que a medida das coordenadas fotogramétricas ocorra em pontos homólogos nas diferentes fotografias, isso quer dizer que os pontos marcados nos modelos fotográficos são iguais apesar da diferença da foto.

Uma aerofoto pode ser orientada externamente quando se conhecem as coordenadas X_0 , Y_0 e Z_0 do ponto de onde foi tomada (centro de perspectiva), bem como os ângulos que definem a sua atitude, como por exemplo, os ângulos de Euler: χ, ϕ, ω .

Nesta etapa foram identificados os pontos de apoio suplementar para o ajuste da orientação relativa. Além disso, elegeu-se os pontos de apoio terrestre que podem ser: planimétricos (X), altimétricos (Y) e os planialtimétricos (xy) voltados para a etapa de triangulação –que antecede ao ajustamento do feixe de bloco. Segundo TSAI (1995) são doze os parâmetros para a determinação da orientação exterior de um par de aerofotos. Estes parâmetros calculados na aerotriangulação de um bloco de aerofotos, ou em cada foto isolada quando estão disponíveis três ou mais pontos com coordenadas conhecidas. A seguir apresentamos os modelos de tela do sistema fotogramétrico digital DVP.

Ao iniciarmos o trabalho com o software DVP no módulo STERTRI, a primeira tela apresentada é a (figura 3.3), onde, o programa apresenta o arquivo **LIST**, que trás a identificação dos pares de fotos, com seus números e a posição de cada uma (direita e esquerda).

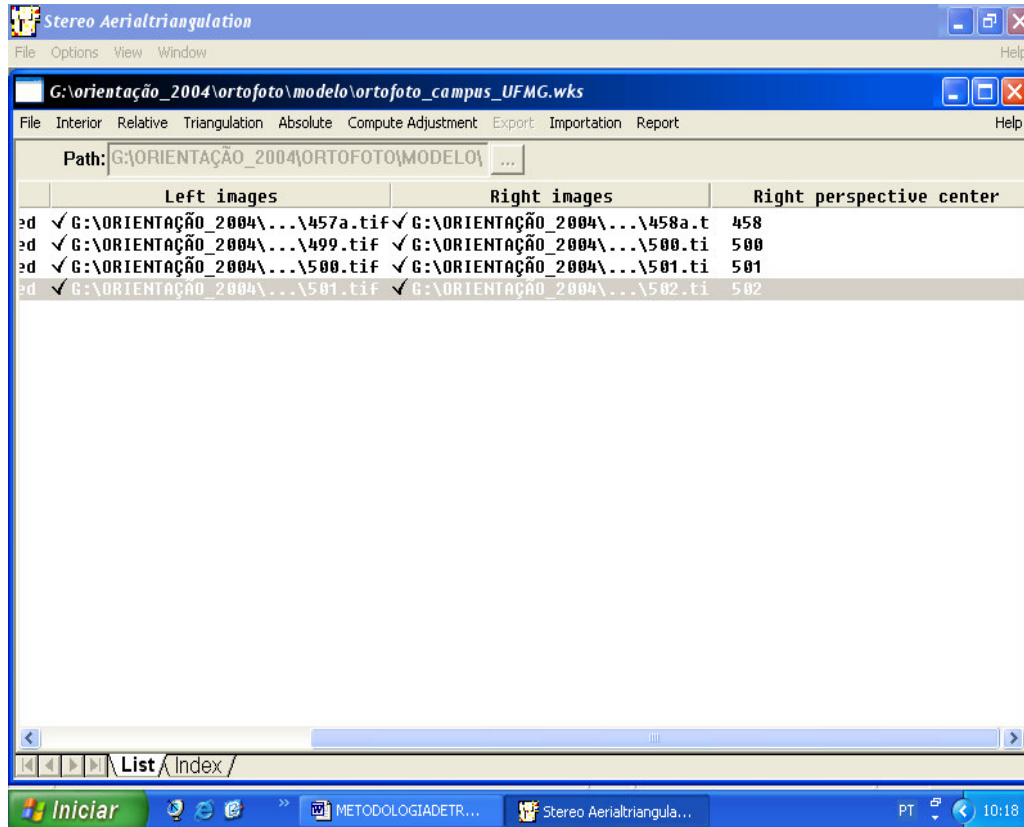


Figura 3.3 – A primeira tela apresenta o arquivo **LIST**, que trás a identificação dos pares de fotos, com seus números e a posição de cada uma.

Em seguida, deve-se abrir a tela **INDEX**, (figura 3.4), que apresenta os mosaico digital, após a orientação relativa, identificam-se os pontos suplementares e de apoio na respectiva ordem.

Considerado os pontos coletados pelo GPS, planimétricos, e os pontos coletados pela Estação Total, altimétricos, os dois métodos de levantamento são separados, porém inter-relacionados, através de um procedimento iterativo.

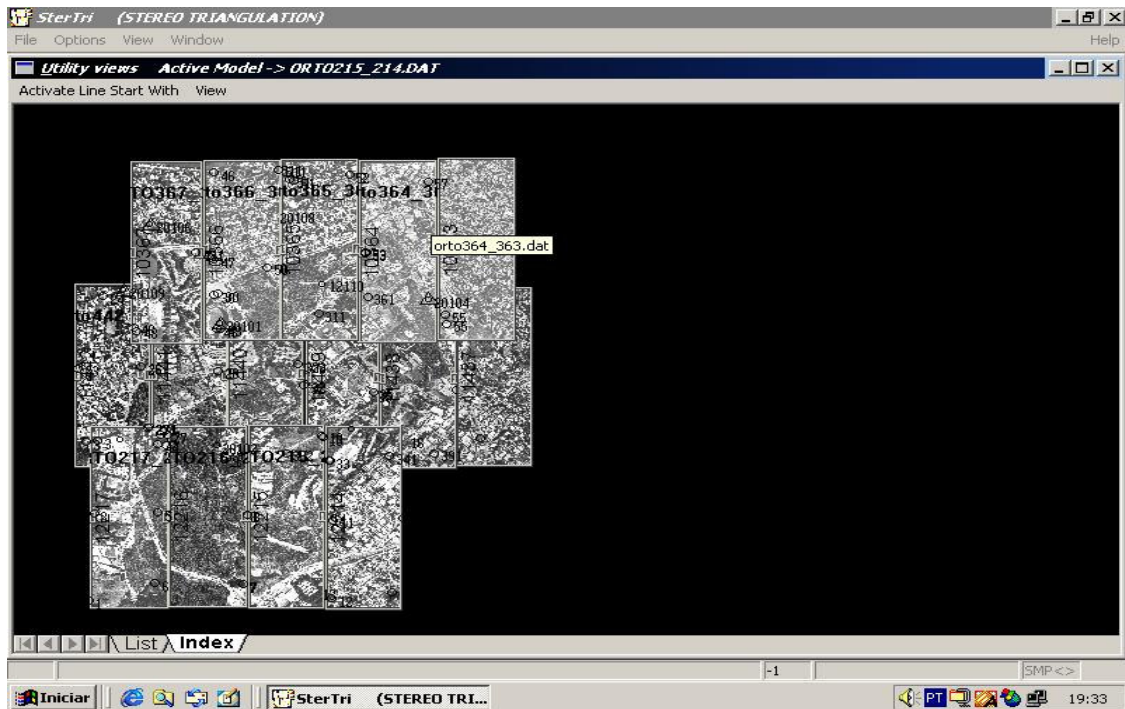


Figura 3.4 – Após abrir a tela **LIST**, deve-se abrir a tela **INDEX**, que apresenta o mosaico digital, após a orientação relativa, identificam-se os pontos suplementares e de apoio na respectiva ordem.

A figura 3.5 mostra como se faz o mosaico digital. Após elencar os modelos estereoscópicos que compõe o bloco de imagens por faixa de vôo, o operador deve “arrastar” por faixa as cópias das aerofotos digitais até sobrepor um detalhe comum.

A orientação relativa significa a intersecção de todos os raios homólogos de um par de fotografias. A seleção de pontos de apoio suplementar escolhido no mosaico cria uma janela (ou janelas) que permitem ao operador escolher no segundo monitor o detalhe visível de modo inequívoco.

O registro dos pontos de apoio terrestre são armazenados em uma pasta que recebeu o nome de *apoio*.

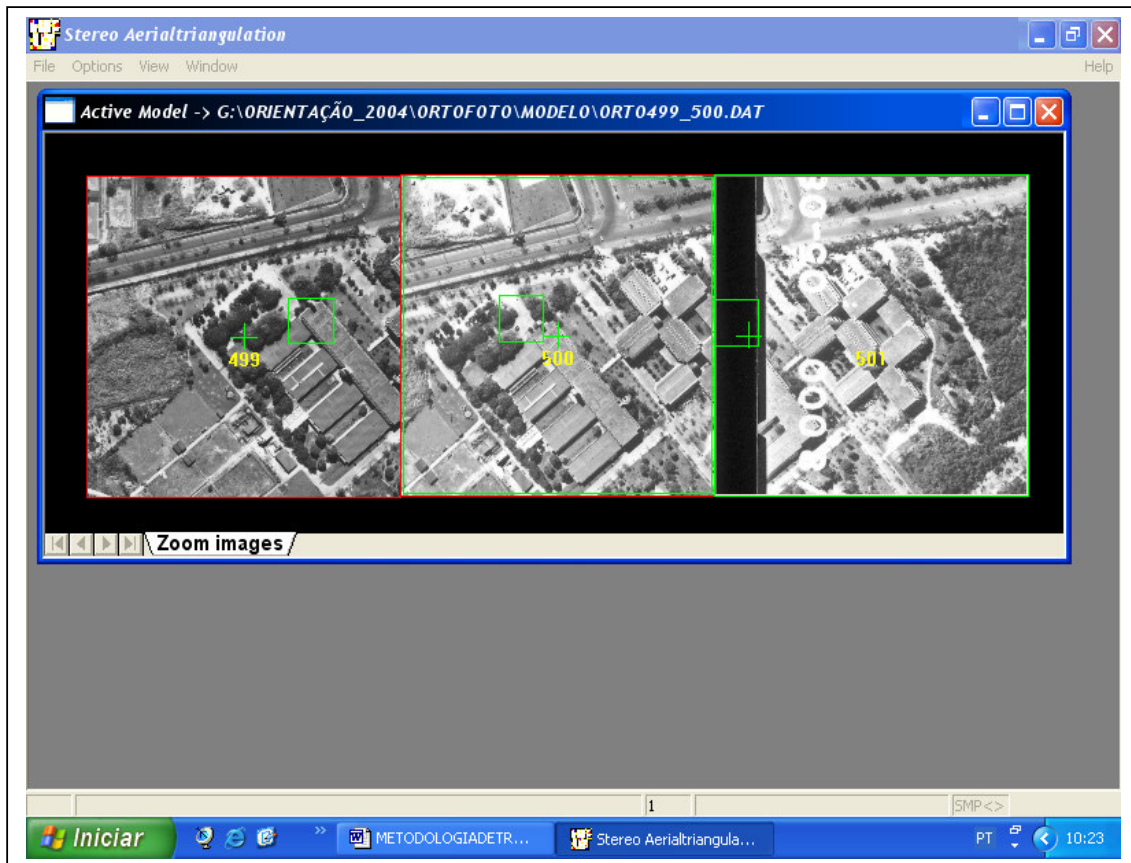


Figura 3.5 Após elencar os modelos estereoscópicos que compõe o bloco de imagens por faixa de voo, o operador deve “arrastar” por faixa as cópias das aerofotos digitais até sobrepor um detalhe comum.

O formato do arquivo somente aceita dados numéricos. Em função desta limitação foi estabelecida uma codificação para o conjunto de medidas realizadas. Postas da seguinte forma:

Pontos decorrentes do nivelamento trigonométrico e medidas com receptor GPS	
Atributos	Códigos
Circuito interno no campus – RN	111__
Circuito Mineirão – RNM	121__
RRNN(bases para o ajustamento)	152__
Circuito Major Delfino	131__
Medidas planimétricas e planialtimétricas	151__
Medidas do inventário de pontos topográficos da PBH	161__
Medidas planimétricas e planialtimétricas herdadas de projetos antigos	171__

O relatório de resíduo é gerado após inserir e codificar todos os pontos levantados (Figura 3.6).

A orientação absoluta pode ser feita tanto em um modelo isolado (modelos independentes) como em uma conexão de modelos que usa no mínimo dois apoios planimétricos e um altimétrico. A alternativa adotada contempla o uso do método de ajustamento de bloco. O processo da aerotriangulação é iniciada com o planejamento da distribuição dos pontos de

apoio na extremidade do bloco e, quando possível, a cada quatro aerobases (intervalo de exposição de fotografias tomadas pela aeronave).

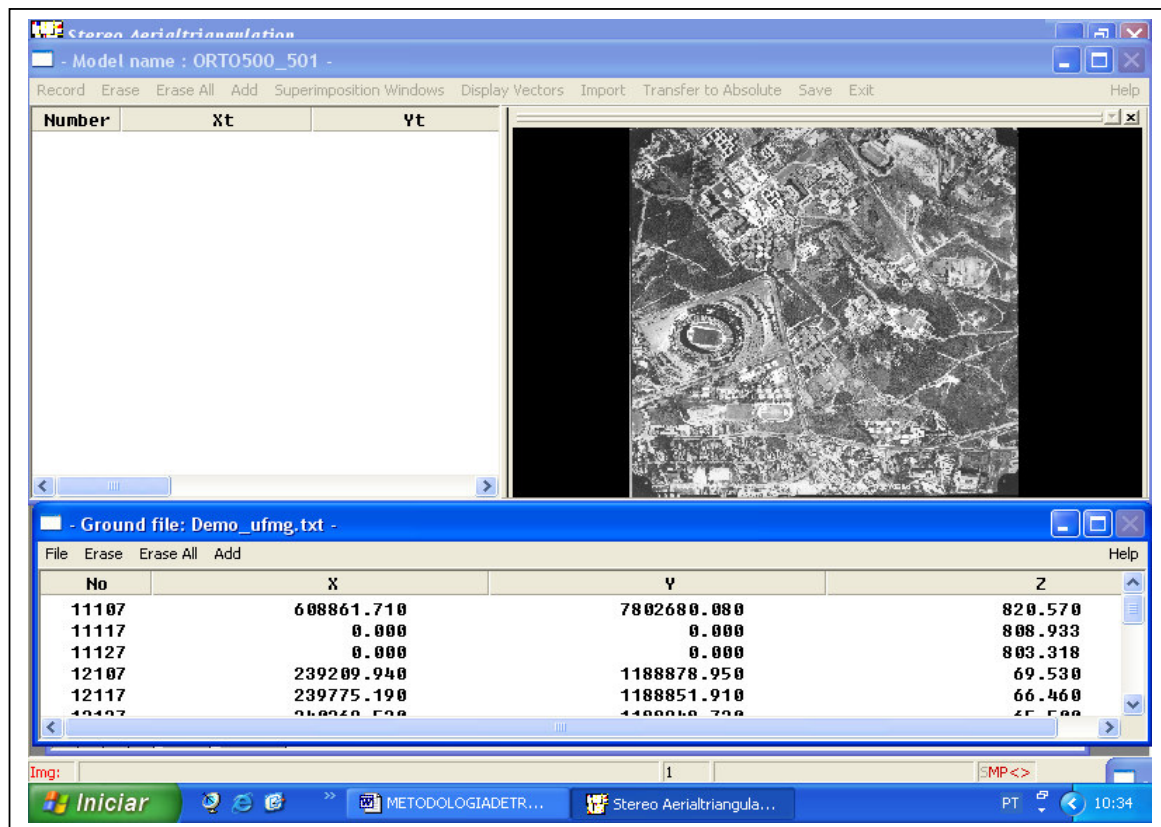


Figura 3.6 - registro dos pontos de apoio terrestre

STERTRI cria uma janela que permite exportar par os programas voltados especificamente para o ajuste de blocos.

O módulo STERVEC dá ao operador a possibilidade de gerar um grid artificial. O cursor é deslocado automaticamente para os vértices que podem ser aceitos ou descartados a depender da coincidência com a superfície física. Muitas vezes o processo sistemático desloca para feições que encontram copa de árvores ou robustas edificações. O operador pode lançar mão do próprio módulo DVPTIN para gerar a malha irregular de triângulos. Ou mesmo, contar com os recursos do Modeler, Geoterrain ou Surfer.

A seguir realiza comando de identificação do bloco devidamente ajustado e orientado e combina com o DTM gerado. O resultado é a ortofoto digital.

IV – Discussão dos resultados

O apoio terrestre altimétrico verificou um erro de 421 mm. resultado para o circuito desenvolvido no campus. O levantamento adotou como ponto de partida a RN no prédio do IGC – cota de 808,933. A poligonal seguiu a rua Reitor Pires Albuquerque em direção ao ICEX depois seguiu pela rua. Professor Eduardo Frieiro até encontrar outra RN – cota 801,808 na guarita localizada na Reitor Mendes Pimentel. A distribuição do erro foi realizada para as vinte e quatro estações ocupadas. O segundo circuito partiu da RN localizada na guarita da rua Professor Mendes Pimentel e retornou ao marco inicial. Desta vez, O erro foi de 447 mm distribuído nos doze pontos ocupados. Se admitirmos que em função da escala da foto um derivado do produto cartográfico, a exemplo – uma ortofoto. Pode ser expresso na ordem de 1:2000. O padrão de exatidão cartográfica (PEC) que poderia ser aceitável seria de 400 mm para o deslocamento planimétrico. O altimétrico admite de um modo geral o terço da curva de nível, aproximadamente 330mm. Levando em conta os erros processados o resultado pode ser absorvido no estudo de propagação de variância.

As medidas de imagem foram submetidas ao processo de orientação exterior. O melhor resultado foi obtido no modelo das aerofotos 499/500 mediu resíduo igual a sete micra. O pior foi percebido na medição no modelo das aerofotos 500/501 acusou resíduo de 49 micra. O processo de digitalização produziu imagens com 36 micra de resolução. A interpretação que se pode fazer dos resultados decorrentes do processo de orientação indica que o DVP é um sistema fotogramétrico que não contempla no modelo matemático a influência do erro devido a deformação do filme e despreza os efeitos das distorções da lente (distorção descentrada e distorção radial simétrica) e da correção da refração fotogramétrica. A adequação do modelo digital ao terreno é função da acuidade visual do operador na seleção de pontos bem escolhidos.

O levantamento topográfico foi desenvolvido em dois circuitos voltados para o levantamento altimétrico:

o primeiro trajeto desenvolveu-se a partir da RN identificada no prédio do IGC – cota de 808,933, seguindo até alcançar a rua. Professor Eduardo Frieiro e encontrar a RN – cota 801,808, localizada na guarita, da rua Reitor Mendes Pimentel. O erro encontrado no levantamento altimétrico foi de 421 mm.

o segundo circuito partiu da RN localizada na guarita da rua Professor Mendes Pimentel, descendo em direção a Reitoria, passando em frente a praça de serviços, retornou ao marco inicial. O erro encontrado foi de 447 mm.

Nas duas poligonais, o erro encontrado foi distribuído entre os pontos ocupados.

Como a ortofoto é um produto cartográfico, podendo ser expresso na ordem de 1:2000, um erro aceitável seria de 400 mm para o padrão de exatidão cartográfico (PEC) no deslocamento planimétrico.

No levantamento altimétrico admite-se em regra geral um erro de aproximadamente 330 mm, 1/3 da curva de nível, aproximadamente.

Levando em conta os erros levantados e distribuídos, o resultado foi absorvido no estudo de propagação de variância.

As imagens foram submetidas ao processo de orientação exterior.

O melhor resultado obtido foi no bloco das aerofotos 499/500, onde o resíduo medido foi igual a sete micra. O pior foi obtido no bloco das aerofotos 500/501, onde, obteve-se um resíduo de 49 micra.

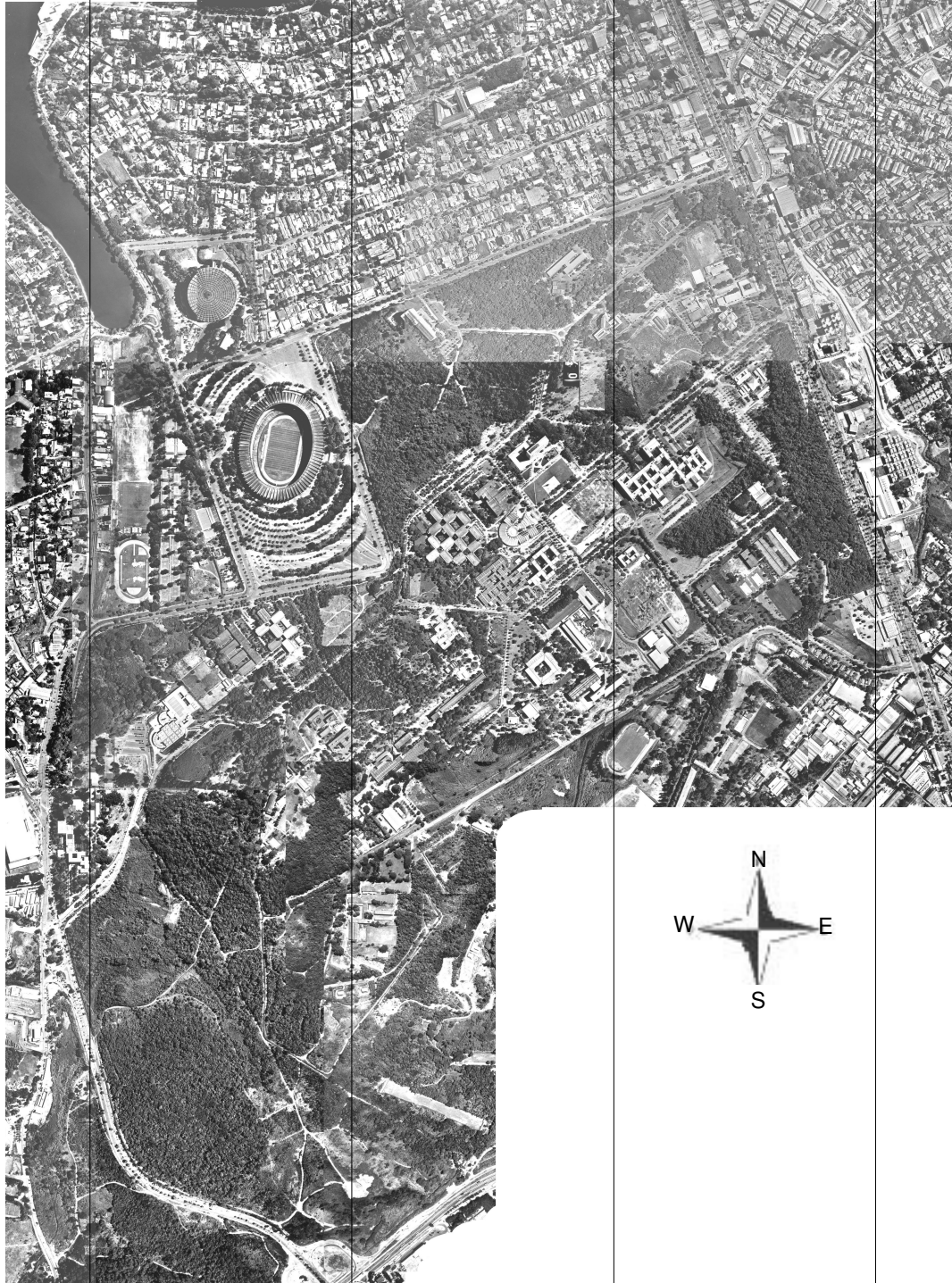
O processo de digitalização produziu imagens com 36 micra de resolução. A interpretação que se pode fazer dos resultados obtidos nos processos de orientação indica que o DVP é um sistema fotogramétrico que não contempla no modelo matemático a influência do erro devido a deformação do filme e despreza os efeitos das distorções da lente (distorção descentrada e distorção radial simétrica) e da correção da refração fotogramétrica a precisão do modelo digital ao terreno ocorre em função da acuidade visual do operador na seleção de pontos bem escolhidos.

V - CONCLUSÃO

Observou-se que para gerar uma ortofoto são necessários, vários parâmetros tais como: cálculos matemáticos, softwares específicos, equipamentos de alta capacidade, próprios para o desenvolvimento das atividades, em cada etapa.

Um fator muito importante a ser observado é a acuidade visual, por se tratar de imagem em escala e com resolução geométrica, em razão do uso constante do método digital na geração de imagens.

Durante todas as etapas, observou-se que nem sempre são gerados resultados positivos, pois, a probabilidade de erros ocorre uma vez que o detalhamento é importante no desenvolvimento do trabalho.



ORTOFOTO DO CAMPUS DA UFMG

FLS 01/01

Escala 1:13000

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM
GEOPROCESSAMENTO - 2004

VI – Referencias Bibliográficas

ANDRADE, J. B. Fotogrametria, SBEE, Curitiba, 1989, 258p.

ALMEIDA, J. F., dissertação de mestrado: Ortofoto Digital, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

CINTRA, J. P. Anais do Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento, Modelos Digitais de Terreno, Escola Politécnica de São Paulo / Departamento de Transportes, 1990, 58 a 72pp.

BERMÚDEZ, J. & Payssé, M. III Congresso Iberoamericano de Gráfica Digital., 1999. v.1, 230 - 234 pp

IBGE / Diretoria de Geociências - Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS – Versão Preliminar – 02/1973

IME. Manual Técnico de Aerotriangulação - 2ª edição – 1984

MITISHITA, E. A. Dissertação Detecção de erros grosseiros nas aerotriangulações, UFPR, 1986.

MOURA, A. C. M. Geoprocessamento na Gestão e Planejamento Urbano, Belo Horizonte, 2003.

SANTIAGO, A. G., OLIVEIRA, A. L., MITTMANN, R. Floripa Digital - A cidade em cd-rom II In: III Iberoamerican Congress of Digital Graphics - SIGRADI, 1999, Montevideú.

TSAI, V. J. D. Automatic Photo Reordering in a Simultaneous Bundle Adjustment – Peer Reviewed Article, julho, 1999.

MARCHETTI, D. A. B. Aplicação do Balplex em ortofotografia, Revista Brasileira de Cartografia, No. 10, 04/1973, Ed. Sociedade Brasileira de Cartografia, 34, a 41pp

NOTARI, J. M. Revista Brasileira de Cartografia, No. 16, Editora SBC, Distribuição dos pontos de apoio suplementar para o ajuste de aerotriangulação em bloco, 1976, pp 6e 7.

TOPCON – Manual técnico de Instruções – Estação Total Eletrônica.