

JAIR FERREIRA DE ALMEIDA

ORTOFOTO DIGITAL

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

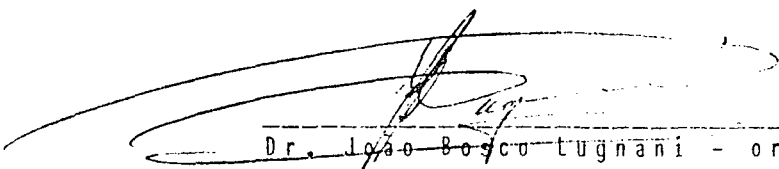
CURITIBA
1989

ORTOFOTO DIGITAL


por

JAIR FERREIRA DE ALMEIDA

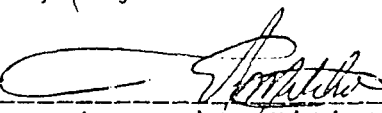
Dissertação aprovada como requisito para a
obtenção do grau de Mestre no Curso de
Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da
Universidade Federal do Paraná, pela comis-
são formada pelos professores:



Dr. João Bosco Tugnani - orientador



M.S. Mary Angélica de Azevedo Olivas



M.S. Edson Aparecido Mitishita

Curitiba, 1º de dezembro de 1989

AGRADECIMENTOS

O autor deseja manifestar agradecimentos às pessoas e instituições abaixo relacionadas, que contribuíram de forma relevante para tornar este trabalho uma realidade.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná que forneceu o suporte financeiro durante o tempo acadêmico e o incentivo para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. João Bosco Lugnani, pela orientação e discussão de idéias.

Ao meu grande amigo Julio Cesar de Menezes (Julinho) pela incansável co-orientação e execução do programa computacional, e ainda, pela confiança e estímulo durante todo o desenvolvimento deste estudo.

Ao amigo Fábio Ferla, pela ajuda, também, na execução do programa computacional.

Ao Eng^o Paulo Bezerra, do INPE (Cachoeira Paulista/SP) pela ajuda na produção (saída) da Ortofoto Digital.

À srta. Zulméa Munhoz da Rocha Teixeira, pela cuidadosa datilografia.

Aos professores Edson Aparecido Mitishita e Mary A.A. Olivas pela participação na banca examinadora e pelas sugestões que, com certeza, melhoraram este trabalho.

À Igleide, minha esposa, Gustavo e Plínio Augusto, meus filhos, pela compreensão da minha ausência.

SUMÁRIO

RESUMO.....	iv
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO.....	05
2.1. Generalidades.....	05
2.2. método direto.....	05
2.3 método indireto.....	08
2.4. Transformação geométrica.....	10
2.4.1. processo ponto por ponto (pixel by pixel).....	10
2.4.2. processo dos pontos âncora.....	13
2.4.3. equações de colinearidade.....	15
2.4.4. resseção espacial.....	17
2.4.5. modelo digital do terreno (DTM).....	23
2.4.6. transformação das coordenadas terrestres em coordenadas de foto.....	24
2.4.7. correção de distorções das coordenadas de foto..	25
2.4.8. introdução de distorções nas coordenadas de foto.....	27
2.4.9. Transformação das coordenadas de foto em coordenadas máquina.....	28
2.5. Densificação das coordenadas.....	30
2.5.1. aplicação para interpolar a altitude (Z).....	33
2.5.2. aplicação para interpolar as coordenadas de foto.....	35
2.5.3. aplicação para interpolar as coordenadas digitais.....	37

2.5.4. aplicação para interpolar o tom de cinza.....	38
2.6. Interpolação do tom de cinza pelo método "vizinho mais próximo".....	39
2.7. Digitalização da foto.....	39
2.7.1. varredura ortogonal.....	40
2.7.2. varredura não ortogonal.....	41
2.8. Resolução espacial.....	42
2.9. Precisão geométrica.....	44
2.10. Tratamento da imagem.....	46
3. EQUIPAMENTOS.....	47
4. DESCRIÇÃO DO TESTE REALIZADO.....	51
4.1. Descrição dos dados.....	51
4.2. Metodologia aplicada.....	57
4.2.1. parâmetros aproximados da orientação exterior....	57
4.2.2. definição da malha da ortofoto.....	59
4.2.3. coordenadas do primeiro ponto do DTM.....	59
4.3. Estrutura do programa.....	60
4.4. Equipamentos utilizados.....	65
4.5. Resultados.....	69
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	72
APÊNDICE I: Listagem do programa.....	74
SUMMARY.....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98

RESUMO

Esta dissertação apresenta processos para se obter a ortofoto digital, mostra também resultados, análise e conclusões tiradas da realização de um teste. A produção de ortofoto digital é mais automatizada do que a convencional e possibilita maiores facilidades para o tratamento da imagem. Além disso, pode ser realizada em menos tempo e com menor custo. O método testado parte de um DIM (Modelo Digital do Terreno) em forma de uma malha regular pouco densa. Na primeira etapa ele transforma as coordenadas do DIM em coordenadas imagem (Foto) através das equações de colinearidade e, depois transforma as coordenadas imagem em coordenadas de máquina ("scanner") através da transformação afim. Na segunda etapa densifica as coordenadas de máquina aplicando a interpolação bilinear. Na terceira etapa busca o tom de cinza numa matriz obtida da rasterização da fotografia original, e nesta busca é usada mais uma vez a interpolação bilinear. O tom de cinza, assim interpolado, é arquivado num meio magnético (disco ou fita) e posteriormente reimpresso com ajuda de equipamento que converte dados digitais em analógicos. O resultado final do teste realizado foi a produção — em papel fotográfico — de uma ortofoto digital de 512 por 512 "pixels", que apresentou boa qualidade visual.

1. INTRODUÇÃO

Existe uma necessidade constante de cartas atualizadas para o planejamento de infra-estruturas do mundo moderno. A produção da carta convencional tem custos muito altos e exige mão-de-obra qualificada; sua atualização é vagarosa e sujeita a falhas humanas. Em alguns países o recurso básico para sua atualização é a ortofoto.

A fotografia aérea apresenta deslocamentos da imagem motivados pelas inclinações da câmara e também pelo relevo do terreno. A retificação de fotografias aéreas consiste em transformar fotos inclinadas em verticais, entretanto, estas ainda apresentam deslocamentos devido ao relevo topográfico mas que podem também ser removidos pela retificação diferencial ou ortoretificação — os produtos resultantes destas transformações são chamados de ortofotos; ver figura 1.1.

A ortofoto mostra imagens de objetos nas suas verdadeiras posições ortográficas, e é geometricamente equivalente ao mapa de linha. Assim, sobre as ortofotos pode-se medir: distâncias e ângulos horizontais e áreas. A maior diferença entre ortofoto e mapa de linha está na representação de feições, ou seja, o mapa as representa por linhas e símbolos, e a ortofoto por imagens.

Atualmente se produz ortofotos a partir de uma variedade de equipamentos ortoprojetores, como por exemplo o Avio-plan OR-1 da Wild Herrbrugg Instruments e o Orthocomp Z-2 da

Carl Zeiss, Oberkochen. Estes instrumentos relocalam a imagem obtida de uma perspectiva central para uma posição de projeção ortogonal através de uma reprojeção ótico-mecânica da imagem analógica. O princípio básico, destes ortoprojetores, é esclarecido no Manual Wild OR-1 [15], em Moffitt [18] e em Wolf [23].

Já na produção de ortofoto digital, a reprojeção da imagem análoga à original é realizada a partir da imagem digital, ou seja, de uma matriz de valores de tom de cinza. Isto permite produzir uma ortofoto sem a projeção ótico-mecânica, e esta idéia foi proposta em diversos artigos científicos nos EUA e na Europa, a partir de 1976.

O objetivo do método digital é melhorar a produção da ortofotocarta, solucionando ou amenizando alguns problemas existentes ainda hoje na produção clássica de ortofoto, como a perda de precisão geométrica e resolução em relação aos negativos ou diapositivos originais, motivadas por um maior número de operações fotográficas e pelo mecanismo mais complexo do ortoprojetor.

Segundo Konecny [11], a grande vantagem do método digital é o maior tratamento automatizado que se pode dar à imagem, tais como: a impressão da malha de coordenadas terrestres, textos e homogeneidade dos tons de cinza. O tratamento do contraste visando homogeneidade é necessário principalmente quando a ortofoto é composta por várias fotos que apresentam discrepâncias na coloração devido às condições climáticas diferentes no instante que foram tiradas.

Em resumo pode-se dizer que o método digital produz uma ortofotocarta sem as atuais composições fotográficas realizadas no método de produção convencional; e não há imagem descontínua pois os cálculos matemáticos e a reprojeção são feitos ponto por ponto.

Segundo Gaydos, ver referência [05], a idéia não é nova pois alguns dos modelos matemáticos para retificação de imagens varridas por microdensitômetro foram descritos por Konecny em 1976.

Diversos artigos científicos publicados por pesquisadores de outros países, em revistas especializadas e congressos internacionais, mostram o interesse e viabilidade da produção de ortofoto digital. Países como EUA, Inglaterra, França e Alemanha já a produzem de forma comercial, mas ainda continuam a pesquisar com o objetivo de aprimorar esta tecnologia.

Keating e Boston [10], em 1979, expuseram um sistema de software para criar uma ortofoto digital a partir de um DIM e de uma imagem varrida com microdensitômetro.

Por volta de 1979, Konecny (ver referência [11]) estava apto a sumarizar experiências com software para retificação de imagem digital e mostrar alguns de seus resultados, porém, o trabalho que forneceu a concepção, resultou poucas aplicações práticas.

Gaydos (ver referência [05]) escreve que, Olsen*, em 1984, concebeu um método eficiente para retificação. A estratégia de Olsen propõe uma transformação para os pontos

* Olsen.R., 1984, Digital Orthophoto Concept: Unpublished notes presented to technical staff, Western Mapping Center, U.S. Geological Survey.

d a malha regular do DIM, e uma outra transformação mais simples para interpolar pontos no interior da malha.

A presente dissertação apresenta o assunto organizado da seguinte forma: o capítulo 2 trata do desenvolvimento teórico para a produção de ortofoto digital; o capítulo 3 trata de equipamentos que podem servir para a produção; o capítulo 4 descreve o teste realizado aplicando um dos métodos expostos no capítulo 2, e o capítulo 5 conclui sobre o assunto, sobre o teste, e recomenda novos estudos para continuação.

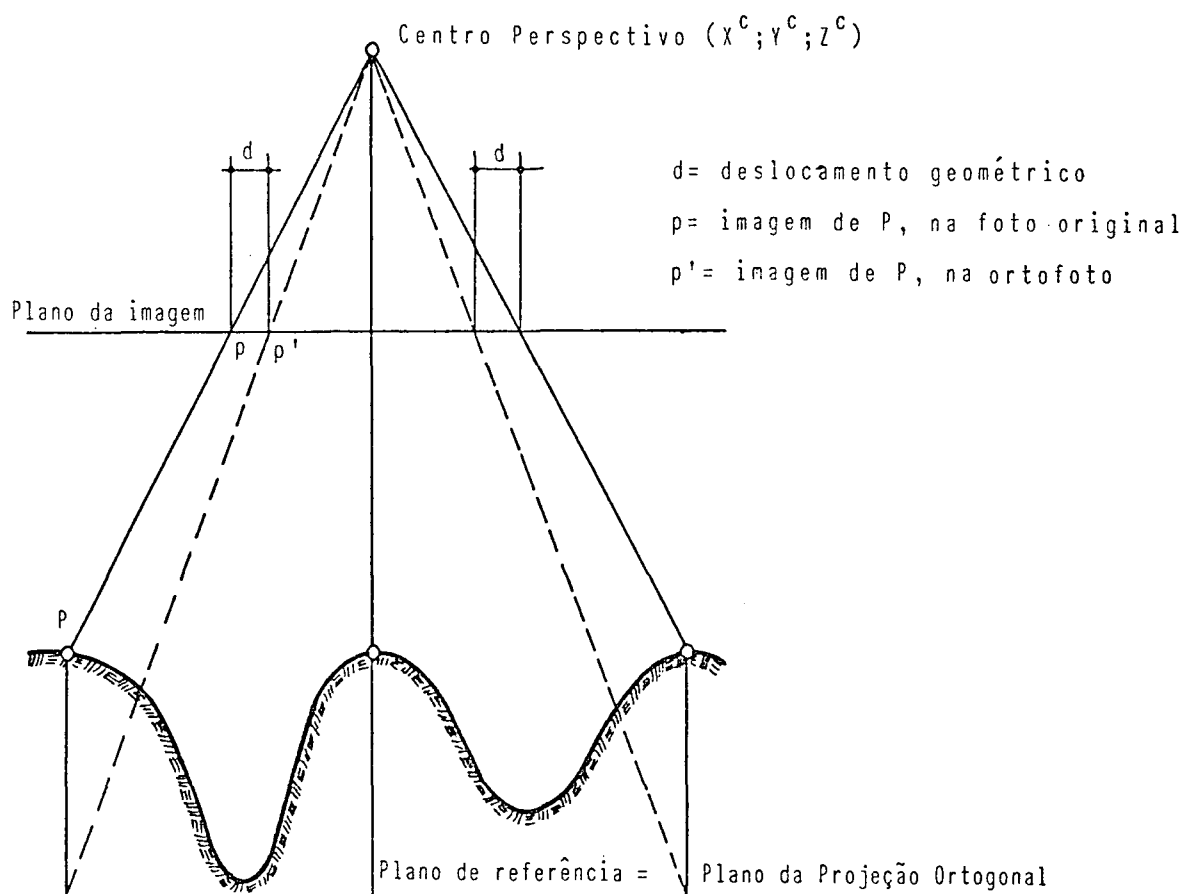


Figura 1.1 - Ilustra o deslocamento geométrico (d) — existente no plano da imagem — devido ao relevo topográfico.

2. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

2.1. GENERALIDADES

O princípio da produção da ortofoto digital consiste em transferir tons de cinza da fotografia aérea para uma malha fina e regular que representa a projeção ortogonal do terreno, ou seja, as coordenadas planas da ortofoto. Isto requer, pelo menos, os seguintes dados de entrada: a) a imagem digital da área; b) os valores da orientação interior e exterior; c) o modelo digital do terreno (DIM) — na forma de uma malha regular. A ortofoto digital pode ser produzida através dos métodos: direto ou indireto.

2.2. MÉTODO DIRETO

A produção por este método (ver Figuras 2.1. e 2.2.) parte das coordenadas de máquina ("scanner") e reprojeta o tom de cinza, a elas associado, sobre uma malha regular da ortofoto. Para isto, as coordenadas de máquina são transformadas em coordenadas do espaço-imagem (sistema fotográfico) através do modelo matemático da transformação afim. Depois, as coordenadas do espaço-imagem são transformadas em coordenadas do espaço-objeto (sistema local, por exemplo) através da inversa das equações de colinearidade. Salienta-se que a coordenada Z (altitude) — a ser introduzida nas equações de colinearidade inversa — é obtida por iteração (ver figura 2.3.); isto faz com que o tempo de processamento

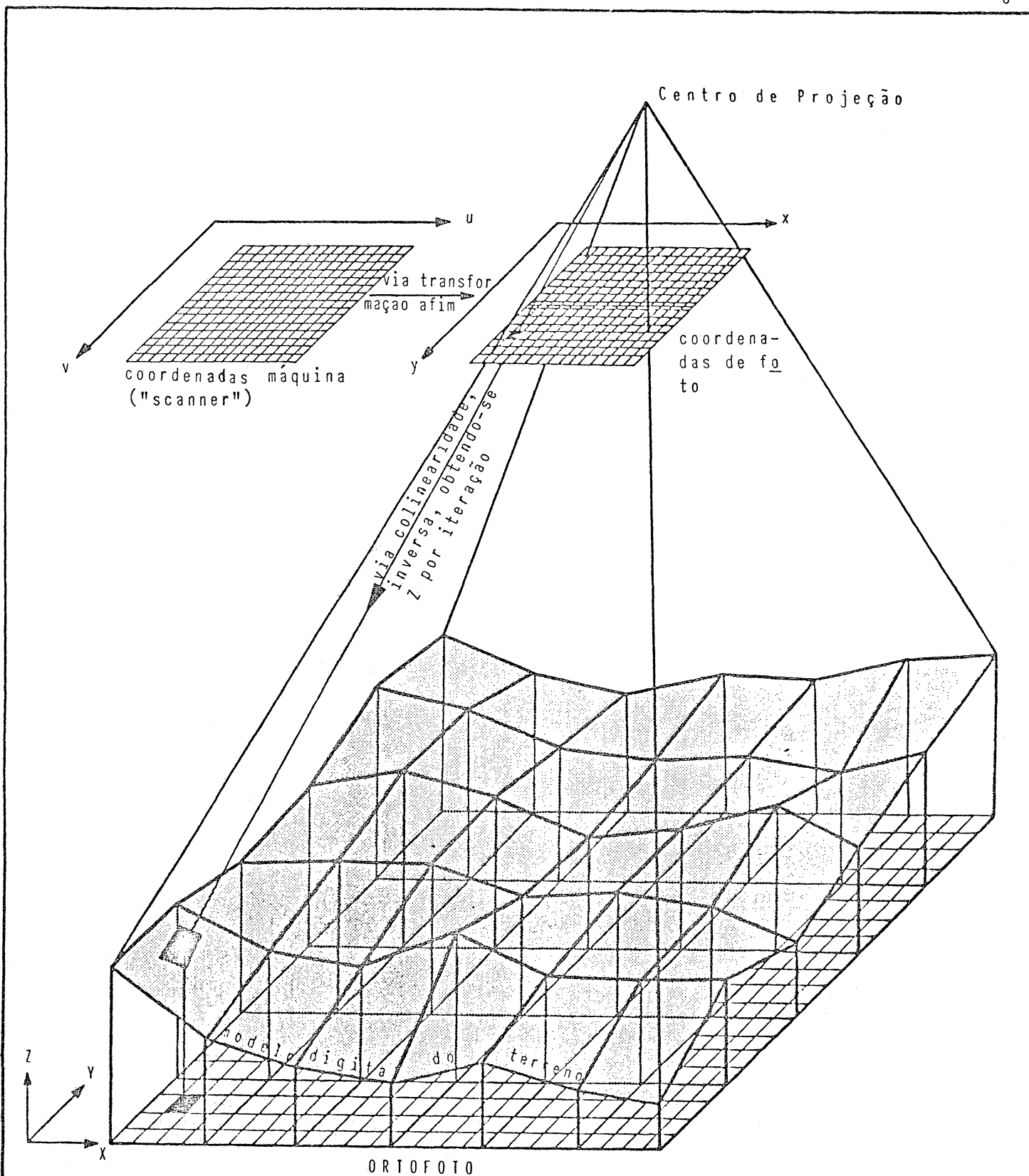


Figura 2.1 - Princípio da Produção de Ortofoto Digital, usando o Método Direto.

Figura 2.2 - No método Direto transfere-se o tom de cinza da foto rasterizada para a malha da ortofoto.

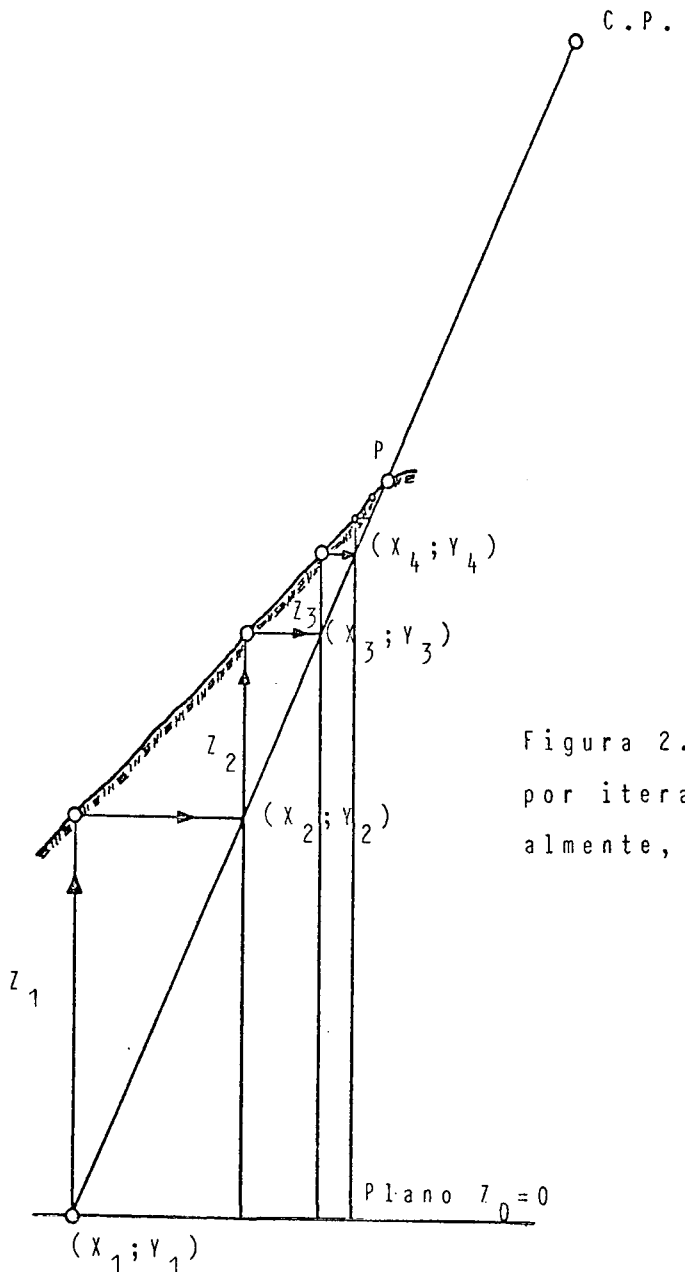
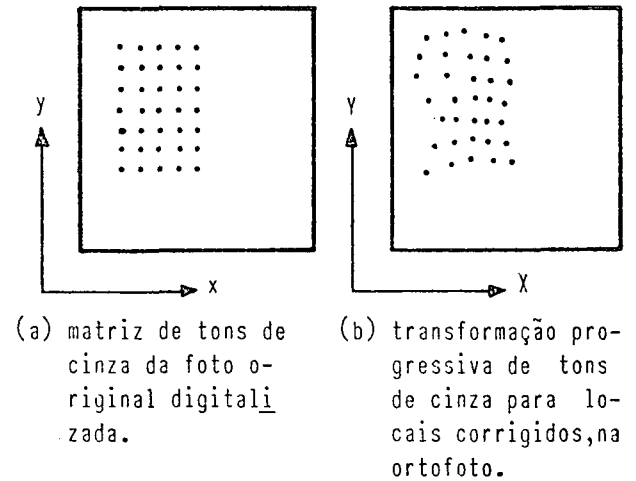
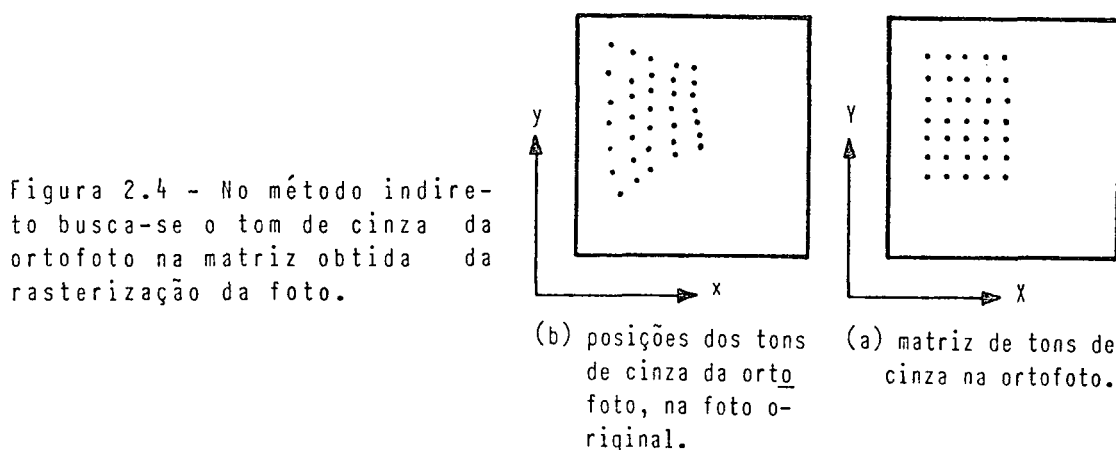


Figura 2.3 - Busca Z (Altitude) por iteração. Admite-se, inicialmente, que P tenha $Z = 0$.

computacional seja muito grande e o método direto pouco atrativo. Além disso no método direto as coordenadas do espaço objeto — calculadas e associadas a um tom de cinza — não coincidem exatamente com as posições retilíneas e ortogonais da malha da ortofoto.

2.3. MÉTODO INDIRETO

Neste método (ver Figuras 2.4. e 2.5.), transforma-se inicialmente as coordenadas do espaço-objeto em coordenadas do espaço-imagem aplicando as equações de colinearidade. A seguir, transforma-se as coordenadas do espaço-imagem em coordenadas de máquina ("scanner") aplicando as equações da transformação afim. Tendo-se as coordenadas do espaço-imagem, busca-se o tom de cinza numa matriz gerada pela "rasterização" da fotografia — aplicando-se interpolação; ou busca-se diretamente na fotografia extraíndo-o através duma "rasterização" não-ortogonal, que será exposta mais adiante no item 2.7.2. Este método exige menor esforço computacional e — nesta dissertação — foi escolhido para ser enfatizado e testado.



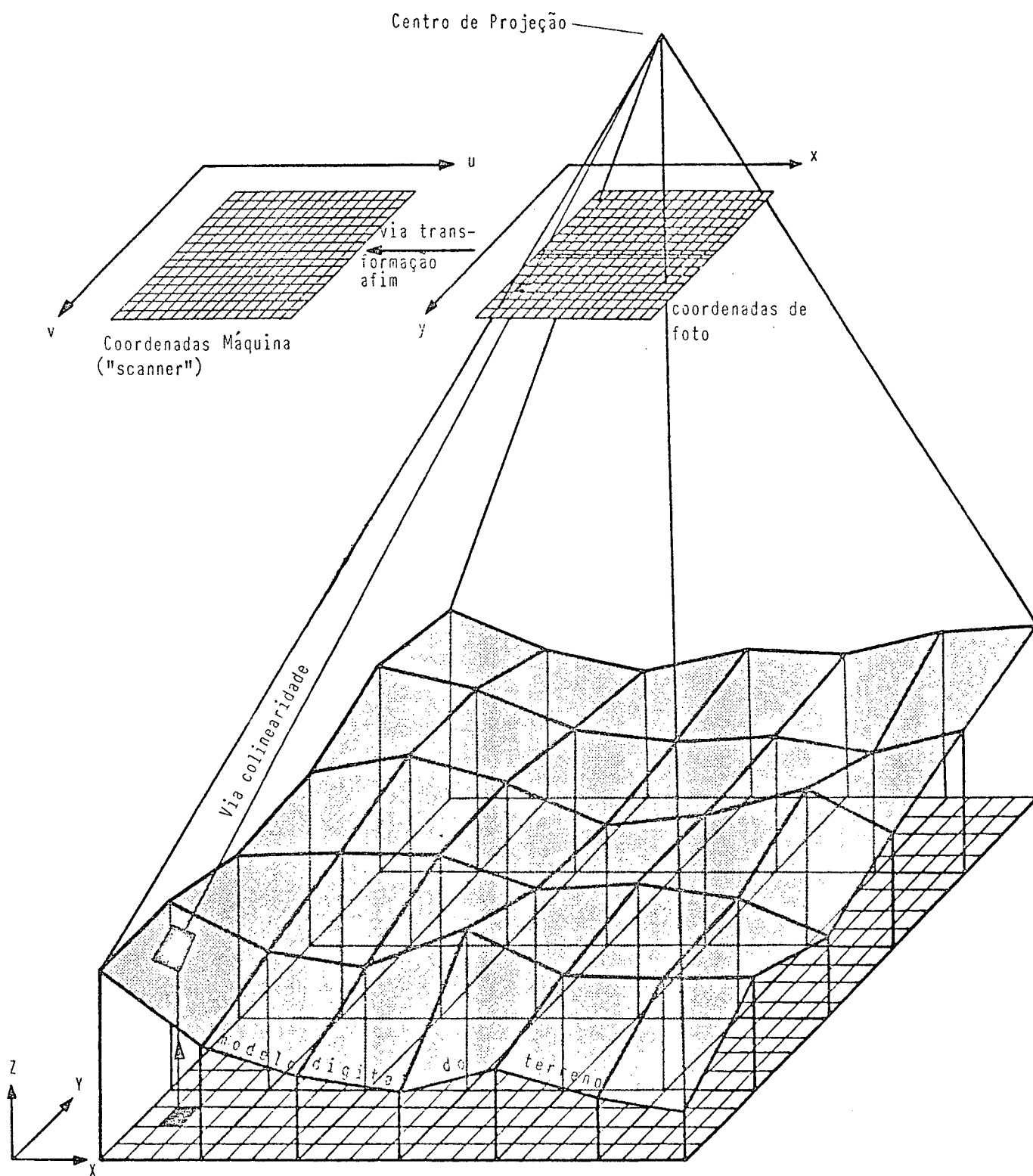


Figura 2.5 - Princípio da Produção de Ortofoto Digital usando o Método Indireto.

2.4. TRANSFORMAÇÃO GEOMÉTRICA

As transformações geométricas, aqui citadas, equivalem as mudanças de sistemas de coordenadas. Elas são necessárias para buscar o tom de cinza numa matriz originada pela "rasterização" da fotografia aérea. O método indireto — enfatizado nesta dissertação — possibilita duas maneiras para efetuar as transformações geométricas: a primeira denominada de Ponto por Ponto ou "Pixel by Pixel" (ver Figura 2.8); e a segunda de Pontos Âncora ou "Anchor Points" (ver Figura 2.9).

2.4.1. TRANSFORMAÇÃO GEOMÉTRICA PONTO POR PONTO OU "PIXEL BY PIXEL"

Esta maneira de proceder — ilustrada na Figura 2.8 — consiste em:

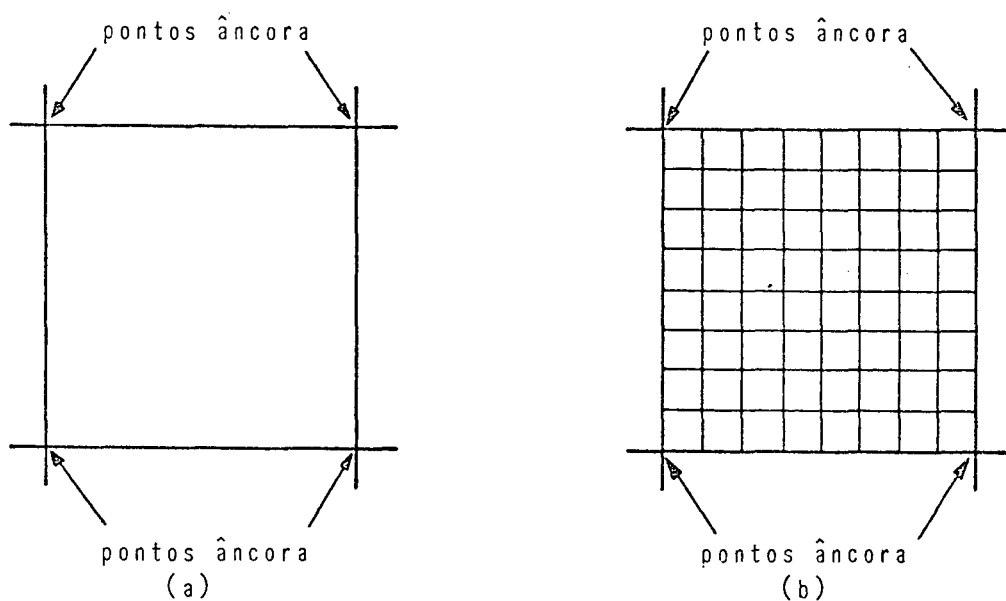
a) interpolar a altitude (Z) no interior da malha regular do DTM, usando um algoritmo que calcule $Z=f(X,Y)$, e que segundo as experiências de Leberl [12], pode ser uma interpolação bilinear, como ver-se-á adiante. Esta interpolação deve ser tal que forme células do tamanho daquelas desejadas para a ortofoto. A Figura 2.7 procura mostrar este detalhe;

b) projetar, cada coordenada do espaço-objeto (X,Y,Z) densificada, para o espaço imagem. Isto ocorre calculando-se as coordenadas de foto (x,y) através das equações de co-

linearidade;

c) transformar as coordenadas de foto (x,y) para o sistema de coordenadas máquina - "scanner" - (u,v) , aplicando a transformação afim.

Uma desvantagem deste procedimento é o longo tempo de computação usando microcomputadores. Entretanto, este fato é contornado quando se usa computadores maiores.



Figuras 2.7: A malha regular - pouco densa - do DIM é ilustrada em (a); e a malha regular densificada - que é igual a malha regular da órtofoto - é ilustrada em (b).

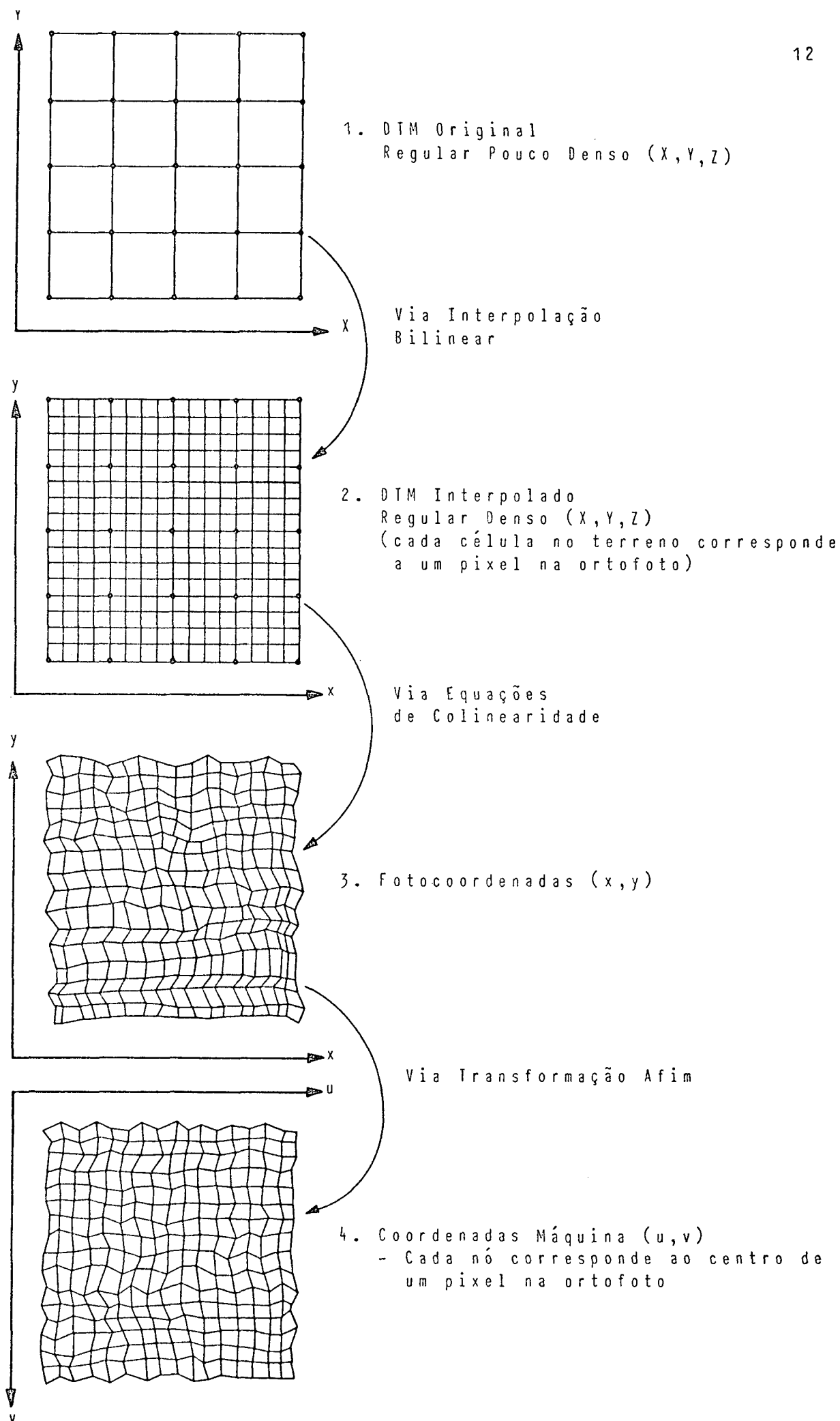


Figura 2.8 - Sequência para efetuar as transformações geomé-

2.4.2. TRANSFORMAÇÃO GEOMÉTRICA POR PONTOS ÂNCORA OU "ANCHOR POINTS"

Este procedimento reduz a quantidade de cálculos pois as equações de colinearidade e da transformação afim são aplicadas somente nos pontos âncora. Os pontos âncora delimitam uma célula da malha regular — pouco densa — do DTM, conforme ilustra a Figura 2.10. Os pontos âncora são transformados de coordenadas do espaço-objeto (X, Y, Z) para coordenadas do espaço-imagem (x, y) e destas para coordenadas de máquina (u, v) . As coordenadas de máquina (u, v) devem ser densificadas, ou interpoladas, de tal forma a tê-las para o centro de cada "pixel" da ortofoto. A densificação pode ser realizada aplicando a interpolação bilinear — discutida mais adiante. O algoritmo para o procedimento por pontos âncora é mais veloz, entretanto, considera que cada célula da malha regular — pouco densa — do DTM seja um elemento da superfície interpolada, o que não é verdade, como ilustra a Figura 2.9, nas três células da direita.

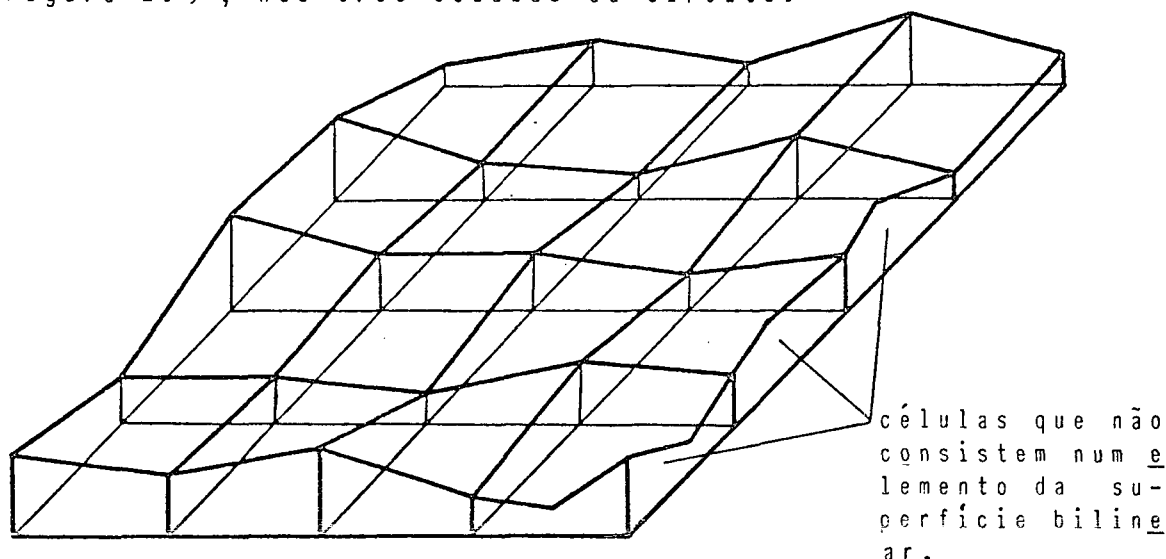


Figura 2.9 - Ilustra que nem toda a célula, da malha regular do DTM, é um elemento da superfície bilinear.

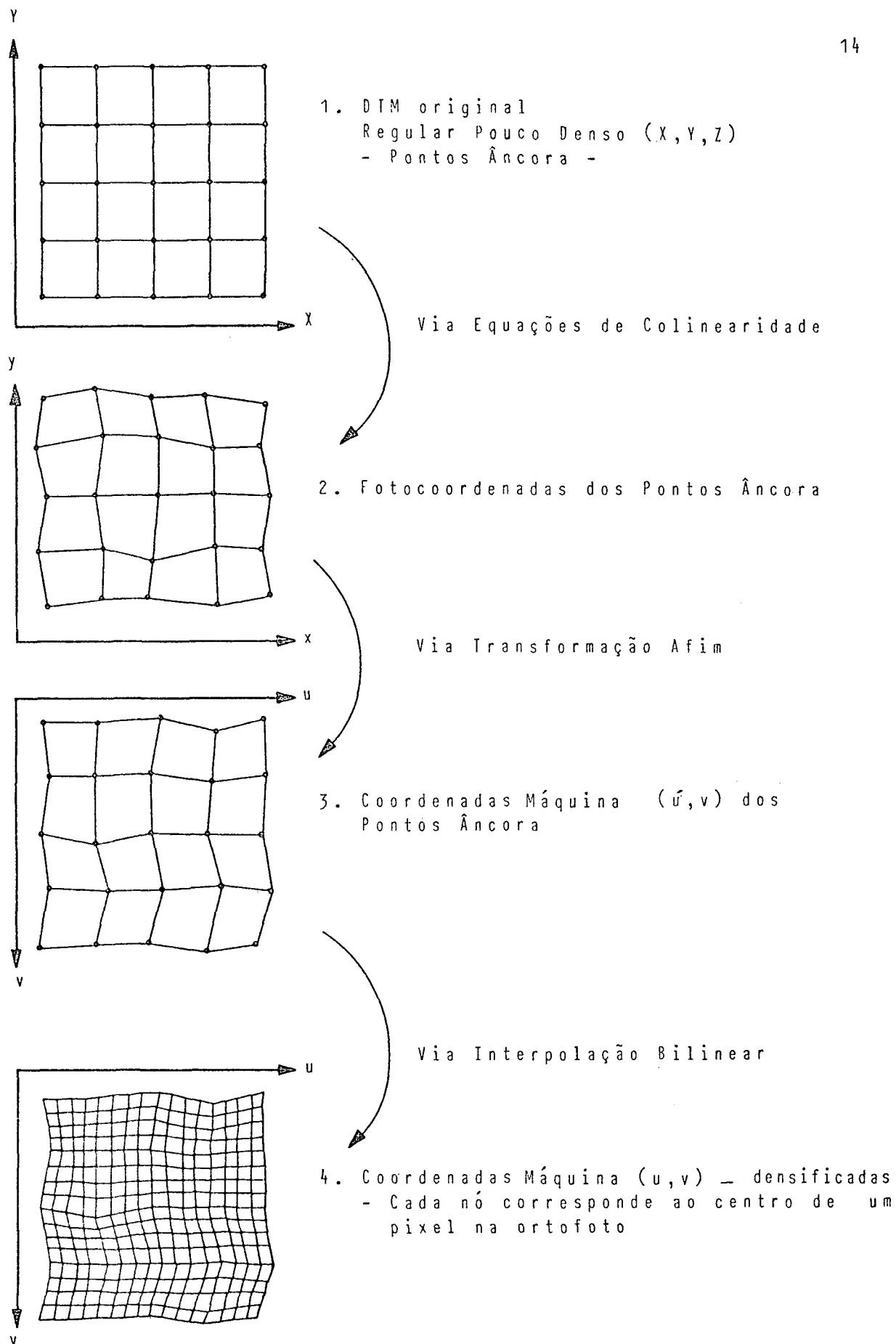


Figura 2.10. Sequência para efetuar as transformações geométricas, no método indireto, por "pontos âncora".

2.4.3. EQUAÇÕES DE COLINEARIDADE

Segundo Lugnani [13], as equações de colinearidade podem ser utilizadas na retificação analítica de imagens digitais, principalmente para o caso de imagens obtidas por projeção central. As equações de colinearidade são usadas para transformar as coordenadas do espaço-objeto (X, Y, Z) para o espaço-imagem (x, y) . A correspondência entre os pontos de terreno e os de foto é estabelecida tendo-se os parâmetros de orientação exterior $(W, \phi, K, X^C, Y^C, Z^C)$, os quais são determinados quando se tem três ou mais pontos de controle. A equação de colinearidade é deduzida com base na condição que os pontos C, p e P — respectivamente centro perspectivo, ponto imagem e ponto objeto — pertencem à uma reta (Ver Figura 2.11).

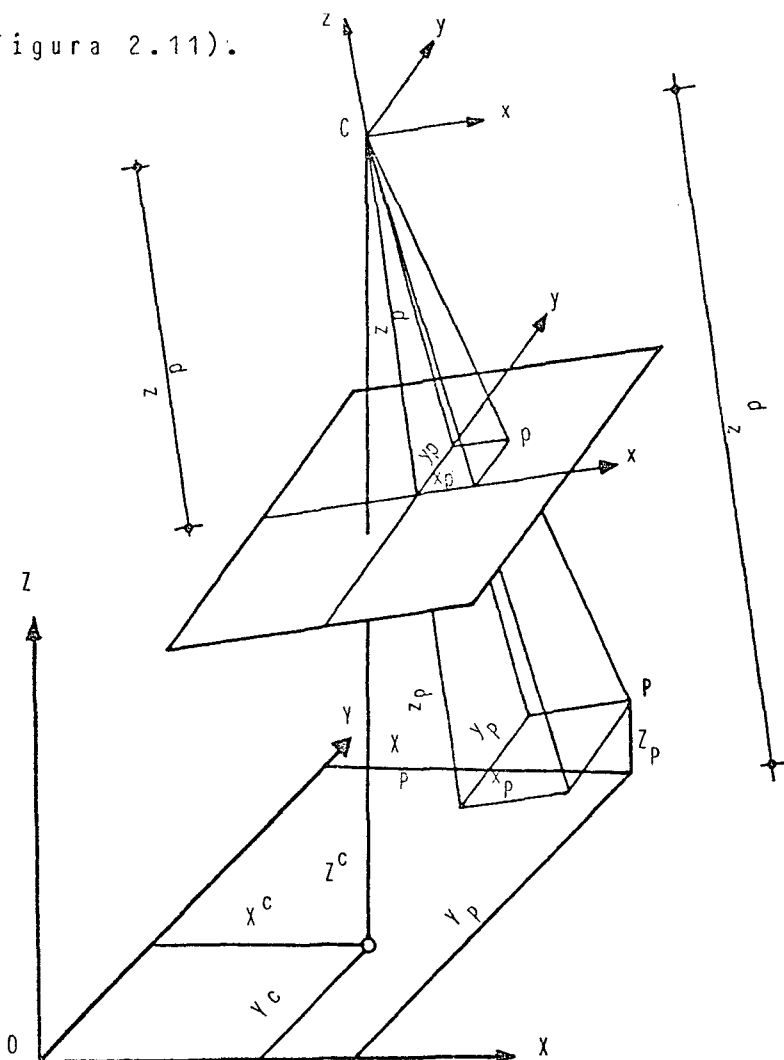


Figura 2.11 - Ilustra que C, p, P pertencem a uma reta. C, x, y, z representa o sistema fotográfico; O, X, Y, Z um sistema local; C é o centro perspectivo; p é o ponto da imagem e P o ponto objeto.

Da semelhança de triângulos (Figura 2.11) tem-se:

$$\frac{x_p}{x_p} = \frac{y_p}{y_p} = \frac{z_p}{z_p} \quad (1) \text{ equação da reta no espaço passando pela origem do sistema referencial cartesiano.}$$

donde se pode escrever:

$$x_p = \frac{z_p}{z_p} \cdot x_p \quad (2)$$

$$y_p = \frac{z_p}{z_p} \cdot y_p$$

Considere-se agora o sistema OXYZ do espaço objeto transladado, não paralelo e com diferente escala com respeito ao primeiro (Figura 2.11). A relação matemática entre coordenadas dos dois sistemas, Cxyz e OXYZ é dada pela transformação de similaridade. Nesta transformação estão envolvidos os movimentos causados pela matriz de rotação (M) e uma variação de escala (λ)

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \lambda \cdot M^T \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X^c \\ Y^c \\ Z^c \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde a transformação inversa:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \lambda \cdot M \begin{bmatrix} X_p - X^c \\ Y_p - Y^c \\ Z_p - Z^c \end{bmatrix} \quad (4)$$

Substituindo os valores de x_p , y_p e z_p dados pelas equações (4), nas equações (2) e negligenciando o índice p , temos:

$$x = \frac{m_{11}(X^C - Y^C) + m_{12}(Y - Y^C) + m_{13}(Z - Z^C)}{m_{31}(X - X^C) + m_{32}(Y - Y^C) + m_{33}(Z - Z^C)} \cdot -f$$

$$y = \frac{m_{21}(X - X^C) + m_{22}(Y - Y^C) + m_{23}(Z - Z^C)}{m_{31}(X - X^C) + m_{32}(Y - Y^C) + m_{33}(Z - Z^C)} \cdot -f \quad (5)$$

As equações acima são as equações de colinearidade que relacionam as fotocoordenadas (x, y) e as coordenadas de terreno locais (X, Y, Z) . Saliênta-se que $m_{11} \dots m_{33}$ são os elementos da conhecida matriz de rotações M , e que a distância focal calibrada (f) está representada na equação (4) por z_p .

2.4.4. RESSEÇÃO ESPACIAL

As correções de deslocamentos devido ao relevo e à projeção central requerem antes uma orientação absoluta da fotografia aérea. Os componentes desta orientação são os elementos de orientação interior e exterior da foto, a saber: $W, \phi, K, X^C, Y^C, Z^C, f, x_0$ e y_0 . Os elementos $W, \phi, K, X^C, Y^C, Z^C$ podem ser calculados por um processo analítico de resseção espacial conhecendo-se as fotocoordenadas de três ou mais pontos de controle.

Assim sendo, a resseção espacial consiste na determinação analítica dos parâmetros de orientação exterior W, ϕ, K, X^C, Y^C e Z^C de uma foto.

Segundo Lugnani [9], a resseção espacial de uma foto ou câmara pode ser definida como:

a) dadas as fotocoordenadas (x_i, y_i) de n pontos p_i ($n \gg 3$); as coordenadas (X_i, Y_i, Z_i) dos pontos correspondentes no espaço objeto; a constante da câmara f ; e os valores aproximados dos parâmetros incógnitos $(X_0^C, Y_0^C, Z_0^C, W_0, \phi_0, K_0)$;

b) calcular os parâmetros de orientação exterior da câmara $(X^C, Y^C, Z^C, W, \phi, K)$.

Neste caso as equações de colinearidade constituem o modelo que relaciona os dados e incógnitas do problema. Cada ponto observado nos dois espaços dá origem a duas equações, portanto, 3 pontos dariam solução única. Na prática usa-se geralmente superabundância de observações.

Para uma solução simplificada, admite-se os pontos observados no espaço objeto $P_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ como isentos de erros. Tal tratamento fará com que, nos primeiros membros das equações de colinearidade se tenha observações L^a e no segundo uma função dos parâmetros X^a (modelo explícito), ou seja:

$$L^a = F(X^a) \text{ que linearizada produz:}$$

$$A X - L = V$$

onde o significado dos termos são os usuais de ajustamento:

$$L = L_0 - L_b$$

$$L_b^T = (x_1, y_1, x_2, y_2 \dots x_n, y_n)$$

$$L_0 = F(X^0)$$

$$X^{0T} = (W_0 \ \phi_0 \ K_0 \ X_0^c \ Y_0^c \ Z_0^c)$$

$$A = \frac{\delta F}{\delta X^a} \quad \left| \begin{array}{l} X^a = X_0 \end{array} \right.$$

$$X^T = (\delta_w \ \delta_\phi \ \delta_k \ \delta_{X^c} \ \delta_{Y^c} \ \delta_{Z^c})$$

$$X = N^{-1} U$$

$$N = A^T P A$$

$$U = A^T P L$$

$$X^a = X^0 + X$$

A solução $X^a = X^0 + X$, fornece um primeiro valor ajustado X^a e deve ser usado como valor aproximado para uma próxima iteração. A iteração é requerida devido à linearização do modelo e deve ser interrompida quando o valor das correções X se tornarem negligenciáveis.

Desta exposição nota-se que a maior dificuldade está em montar a matriz A . Esta montagem é detalhada a seguir.

Como já comentado, para a obtenção dos parâmetros de orientação exterior X^c , Y^c , Z^c , W , ϕ e K , emprega-se o

sistema de equações de colinearidade (5), e que é reescrita abaixo para maior clareza da sequência.

$$x_i = \frac{m_{11}(x_i - x^c) + m_{12}(y_i - y^c) + m_{13}(z_i - z^c)}{m_{31}(x_i - x^c) + m_{32}(y_i - y^c) + m_{33}(z_i - z^c)} \cdot f$$

$$y_i = \frac{m_{21}(x_i - x^c) + m_{22}(y_i - y^c) + m_{23}(z_i - z^c)}{m_{31}(x_i - x^c) + m_{32}(y_i - y^c) + m_{33}(z_i - z^c)} \cdot f$$

Para torná-las linear aplica-se a fórmula de Taylor, então tem-se:

$$\frac{\delta x_i}{\delta x^c} = \frac{m_{31}x_i - m_{11}f}{f \lambda_i}, \text{ onde } \lambda_i = \frac{z_i - z^c}{m_{13}x_i + m_{23}y_i + m_{33}f}$$

$$\frac{\delta x_i}{\delta y^c} = \frac{m_{32}x_i - m_{12}f}{f \lambda_i}$$

$$\frac{\delta x_i}{\delta z^c} = \frac{m_{33}x_i - m_{13}f}{f \lambda_i}$$

$$\frac{\delta y_i}{\delta x^c} = \frac{m_{31}y_i - m_{21}f}{f \lambda_i}$$

$$\frac{\delta y_i}{\delta y^c} = \frac{m_{32}y_i - m_{22}f}{f \lambda_i}$$

$$\frac{\delta y_i}{\delta z^c} = \frac{m_{33}y_i - m_{23}f}{f \lambda_i}$$

(Obs: a matriz M é proveniente da seguinte ordem de rotação: K, ϕ , W)

$$\frac{\delta x_i}{\delta w} = y_i \operatorname{sen} \phi + \frac{x_i}{f} (x_i \operatorname{sen} K + y_i \operatorname{cos} K) + f \operatorname{sen} K \operatorname{cos} \phi$$

$$\frac{\delta y_i}{\delta w} = -x_i \operatorname{sen} \phi + \frac{y_i}{f} (x_i \operatorname{sen} K + y_i \operatorname{cos} K) + f \operatorname{cos} K \operatorname{cos} \phi$$

$$\frac{\delta x_i}{\delta \phi} = -f \operatorname{cos} K - \frac{x_i}{f} (x_i \operatorname{cos} K - y_i \operatorname{sen} K)$$

$$\frac{\delta y_i}{\delta \phi} = f \operatorname{sen} K - \frac{y_i}{f} (x_i \operatorname{cos} K - y_i \operatorname{sen} K)$$

$$\frac{\delta x_i}{\delta k} = y_i$$

$$\frac{\delta y_i}{\delta k} = -x_i$$

Os parâmetros aproximados para foto aérea aproximadamente vertical podem ser obtidos da seguinte forma:

Z_0^c = altitude de vôo

$W_0 = 0^\circ$

$\phi_0 = 0^\circ$

K_0 = dado pela direção aproximada de vôo, $0^\circ, 180^\circ$ ou $\pm 90^\circ$ (casos mais comuns para produção de ortofoto)

X_0^c e Y_0^c , podem ser obtidos das expressões adiante, que representam a inversa das equações de colinearidade.

$$X_i = X_0^C + (Z - Z_0^C) \cdot \frac{m_{11}x_i + m_{21}y_i + m_{31} \cdot f}{m_{13}x_i + m_{23}y_i + m_{33} \cdot f}$$

$$Y_i = Y_0^C + (Z - Z_0^C) \cdot \frac{m_{12}x_i + m_{22}y_i + m_{32} \cdot f}{m_{13}x_i + m_{23}y_i + m_{33} \cdot f}$$

onde:

X_i, Y_i = coordenadas de terreno

x_i, y_i = coordenadas de foto

$\phi_0, W_0 = 0^\circ$

$K_0 = 0^\circ, 180^\circ$ ou $\pm 90^\circ$

$m_{11} = \cos \phi \cdot \cos K$

$m_{12} = \cos W \cdot \sin K + \sin W \cdot \sin \phi \cdot \cos K$

$m_{13} = \sin W \cdot \sin K - \cos W \cdot \sin \phi \cdot \cos K$

$m_{21} = -\cos \phi \cdot \sin K$

$m_{22} = \cos W \cdot \cos K - \sin W \cdot \sin \phi \cdot \sin K$

$m_{23} = \sin W \cdot \cos K + \cos W \cdot \sin \phi \cdot \sin K$

$m_{31} = \sin \phi$

$m_{32} = -\sin W \cdot \cos \phi$

$m_{33} = \cos W \cdot \cos \phi$

Obs: outra maneira de se obter X_0^C, Y_0^C seria fazer uma interpolação gráfica sobre o mapa de linha existente da região.

2.4.5. MODELO DIGITAL DO TERRENO (DTM)

No caso da produção de ortofoto digital, o DTM deve-se apresentar como um conjunto de altitudes do terreno, configurado numa malha regular. Para se obter uma ortofoto com boa precisão e resolução é fundamental que se tenha um DTM também de boa qualidade. As informações primárias sobre o relevo da região podem ser obtidas, entre outros processos, a partir: a) de um modelo estéreo-fotogramétrico; b) da digitalização das curvas de nível já existente; c) de dados coletados no campo por topografia convencional. O DTM é obtido após um planejamento da estrutura de dados que reflita com precisão a informação geomorfológica. O DTM na forma de uma malha regular é gerado aplicando-se métodos de interpolação.

Os principais métodos de interpolação para gerar a malha são: spline, predição linear, lagrange, bicúbica e bilinear. Diversos pesquisadores de vários países já publicaram trabalhos nesta área, entre outros encontram-se: Heinrich Ebner [3], G.H. Schut [20] e F. Leberl [12]. São conhecidos internacionalmente os "softwares" CIP (Contourn Interpolation Programme), e o HIFI (High Interpolation by Finitary Elements). No Brasil, pesquisa e software estão sendo iniciados no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, da Universidade Federal do Paraná, em trabalho de dissertação de mestrado de Júlio Cesar de Menezes [17].

2.4.6. TRANSFORMAÇÃO DAS COORDENADAS DE TERRENO EM COORDENADAS DE FOTO

Já foi comentado anteriormente que o método indireto, para produção de ortofoto digital, é preferido, sendo assim, é necessário buscar inicialmente as coordenadas fotográficas (x,y) .

Como as coordenadas do espaço-objeto (X,Y,Z) — da malha regular do DTM — são conhecidas, é possível aplicar as equações de colinearidade (5) para obter as correspondentes coordenadas do espaço-imagem (x,y) , ver Figura 2.12. No item 2.2.4 — Resseção Espacial — detalhou-se como calcular os parâmetros incógnitos das equações de colinearidade.

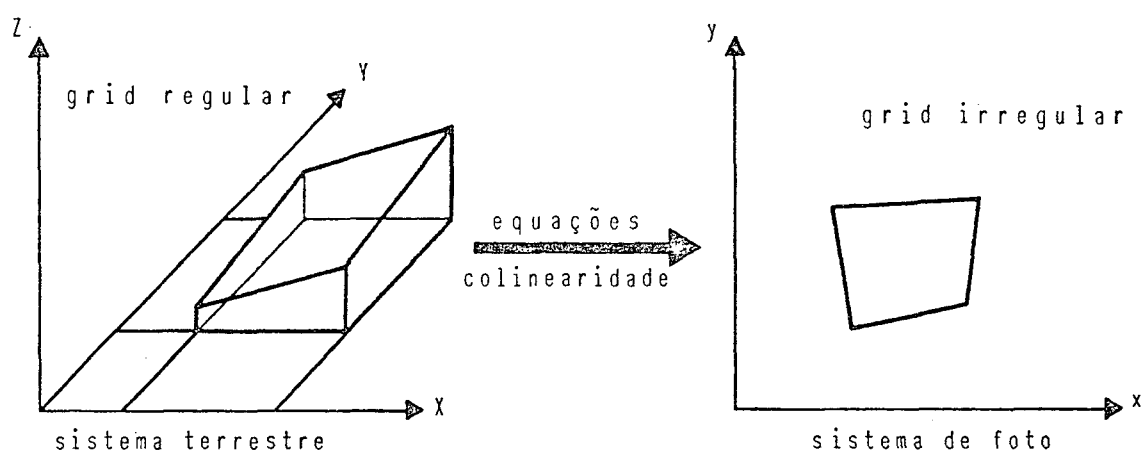


Figura 2.12 - Ilustra a passagem das coordenadas do sistema terrestre para coordenadas do sistema de foto, via equações de colinearidade.

2.4.7. CORREÇÃO DE DISTORÇÕES NAS COORDENADAS DE FOTO

Segundo Keating |10|, o equipamento "scanner" que rasteriza a foto original, pode também funcionar como um monocomparador, extraíndo da foto as coordenadas de máquina (u,v) dos pontos de controle que nela aparecem. Conhecendo-se as coordenadas das marcas fiduciais no sistema fotográfico e no sistema de máquina, pode-se aplicar a transformação afim e obter as coordenadas fotográficas dos pontos de controle. Estas coordenadas servirão de base para realizar a resseção espacial, e, desejando-se resultados mais refinados, poderão ser corrigidas dos erros sistemáticos antes de entrarem nas equações de colinearidade (5) para obtenção dos parâmetros da orientação exterior. Assim, cada uma destas coordenadas pode ter sua posição geométrica modificada pela combinação das correções devido a: distorção radial da lente e refração atmosférica. Ainda segundo Keating, as correções das distorções descentradas poderão ser desprezadas (no caso da produção de ortofoto) uma vez que seus valores são muito pequenos — normalmente inferiores a cinco micra .

Segundo Lugnani |13|, a correção da distorção radial da lente é dada pelo modelo.

$$x = x' - x' (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots)$$

$$y = y' - y' (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots)$$

onde:

x, y = coordenadas corrigidas

x', y' = coordenadas afetadas da distorção

K_i = parâmetros das distorções da lente obtidos da calibração da câmara

$$r^2 = (x'^2 + y'^2)$$

E, ainda de acordo com Lugnani [13], a correção dos deslocamentos devido à refração atmosférica, pode ser estimada por:

$$x = x' - \delta x$$

$$y = y' - \delta y$$

onde:

x, y = coordenadas corrigidas

x', y' = coordenadas afetadas da distorção

$\delta x, \delta y$ = correção devido à refração atmosférica

e,

$$\delta x = x' \cdot \epsilon_{45} \cdot \frac{-r^2}{f^2} + 1$$

$$\delta y = y' \cdot \epsilon_{45} \cdot \frac{-r^2}{f^2} + 1$$

onde:

$$r^2 = x'^2 + y'^2$$

$$\epsilon_{45} = 13 (z_c - z_p) \cdot 1 - 0,02 (2z_c + z_p) \cdot 10^{-6}$$

sendo:

Z_c = altitude de vôo, em quilômetros

Z_p = altitude média do terreno, em quilômetros

Tanto o assunto da correção devido à distorção radial da lente como o devido à refração atmosférica podem ser visto com mais profundidade em Andrade [01].

2.4.8. INTRODUÇÃO DE DISTORÇÕES NAS COORDENADAS DE FOTO

Após a transformação das coordenadas do espaço objeto (X, Y, Z) — nós da malha regular do DIM — em coordenadas de foto (x, y) e antes da transformação para coordenadas de máquina ("scanner"); é necessário a introdução dos erros sistemáticos, citados anteriormente, caso se deseje resultados mais refinados. Isto se deve ao fato do "scanner" raterizar a foto original que está afetada daquelas distorções. A introdução dos erros sistemáticos nas coordenadas fotográficas — obtidas a partir dos nós da malha regular pelas equações de colinearidade — é um dos procedimentos mais importantes sob o ponto de vista teórico para a aplicação do método indireto, sendo portanto exatamente o contrário das aplicações usuais na fotogrametria.

2.4.9. TRANSFORMAÇÃO DAS COORDENADAS DE FOTO (x,y) EM COORDEHADAS MÁQUINA ("SCANNER")

No método indireto, como já se viu, é necessário transformar as coordenadas de foto (x,y) em coordenadas máquina (u,v), aplicando o modelo matemático da transformação afim, que transforma coordenadas de um sistema para outro, envolvendo uma rotação, a não perpendicularidade dos eixos, duas trocas de escala e duas translações. Este assunto é explorado, de forma pormenorizada, em Moffitt [18].

O modelo matemático da transformação afim é expresso por

$$\begin{aligned} x_2 &= a_1 x_1 + b_1 y_1 + c_1 \\ y_2 &= a_2 x_1 + b_2 y_1 + c_2 \end{aligned} \quad (6)$$

onde:

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

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}$$

Os parâmetros são determinados quando pelo menos três pontos são conhecidos nos dois sistemas.

A transformação afim pode ser interpretada como um modelo matemático para corrigir a deformação do filme (não ortogonalidade e diferenças de escala). Isto se processa aplicando as equações (6), assim:

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

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

u, v = coordenadas máquina ("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 fotográfico. Geralmente são conhecidas as coordenadas das marcas fiduciais. Os coeficientes são determinados apenas uma vez para cada foto. A solução, aplicando ajustamento paramétrico, é:

$$X = (A^T P A)^{-1} (A^T P L)$$

onde:

$$X^T = a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3 = \text{parâmetros incógnitos}$$

P = matriz identidade, uma vez que considera-se todas as observações com o mesmo grau de confiança

$$L_b^T = u_1, u_2, u_3, u_4, v_1, v_2, v_3, v_4 \quad (\text{coordenadas máquina observadas — geralmente das marcas fiduciais})$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_2 & y_2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_3 & y_3 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_4 & y_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_1 & y_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_2 & y_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_3 & y_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_4 & y_4 \end{bmatrix}$$

2.5. DENSIFICAÇÃO DAS COORDENADAS

Nesta investigação escolheu-se o método de interpolação bilinear. Outros métodos de interpolação como Spline, Lagrange e Bicúbica, poderiam ser usados mas exigiriam maior esforço de computação.

Aplicando-se o polinômio bilinear pode-se interpolar: as coordenadas de altitude (Z); as coordenadas de foto (x, y); as coordenadas de máquina — "scanner" — (u, v) e o valor do tom de cinza. Estas aplicações são descritas em 2.5.1 a 2.5.4.

Segundo Wiesel [22], uma visão superficial das características das interpolações Vizinho Mais Próximo, Bilinear e Bicúbica, pode ser observada no quadro a seguir:

Método de amostragem	Nº de pontos consultados	Estimativa de erro
Vizinho mais próximo	1x1	15,7%
Bilinear	2x2	3,7%
Bicúbica	4x4	0,3%

A interpolação bilinear resulta da aplicação de um polinômio bilinear. É possível quando se tem quatro pontos conhecidos como referência. Este polinômio tem a forma:

$$A = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy \quad (8)$$

onde:

A = elemento que se deseja interpolar, função de posição;

x, y = coordenadas planimétricas do elemento a ser interpolado;

a_0, \dots, a_3 = coeficientes

Numa malha constituída de quadriláteros, nenhuma descontinuidade ocorrerá ao longo dos limites das células uma vez que qualquer ponto pertencente à um lado será interpolado em função dos extremos desse lado. O resultado independe se o ponto pertence a um ou outro quadrilátero cujo lado comum foi considerado.

Para Schut [20], o polinômio bilinear de quatro termos fornece um valor ajustado para o elemento interpolado no interior da malha. O polinômio ainda interpola, linear-

mente, ao longo dos limites da malha.

Alternativamente, selecionando um sistema de coordenadas local no qual as coordenadas dos quatro cantos são 0 ou 1 (ver Figura 2.13) e, numerando convenientemente os quatro pontos, a interpolação bilinear pode ser escrita:

$$A' = A_1 + (A_2 - A_1)x + (A_3 - A_1)y + (A_1 - A_2 - A_3 + A_4)xy \quad (9)$$

onde: A' = valor interpolado, função de posição;

x, y = variam de 0 a 1, coordenadas planimétricas do elemento a ser interpolado

A_1 a A_4 = valores conhecidos, nos quatro cantos

A expressão, (9), pode ser demonstrada assim:

A equação da interpolação bilinear, (8), como já visto, é:

$$A = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy$$

Se o sistema referencial for como mostra a figura 2.13 e os valores A_i conhecidos nos quatro pontos P_i , então, os coeficientes a_i calculados pela aplicação de (8) em cada ponto P_i serão: $a_0 = A_1$; $a_1 = (A_2 - A_1)$; $a_2 = (A_3 - A_1)$ e $a_3 = (A_4 - A_3 - A_2 + A_1)$.

Conseqüentemente para um valor interpolado (A') num ponto qualquer (x, y) teremos:

$$A' = A_1 + (A_2 - A_1)x + (A_3 - A_1)y + (A_4 - A_3 - A_2 + A_1)xy$$

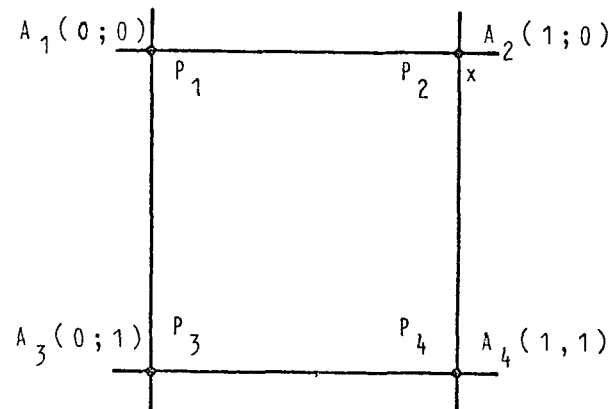


Figura 2.13 - Ilustra um sistema referencial onde as coordenadas planimétricas (x,y) dos valores A_i , variam de 0 a 1.

2.5.1. APLICAÇÃO PARA INTERPOLAR A ALTITUDE (Z)

Quando a malha regular do DTM se apresentar pouco densa, deve-se interpolar a coordenada de altitude (Z) no interior daquela malha. Com esta interpolação obtem-se uma malha regular mais fina, igual a que se deseja para a ortofoto. Este assunto já foi comentado em 2.4.1 e ilustrado pela Figura 2.7.

Esta interpolação pode ser realizada aplicando o polinômio bilinear para cada célula da malha regular do DTM. Assim resulta:

$$Z = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3XY$$

onde:

Z = altitude a ser interpolada

X, Y = coordenadas terrestres locais planimétricas
do ponto que se deseja interpolar

a_0, \dots, a_3 = coeficientes

Os coeficientes incógnitos tornam-se conhecidos a partir da montagem de quatro equações. Isto é possível porque conhece-se os dados dos quatro pontos de canto de cada célula.

$$Z_1 = a_0 + a_1 X_1 + a_2 Y_1 + a_3 X_1 Y_1$$

$$Z_2 = a_0 + a_1 X_2 + a_2 Y_2 + a_3 X_2 Y_2$$

$$Z_3 = a_0 + a_1 X_3 + a_2 Y_3 + a_3 X_3 Y_3$$

$$Z_4 = a_0 + a_1 X_4 + a_2 Y_4 + a_3 X_4 Y_4$$

Como já visto anteriormente, é possível expressar a mesma situação assim:

$$Z' = Z_1 + (Z_2 - Z_1) dx + (Z_3 - Z_1) dy + (Z_1 - Z_2 - Z_3 + Z_4) dx dy$$

onde:

Z' = altitude a ser interpolada

Z_1, \dots, Z_4 = altitudes conhecidas dos quatro cantos
da célula

dx, dy = coordenadas locais, variando de 0 a 1

Obs: É útil lembrar que caso opte-se por interpolar Z para cada "pixel" da ortofoto, há necessidade de aplicar as equações de colinearidade e a transformação afim também para cada "pixel", e o tempo de processamento será muito

grande—como já comentado no processamento ponto a ponto.

2.5.2. APLICAÇÃO PARA INTERPOLAR AS COORDENADAS DE FOTO

Para economizar tempo de cálculo pode-se aplicar as equações de colinearidade somente nos quatro pontos da malha regular pouco densa do DTM, obtendo-se assim as coordenadas fotográficas correspondentes. Para se obter as coordenadas fotográficas no interior da malha regular pouco densa aplica-se o polinômio bilinear pois, para os quatro pontos da malha regular se conhece as coordenadas terrestres (X, Y) e as de foto (x, y) , ver Figura 2.12. Todos os cálculos se repetem para cada célula da rede regular. A aplicação do polinômio se dá assim:

$$x' = a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 XY$$

$$y' = a_4 + a_5 X + a_6 Y + a_7 XY$$

onde:

x', y' = coordenadas de foto que se deseja interpolar

X, Y = coordenadas terrestres planimétricas conhecidas

a_0, \dots, a_7 = coeficientes

As equações para obtenção dos coeficientes toma a forma:

$$x_1 = a_0 + a_1 X_1 + a_2 Y_1 + a_3 X_1 Y_1$$

$$y_1 = a_4 + a_5 X_1 + a_6 Y_1 + a_7 X_1 Y_1$$

$$x_2 = a_0 + a_1 X_2 + a_2 Y_2 + a_3 X_2 Y_2$$

$$y_2 = a_4 + a_5 X_2 + a_6 Y_2 + a_7 X_2 Y_2$$

$$x_3 = a_0 + a_1 X_3 + a_2 Y_3 + a_3 X_3 Y_3$$

$$y_3 = a_4 + a_5 X_3 + a_6 Y_3 + a_7 X_3 Y_3$$

$$x_4 = a_0 + a_1 X_4 + a_2 Y_4 + a_3 X_4 Y_4$$

$$y_4 = a_4 + a_5 X_4 + a_6 Y_4 + a_7 X_4 Y_4$$

onde:

x, y = coordenadas de foto (sistema fotográfico) conhecidas dos quatro pontos da célula DTM

X, Y = coordenadas de terreno (sistema local) conhecidas dos quatro pontos da malha regular do DTM

como já mostrado, também pode-se escrever:

$$x' = x_1 + (x_2 - x_1)dx + (x_3 - x_1)dy + (x_1 - x_2 - x_3 + x_4)dxdy$$

$$y' = y_1 + (y_2 - y_1)dx + (y_3 - y_1)dy + (y_1 - y_2 - y_3 + y_4)dxdy$$

Convém lembrar que a passagem das coordenadas de foto, interpoladas, para as coordenadas digitais se dará através da aplicação da transformação afim, ponto por ponto. Este procedimento, ponto por ponto, consome muito tempo de computação e desta forma também não é o mais indicado.

2.5.3. APLICAÇÃO PARA INTERPOLAR AS COORDENADAS DE MÁQUINA - "SCANNER" (u,v)

As coordenadas terrestres (X,Y,Z) dos quatro pontos dos cantos de cada célula da malha pouco densa do DIM, são transformadas para coordenadas de foto (x,y) e depois para coordenadas digitais (u,v).

Agora, o polinômio bilinear pode ser aplicado para interpolar as coordenadas digitais (u,v) de cada pixel dentro da célula. Os cálculos se repetem para cada célula da malha regular pouco densa do DIM.

Isto economiza tempo de processamento pois as equações de colinearidade e as da transformação afim são aplicadas somente quatro vezes para cada célula.

O polinômio bilinear - aplicado para interpolar as coordenadas de máquina (u,v) - toma a forma:

$$u = a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 XY$$

$$v = a_4 + a_5 X + a_6 Y + a_7 XY$$

semelhante ao que já foi mostrado para interpolar as coordenadas de foto (x,y), portanto, são válidas também a mesma forma de montagem para solucionar os coeficientes incógnitos, assim como, a forma simplificada, (9).

Esta maneira de processar os dados é usada por vários pesquisadores de outros países. O teste apresentado nesta dissertação também foi realizado processando as transformações geométricas da forma descrita neste item.

2.5.4. APLICAÇÃO PARA INTERPOLAR O TOM DE CINZA

A interpolação do tom de cinza é necessária quando a foto aérea é digitalizada através de uma varredura ortogonal⁽¹⁾; pois neste caso as coordenadas digitais (u,v) calculadas ou interpoladas, não coincidem com o centro de nenhum pixel da varredura ortogonal.

É conveniente lembrar que a interpolação do tom de cinza é desnecessária quando se realiza a digitalização da foto aérea através de varredura não ortogonal, ver o item 2.7.2.

Para interpolar o tom de cinza, o polinômio bilinear pode ser escrito da forma simplificada pois as coordenadas máquina (u,v) dos quatro vértices mais próximos variam de uma unidade, ver Figura 2.14.

O tom de cinza assim interpolado representa o resultado do processo de retificação de cada pixel. O tom é armazenado num disco ou fita para em seguida gerar a ortofoto com ajuda de um equipamento que converta dados digitais em analógicos. O processo descrito tem que ser desenvolvido para cada pixel da ortofoto.

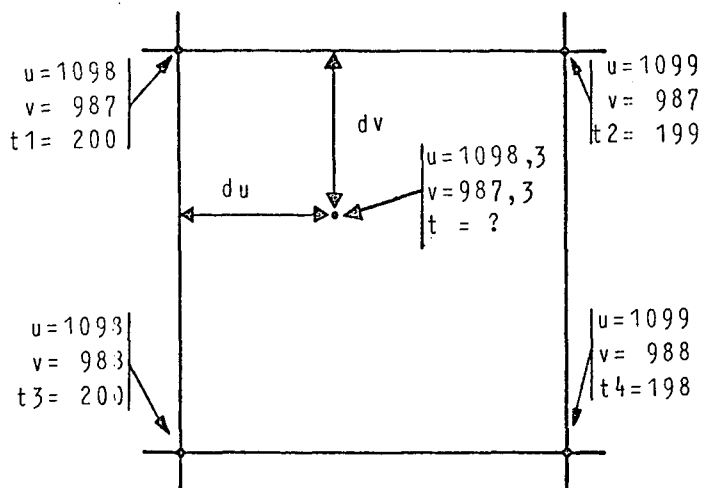


Figura 2.14 - As coordenadas máquina (u,v), obtidas da rasterização da foto, variam de uma unidade.

(1) Os tipos de varredura serão vistos nos itens 2.7.1 e 2.7.2

2.6. INTERPOLAÇÃO DO TOM DE CINZA PELO MÉTODO "VIZINHO MAIS PRÓXIMO"

Um dos métodos mais simples para a busca do tom de cinza é aquele que toma o valor de cinza das coordenadas máquina (u,v) inteiras mais próximas — a Figura 2.15 ilustra esta interpolação.

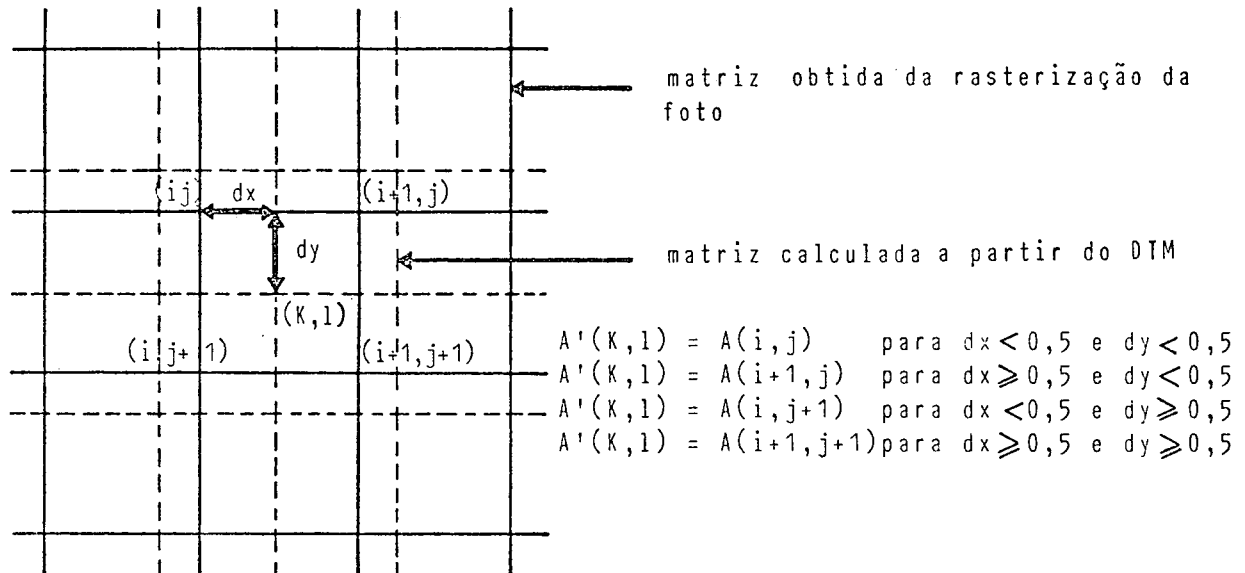


Figura 2.15: Interpolação pelo "vizinho mais próximo"

2.7. DIGITALIZAÇÃO DA FOTO

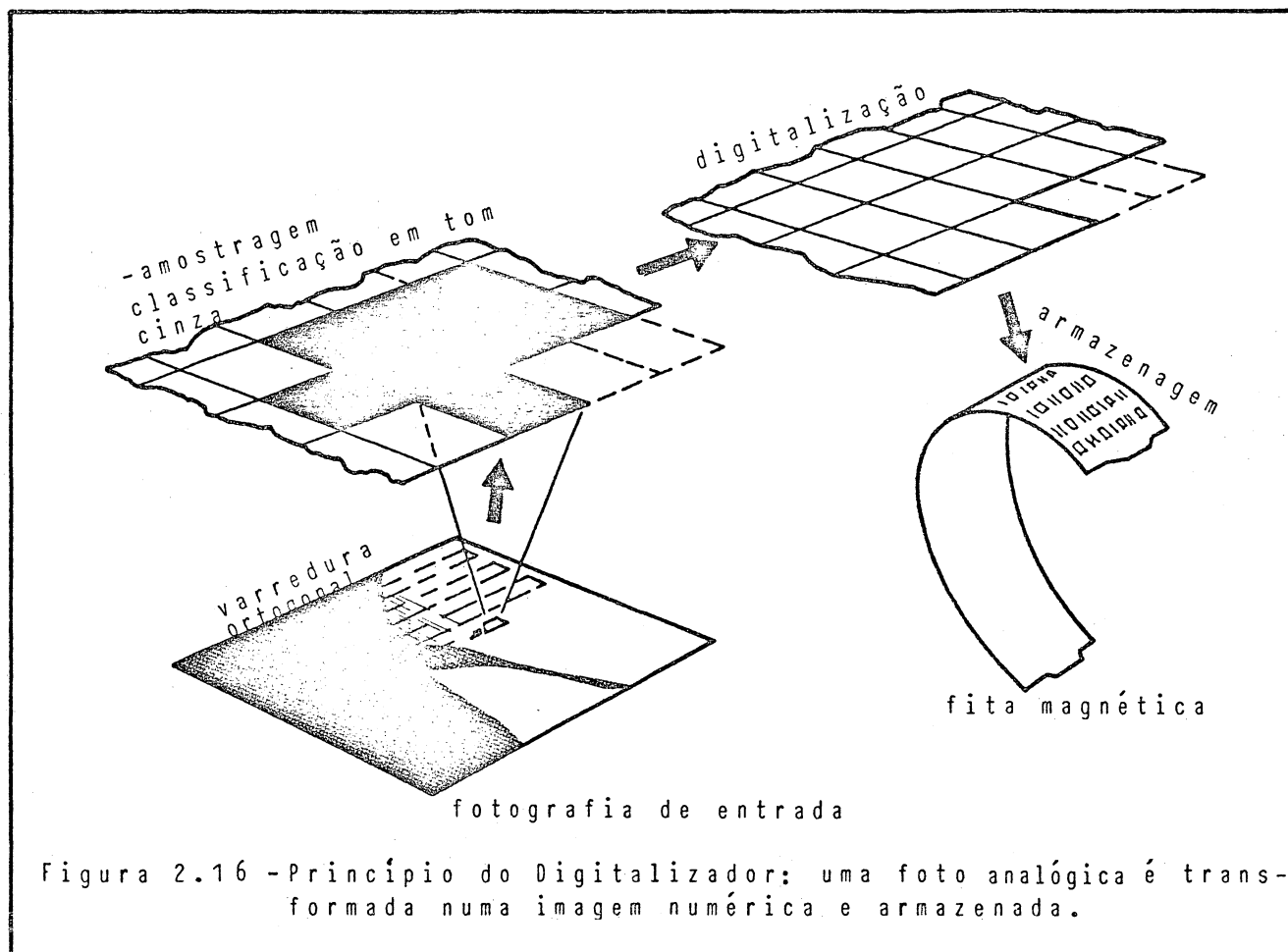
Uma imagem digital pode ser gerada por um equipamento que subdivide a imagem em uma malha quadrada, e armazena numa matriz o valor do tom de cinza de cada célula, ou, subdivisão. À intensidade de luz que atravessa a área de cada subdivisão ("pixel"), um valor numérico proporcional ao fluxo de fóton é associado. Assim, uma imagem numérica é gerada, representando a cena original da foto de entrada. Esta imagem numérica é transformada em dígitos para ser armazenada em meios magnéticos (fita ou disco), ver Figura 2.16.

Na digitalização, a largura de um "pixel" normalmente varia de 12,5 micra até 100 micra, dependendo da pre-

cisão que se deseja e da escala da foto. A digitalização de uma foto pode ocorrer através de varredura ortogonal ou através de varredura não-ortogonal.

2.7.1. VARREDURA ORTOGONAL

A varredura ortogonal ocorre quando o tom de cinza da foto é extraído linha por linha — retilinearmente; ver Figura 2.16. A varredura ortogonal gera coordenadas máquinas (u,v) inteiras que não coincidem com as obtidas das transformações geométricas da malha regular do DTM, por isso é necessário interpolar o valor do tom de cinza para cada pixel da malha regular da ortofoto.



2.7.2. VARREDURA NÃO ORTOGONAL⁽²⁾

Os "pixels" de uma linha da malha regular da ortofoto possuem os correspondentes tons de cinza numa linha irregular da fotografia original, conforme mostra a figura 2.17. A varredura não-ortogonal propicia que o tom de cinza da foto seja extraído discretamente. A extração é feita diretamente sobre a foto original e arquivada em meios magnéticos (discos ou fitas). Esta extração pode ser feita com o auxílio de um "scanner" microdensitômetro que varre a foto original em linhas não retas (irregulares) — ver esquema da varredura na figura 2.18.

Salienta-se que existe equipamento ("scanner") que rasteriza a foto, sem ortogonalidade, e o mesmo equipamento reprojeta a imagem retilinearmente com ortogonalidade para produzir a ortofoto. Este equipamento foi concebido por Horton, [07], em 1978.

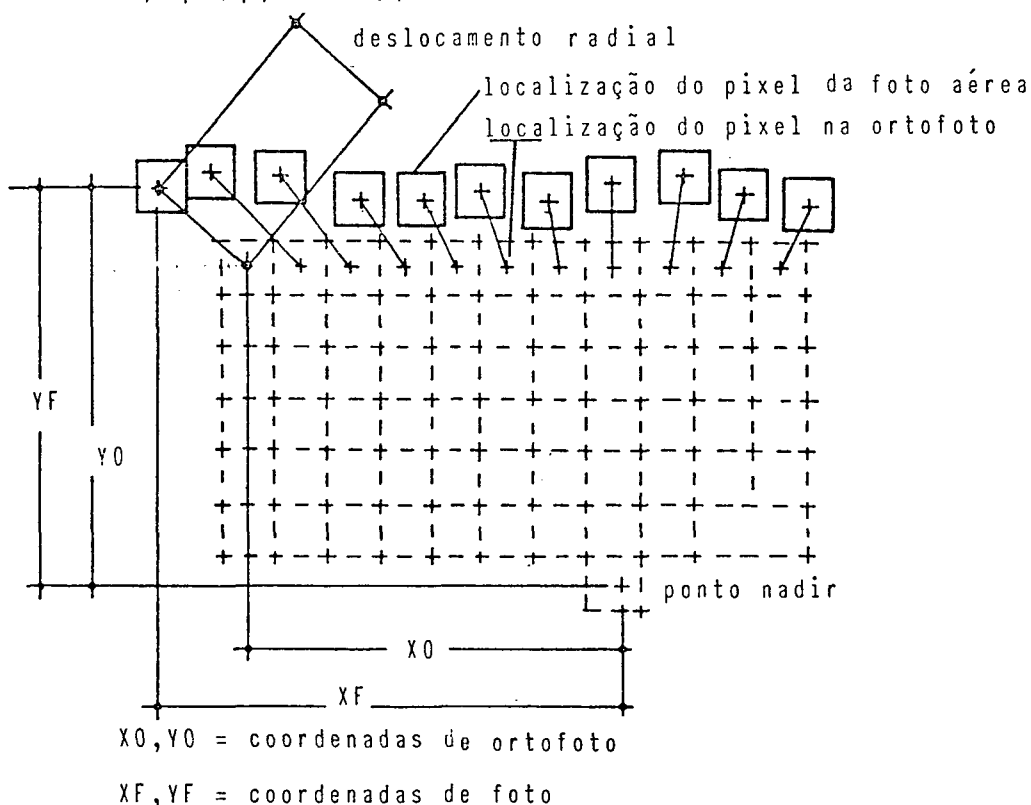


Figura 2.17 - Ilustra as posições dos "pixels" da ortofoto e suas posições correspondentes na foto.

(2) Foi usado o título "Varredura Não-Ortogonal" para descrever o processo.

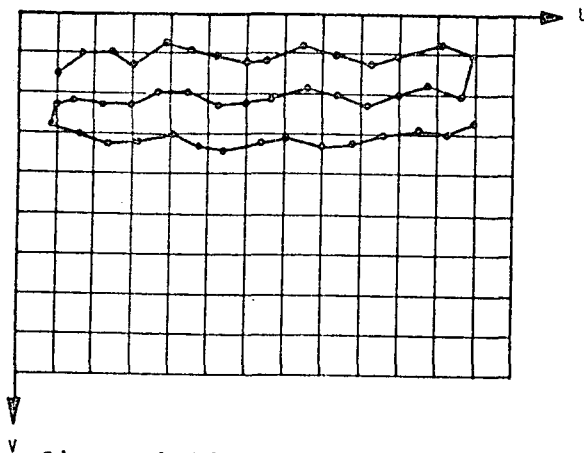


Figura 2.18 - Esquema de varredura não-ortogonal sobre a fotografia original.

2.8. RESOLUÇÃO ESPACIAL

A definição do tamanho do "pixel" para a rasterização da foto depende da relação entre a escala da ortofoto e a escala da foto original. Segundo Wiesel [22], esta relação deve ser de 2,5, como mostra o exemplo no quadro abaixo.

Tamanho do "Pixel" (micra)	
Foto	Ortofoto
50	125
25	63
20	50

A ampliação do tamanho do pixel se faz necessário, geralmente, porque o tamanho normal da foto é de 23cm por 23cm e o da ortofoto 50cm por 50cm.

Segundo Gaydos [5], resoluções extremamente altas podem ser obtidas quando a imagem original é rasterizada com 10 micra; neste caso não há descontinuidade da imagem e a precisão está limitada somente pela qualidade do DTM.

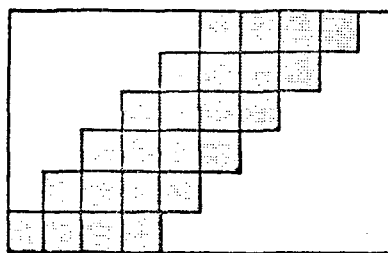
Wiesel, ver referência [22], menciona que nenhuma informação é perdida quando uma foto aérea é rasterizada com tamanho de "pixel" de 50 micra, e que uma ortofoto com "pixel" de 167 micra ainda apresenta qualidade visual aceitável.

Para Keating [10], uma ortofoto apresenta qualidade visual boa quando é produzida com tamanho de pixel de 100 micra.

A varredura ortogonal de uma feição reta inclinada, causa o efeito de degrau e será tanto mais acentuado quanto maior for o tamanho do pixel e a inclinação da feição, ver Figura 2.19.



(a)



(b)

Figura 2.19 - Efeito de degrau observado numa feição inclinada: (a) ilustra a feição na foto original, e, (b) ilustra a mesma feição na foto que foi digitalizada.

2.9. PRECISÃO GEOMÉTRICA

Mayr [16], realizou um controle medindo alguns pontos (E,N) idênticos na ortofoto (1:10.000) e no estereo-modelo (E,N,H). A medida sobre a ortofoto foi realizada com o auxílio de um monocomparador. A comparação das coordenadas de ortofoto com as coordenadas do estereo-modelo resultou numa diferença, na ortofoto, de 91 micra e 40 micra, em (E) e (N) respectivamente.

Gaydos [5], realizou um experimento, com a ortofoto na escala 1:24000, para avaliar a precisão geométrica, conforme ilustra a Figura 2.20 e 2.21. Aplicou a transformação afim, sobre os pontos de controle, que possibilitou passar as coordenadas máquina (do "scanner") para coordenadas terrestres (locais). Seus resultados, apresentados abaixo, mostram os resíduos obtidos após a transformação.

<u>Ponto</u>	<u>VE(m)</u>	<u>VN(m)</u>
51361	4,84	-0,06
51360	-4,32	-0,77
51691	-2,93	-0,97
51350	0,73	2,00
51351	-2,83	-3,49
51341	2,10	0,59
51681	2,42	2,69

Convém salientar que, para esta verificação, o tamanho do "pixel" também influencia na qualidade dos resultados. Neste experimento, de Gaydos, o teste foi realizado sobre uma ortofoto com "pixel" de 100 micra.

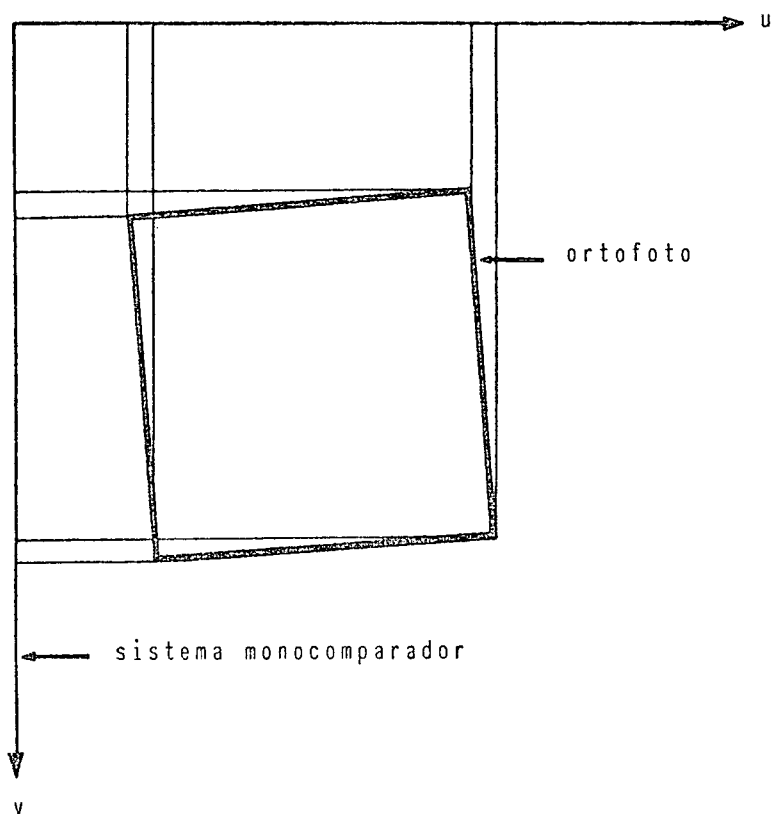


Figura 2.20 - Medição dos quatro cantos da ortofoto, para obtenção dos coeficientes da transformação afim.

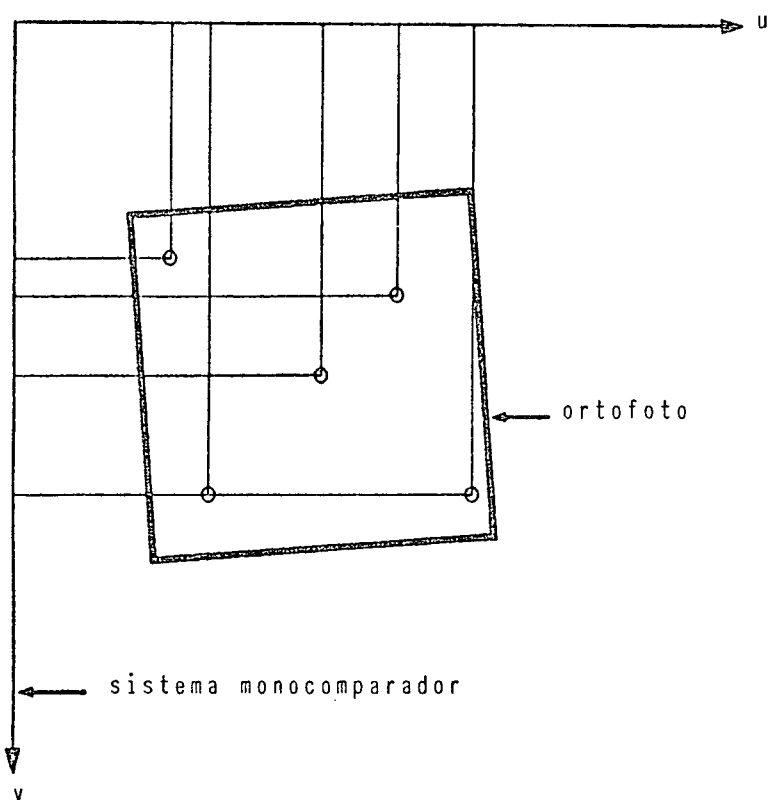


Figura 2.21 - Medição dos pontos de controle no sistema de máquina (u,v)

A produção de ortofoto digital possibilita que as curvas de nível, o reticulado, os textos e outras informações possam ser introduzidas antes da reprojeção da ortofoto. Esta introdução se faz modificando os níveis de tom de cinza dos "pixels" selecionados. Curvas de nível representadas por uma linha branca — por exemplo — podem ser geradas alterando-se para zero os níveis de tom de cinza dos "pixels" selecionados. Cada "pixel" tem um único endereço (coordenadas máquina) e um único valor (tom de cinza). Estes números (endereço e valor) podem ser alterados individualmente ou coletivamente. Assim, uma troca de endereço representa uma transformação geométrica e uma troca do valor de tom de cinza representa uma alteração radiométrica; ver Figura 2.22. Segundo Houssay [09], a linha de produção de ortofoto digital permite ainda montar automaticamente um mosaico suavizando, quando necessário, as diferenças radiométricas que possam haver nas zonas comuns em duas fotos.

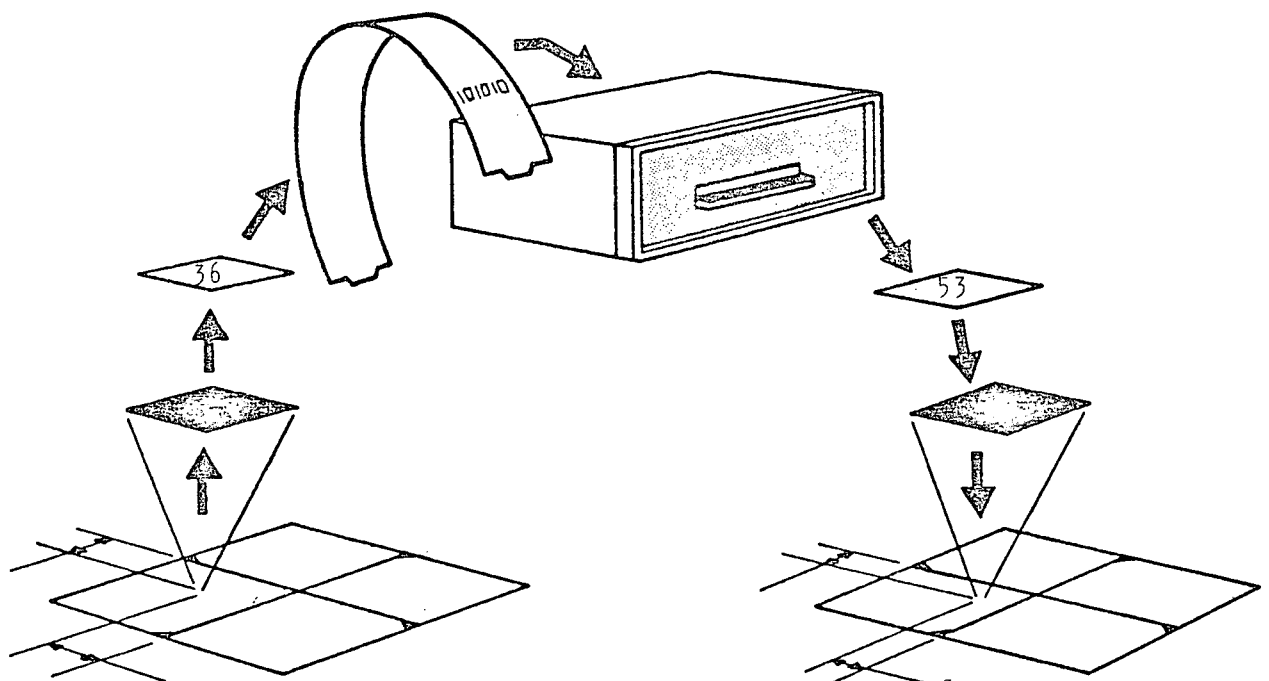


Figura 2.22 - Ilustra a programação das transformações: radiométrica e geométrica.

3. EQUIPAMENTOS

Os principais equipamentos necessários à produção de ortofoto digital são: a) equipamento de rasterização e reprojeção; b) computador com grande capacidade de memória; c) unidade de fita magnética; d) unidade de vídeo de alta resolução.

a) Os equipamentos de rasterização e reprojeção atuais trabalham com "pixels" variando de 12,5 micra até 400 micra. EHLERS (1983) concebeu o "scanner" Optronics P 1700 que possibilita varrer "pixel" abaixo de 20 micra. Segundo Keating [10], o "scanner" microdensitômetro é um instrumento semelhante a um comparador de precisão com codificadores e servomotores para dirigir o sistema ótico à qualquer lugar da imagem. Com este equipamento o nível de tom de cinza da imagem analógica pode ser extraído e armazenado na forma digital, e reciprocamente os valores digitais podem ser convertidos numa variação de intensidade de luz para formar a imagem analógica. A sequência da transformação da imagem digital em imagem analógica inicia a partir dos dados digitais armazenados em meios magnéticos. Estes dados representam uma imagem numérica — valores de tons de cinza — e modulam intensidades de luz. A luz, direcionada contra um filme (emulsão fotográfica), forma a imagem analógica — ver figura 3.1.

Em geral todo "scanner" microdensitômetro, produzido hoje, é capaz de amostrar e reproduzir a imagem. A Perkin Elmer Corporation — por exemplo — fabrica o "scanner" microdensitômetro PDS (Sistema de Aquisição de Dados), o qual pode amostrar, arquivar e reprojeter a imagem. Seu mecanismo possibilita varrer 25cm em cada direção (horizontal e vertical) numa velocidade de 400mm por segundo com uma relativa precisão de 0,005mm. A amostragem pode acontecer até 25000 vezes por segundo usando um fotômetro. Este fotômetro pode ser regulado numa escala de 0 a 4, que indica o tempo de exposição à luz, obtendo-se uma imagem mais escura ou mais clara. O "scanner" microdensitômetro varre a imagem em linha reta ou não, e é dotado de um tubo dissector de imagem que converte a imagem analógica em imagem digital — ver Figura 3.2.

b) Os computadores que oferecem os sistemas de memória mais adequados para a produção de ortofoto digital são: DEC VAX, PRIME SÉRIE 50, DATA GENERAL SÉRIE MV, IBM/370, SIEMENS 7800/7500 e outros semelhantes.

c) É necessário uma unidade de fita que comporta a fita magnética e intercambia seus dados. As fitas de alta densidade digital oferecem grande capacidade de armazenamento e alta velocidade de transmissão. Por exemplo, uma fita magnética de 6250 BPI comporta aproximadamente 130 MB, e é totalmente preenchida para armazenar uma foto 23cm por 23cm varrida com pixel de 20 micra. Nesta mesma fita seis fotos do mesmo tamanho poderiam ser memorizadas se fossem varridas com "pixel" de 50 micra. A foto (23cmx23cm) digitalizada tem a seguinte necessidade de memória — em função do tamanho do "pixel" adotado:

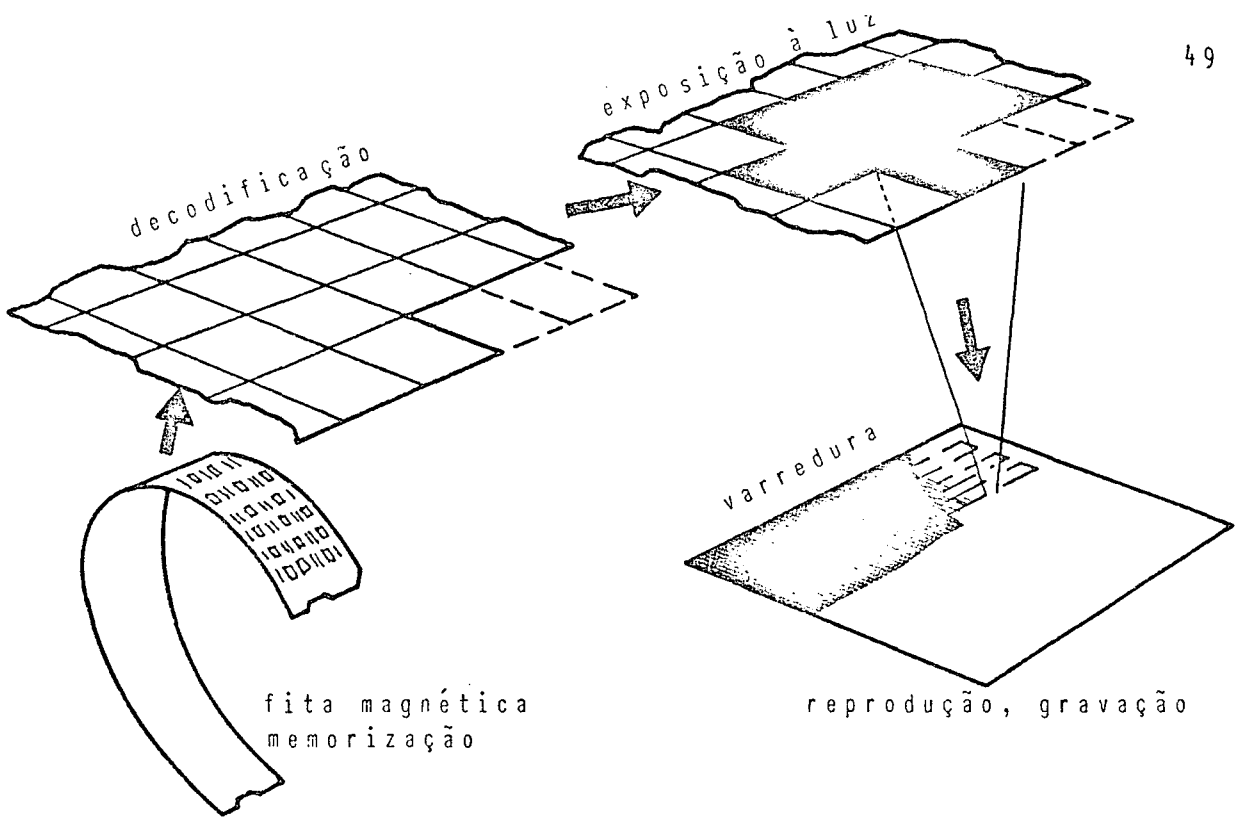


Figura 3.1 - Ilustra a conversão de uma "imagem digital" em "imagem analógica".

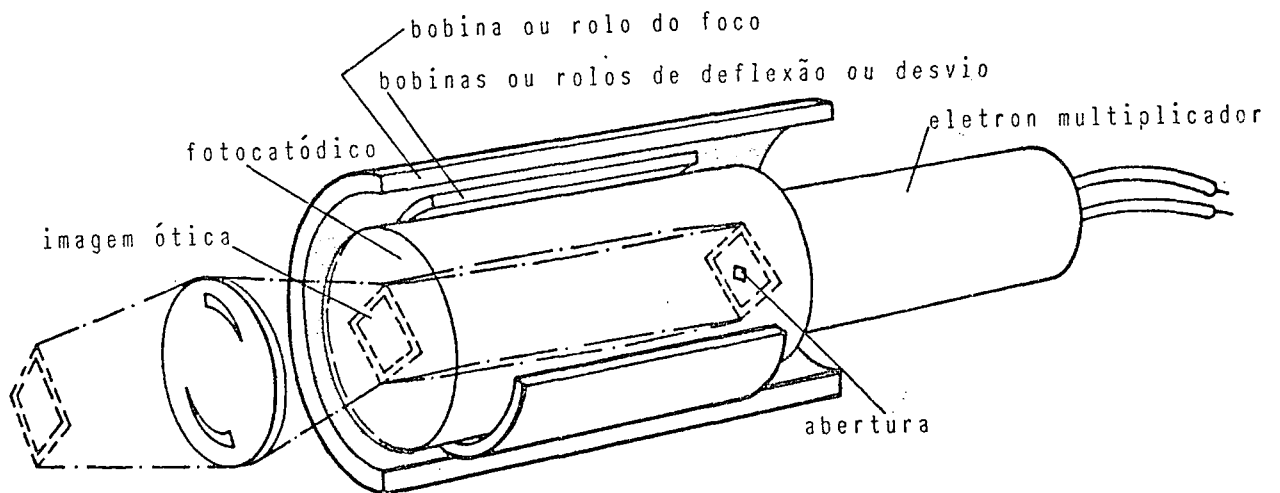


Figura 3.2 - Tubo Dissector de Imagem — peça fundamental do "scanner" microdensitômetro. Converte a imagem analógica em imagem digital.

<u>Tamanho do "pixel"</u> (micra)	<u>Memória</u> (MB)
12,5 x 12,5	323
20 x 20	126
25 x 25	81
50 x 50	20
80 x 80	8
100 x 100	5

d) A unidade de vídeo deve apresentar alta resolução, por exemplo, resolução de 512 por 512 "pixels" e três planos de memória (imagem).

Segundo Houssay [09], na França utiliza-se para a produção de ortofoto digital os seguintes equipamentos:

a) um digitalizador - impressor HELLCHROMAGRAPH 299 - modificado para intercambiar dados com a unidade de cálculo - que varre no máximo 50cmx60cm, à uma velocidade máxima de 900 linhas por minuto, com tamanho do "pixel" mínimo de 10 micra; b) a unidade de cálculo compreende um microprocessador AT 80286 com memória principal de 512K, uma unidade de vídeo com resolução de 512x512 "pixels", e um disco fixo de 500 MB.

4. DESCRIÇÃO DO TESTE REALIZADO

Foi possível produzir uma ortofoto digital de 512 por 512 "pixels", com os dados cedidos pelo Dr. Göpfert — ver referência |06| — Presidente da Comissão III do ISPRS-1984 (Simpósio Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto). Os dados consistem de informações sobre: a) a foto analógica; b) a foto digitalizada; c) o DIM; d) os pontos de controle; e) as coordenadas das marcas fiduciais.

4.1. DESCRIÇÃO DOS DADOS

a) Foto Analógica: A foto foi tirada com uma câmara Zeiss RMK-A 15/23, com distância focal de 153mm, na escala aproximada de 1:18400, em 08 de julho de 1981, na região de Haslach — Alemanha Ocidental ($48^{\circ}16'N; 08^{\circ}06'E$).

b) Foto Digitalizada: Para digitalizar a foto aérea original, usou-se varredura ortogonal retilínea, e a imagem digital foi arquivada em forma de matriz. A dimensão da imagem digitalizada é de 1150 linhas (records) por 1150 colunas (bytes) conforme o esquema de varredura do "scanner" na Figura 4.1. O valor do tom de cinza de cada "pixel" foi registrado através de oito bits. Com respeito aos níveis de tom de cinza, o valor zero corresponde ao preto e os valores maiores correspondem a tons mais claros. O arquivo da imagem digital está gravado em código binário numa fita magnética da seguinte forma:

<u>Arquivo</u>	<u>Registro</u>	<u>Conteúdo de um Registro</u>
1	1 a 1150	"bytes" 1-2 : número do arquivo 3-4 : nº da linha (1 a 1150) 5-6 : nº da foto 7-1156: "vídeo-bytes"

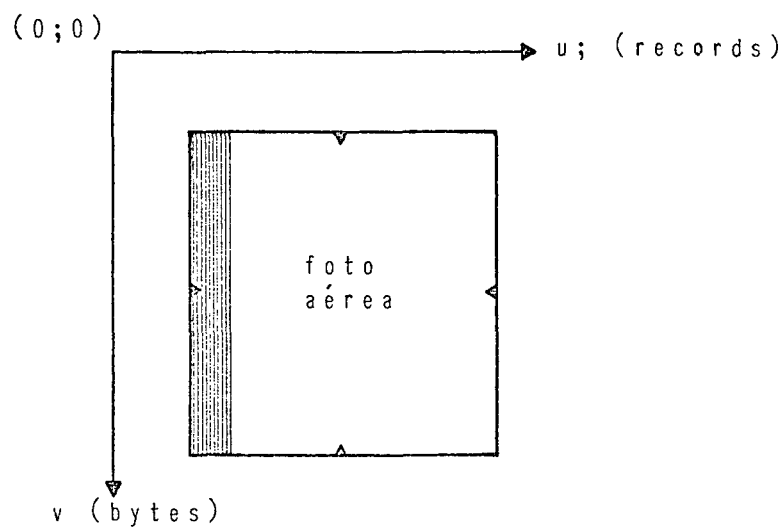


Figura 4.1 - Esquema de varredura ortogonal retilínea do "scanner".

c) Modelo Digital do Terreno (DTM)

O DTM, na forma de uma malha regular quadrada de 20 metros, foi gerado a partir da digitalização das curvas de nível de um mapa de linha, na escala 1:25000 - ver Figura 4.2. A precisão das altitudes (coordenadas Z) interpoladas é de aproximadamente dois metros. O arquivo foi gravado em código binário na mesma fita magnética, da seguinte forma:

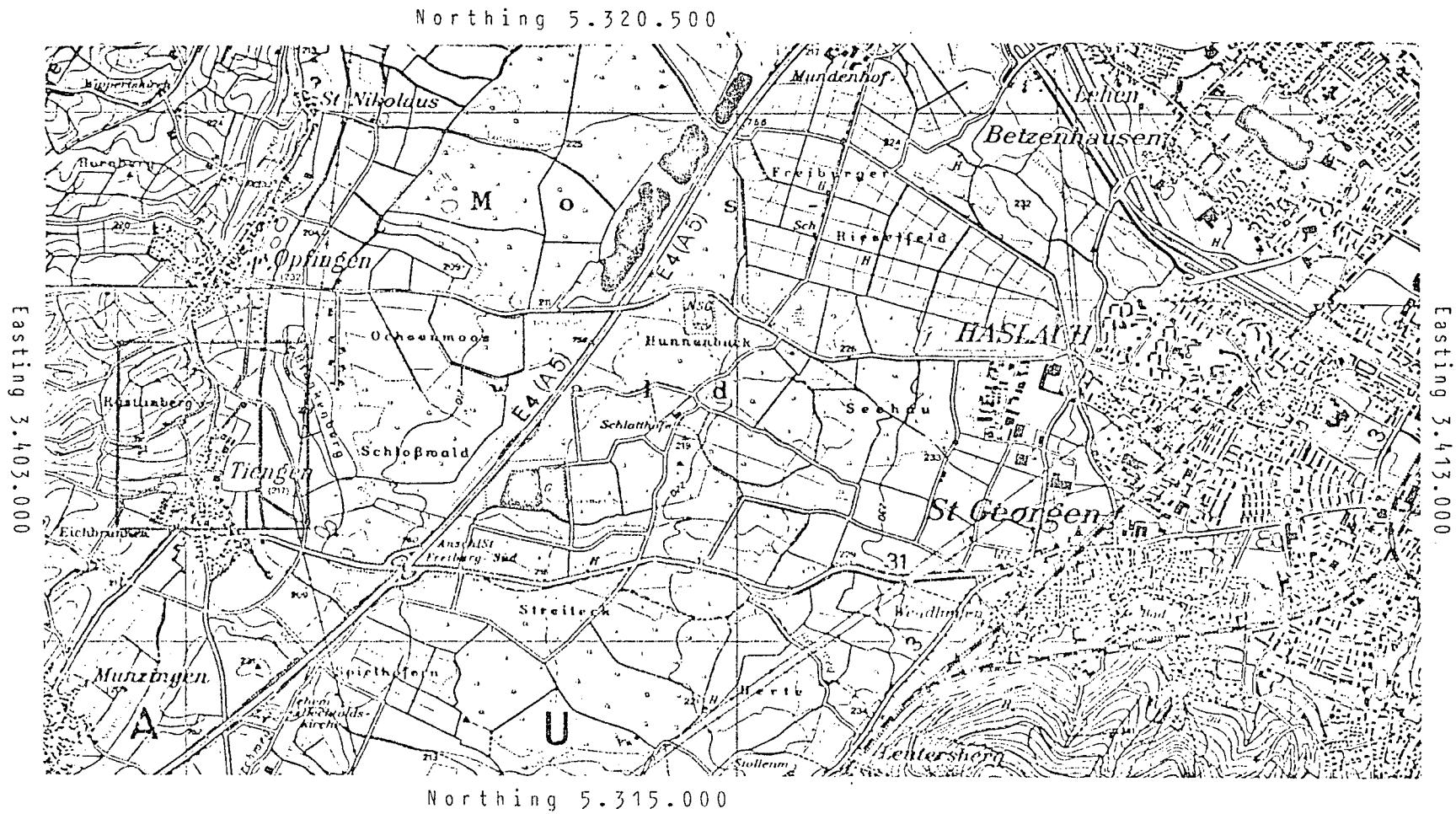


Figura 4.2 - Mapa de linha (na escala 1:50.000) da região fotografada.

<u>Arquivo</u>	<u>Registro</u>	<u>Conteúdo</u>
10	1	bytes 1-2 : 10 (nº do arquivo)
	.	3-4 : nº da linha(1-276)
	.	
	.	
	276	5-6 : 999 (código para os dados do DIM)
		7-507 : DIM, dados binários, 8 bits/ponto
		508 : ignore

A interpolação dos dados DIM gravados na fita magnética se dá como segue:

As coordenadas terrestres, no sentido Norte-Sul, decrescem com o número da linha (registro) i , ou seja:

$$\text{Linha nº 1} \quad N = 5.320.500\text{m}$$

$$\text{Linha nº } i \quad N = 5.320.500 - 20 (i-1)\text{m}$$

$$\text{Linha nº 276} \quad N = 5.315.000\text{m}$$

As coordenadas terrestres, no sentido Leste-Oeste, aumenta com o byte j , ou seja:

$$\text{byte nº 7} \quad E = 3.403.000 \text{ metros}$$

$$\text{byte nº } j \quad E = 3.403.000 \text{ metros} + 20 (j-7) \text{ metros}$$

$$\text{byte nº 507} \quad E = 3.413.000 \text{ metros}$$

A altitude (coordenada Z) no ponto E, N é obtida somando-se 190 metros ao valor do byte j , linha i . Isto foi feito por conveniência computacional, pois até 255 metros

de altitude era possível representar com 8 bits, ou seja, foi feita uma translação do referencial de altura de tal forma a minimizar os dígitos usados para o armazenamento. Desta forma $Z = \text{zero}$ deve valer na realidade 190 metros, assim como $Z = 255$ deve valer 445 metros.

d) Os Pontos de Controle

Os pontos de controle contidos na imagem da foto aérea nº 57 são cinco. Conhece-se destes pontos as coordenadas no sistema de foto e no sistema de terreno. Foram gravados na fita magnética em dois arquivos diferentes, arquivo 11 e 20, sendo o primeiro com as coordenadas no sistema de foto. A gravação foi realizada no formato ASCII e se apresenta assim:

<u>Arquivo</u>	<u>Registro</u>	<u>Conteúdo</u>
11	1-5	bytes 1-80 : I 10, 2F10.2, 50x ponto nº, x,y (mm) da foto aérea nº 57
20	1-37	bytes 1-80 : I 10, 3F10.0, 40x ponto nº, E(m), N(m), Altitude (metros acima do nível do mar)

Os pontos de controle extraídos para a foto nº 57 são:

$x(1) = -73,68$; $y(1) = 102,45$; $x(1) = 3404038$; $y(1) = 5318277$; $Z(1) = 209$
 $x(2) = -25,00$; $y(2) = 23,89$; $x(2) = 3404877$; $y(2) = 5316879$; $Z(2) = 208$
 $x(3) = -65,28$; $y(3) = -13,02$; $x(3) = 3404139$; $y(3) = 5316233$; $Z(3) = 217$
 $x(4) = 33,49$; $y(4) = 94,87$; $x(4) = 3405937$; $y(4) = 5318119$; $Z(4) = 207$
 $x(5) = 111,28$; $y(5) = 63,63$; $x(5) = 3407321$; $y(5) = 5317542$; $Z(5) = 219$

e) As Coordenadas das Marcas Fiduciais

As coordenadas das marcas fiduciais — ver Figura 4.3 — no sistema fotográfico são:

<u>Marca</u>	<u>x (mm)</u>	<u>y (mm)</u>
10	0,00	-113,06
20	-113,05	0,00
30	0,00	113,06
40	113,05	0,00

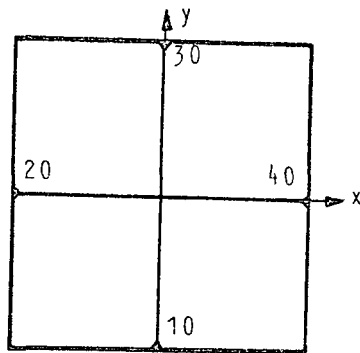


Figura 4.3 - Posição das marcas fiduciais no sistema fotográfico

As coordenadas das marcas fiduciais — ver Figura 4.4 — no sistema de máquina ("scanner") são:

<u>Marca</u>	<u>u</u>	<u>v</u>
10	573,2	1141,6
20	6,3	578,6
30	571,2	13,3
40	1137,6	575,6

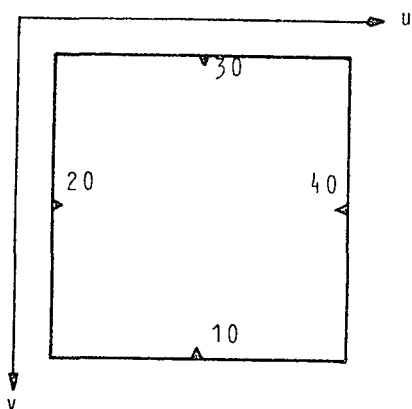


Figura 4.4 - Posição das marcas fiduciais no sistema de máquinas ("scanner")

4.2. METODOLOGIA APLICADA

Optou-se pelo método indireto e pela aplicação das transformações geométricas nos pontos âncora — como já exposto no item 2.4.2.

A interpolação bilinear foi aplicada duas vezes, a primeira — comentado no item 2.5.3 — para densificar as coordenadas de máquina ("scanner"), ver Figura 2.9; e a segunda para se obter o tom de cinza — comentado no item 2.5.4 — ver Figura 2.14.

4.2.1. PARÂMETROS APROXIMADOS DA ORIENTAÇÃO EXTERIOR

$$(W_0, \phi_0, K_0, X_0^C, Y_0^C, Z_0^C)$$

Os ângulos W_0 e ϕ_0 foram aproximados iguais a zero por serem as fotos aproximadamente verticais, e o ângulo K_0 foi aproximado igual a zero devido ao sentido do vôo (leste - oeste) — ver Figura 4.2 e 4.5.

Os parâmetros X_0^C e Y_0^C foram aproximados a partir da observação do mapa de linha (1:50000) existente da região — ver Figura 4.2 — e do conjunto de fotos analógicas (1:75000) mostrado na Figura 4.5. Localizou-se o centro da foto 57 no mapa de linha e daí tirou-se graficamente X_0^C e Y_0^C .

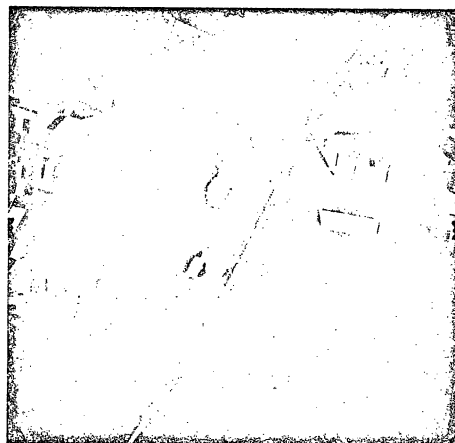
A altitude da câmara foi calculada tendo-se a escala da foto (1:18400) e a distância focal ($f=153\text{mm}$).

Desta forma os parâmetros aproximados foram:

W_0, ϕ_0, K_0 iguais a zero; Z_0^C igual a 2815,2 metros; X_0^C igual a 3.405.400 metros e Y_0^C igual a 5.316.500 metros.



#154



#153



#151



#150



#057



#059



#061

Figura 4.5 - Conjunto de fotos na escala 1:75000 que abrange a área do DIM.

4.2.2. DEFINIÇÃO DA MALHA DA ORTOFOTO

A malha regular fina da ortofoto foi definida em 2,5m por 2,5m, atendendo a uma solicitação contida na correspondência do Dr. Göpfert; ver referência |06|.

4.2.3. COORDENADAS DO PRIMEIRO PONTO DO DTM

Foi usado apenas uma parte do DTM disponível, que corresponde à uma parte da foto. Com isso produziu-se uma ortofoto digital de 512x512 "pixels" — ver Figura 4.6.

O DTM deve ser compatível com a imagem digitalizada, ou seja, deve estar contido na imagem varrida pelo scanner. Conhecendo-se as coordenadas planimétricas terrestres (X,Y) do primeiro ponto do DTM, aqui denominadas de C_1 e C_2 , pode-se gerar as posições dos demais pontos, uma vez que o incremento em X e em Y são constantes, neste teste, de 2,5 em 2,5 metros.

Assim, procurou-se observar no mapa 1:50000 um ponto inicial do DTM que estivesse com certeza incluído na imagem da foto 57. Chegou-se aos valores: $C_1 = 3.403.560m$ e $C_2 = 5.318.240m$.

Esta operação poderia ser feita analiticamente, mas ainda por tentativas, transformando algumas coordenadas terrestres do DTM em coordenadas de foto, através das equações de colinearidade. E, poderia ainda ser feita transformando as coordenadas de foto (x,y), das marcas fiduciais em coordenadas de terreno (X,Y), através das equações de colinearidade inversa e da obtenção de Z por iteração.

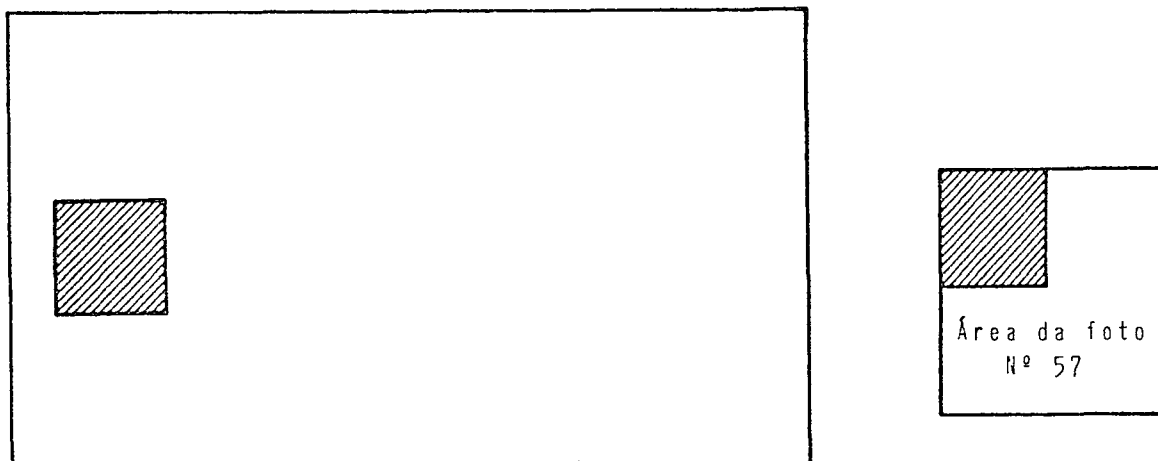


Figura 4.6 - As áreas hachuradas representam as partes, do DTM e da foto 57, utilizadas no teste.

4.3. ESTRUTURA DO PROGRAMA

Este tópico tem a finalidade de auxiliar o leitor na interpretação e manutenção do programa. O programa é estruturado em unidades e módulos. Foi desenvolvido na linguagem Pascal e compilado com o Turbo-Pascal 5.0 da Borland. A opção pela Linguagem Pascal visou maior legibilidade, confiabilidade, facilidade na locação e gerenciamento de memória dinâmica. O compilador usado é um compilador popular porém, não totalmente portátil pois, apresenta alguma extensão em relação ao Pascal padrão.

Evitou-se o uso de variáveis globais pelas seguintes razões: a) teste realizado mostrou que o ganho de tempo é pequeno (5 segundos); b) por desejar-se maior clareza e segurança na programação; c) maior facilidade do transporte de subrotinas para outros programas. Maiores justificativas quanto a isto pode-se encontrar em Farrer [04] e Collins [02].

O programa basicamente consta de quatro unidades fundamentais. Cada unidade é composta por módulos (subrotinas) que são locais, ou particulares, daquela unidade. No diagrama de blocos — ver Figura 4.7 — é mostrado a interdependência das unidades e módulos. A seguir descreve-se cada uma das quatro unidades.

UNIDADE I - A Unidade I realiza o ajustamento paramétrico para obter-se os parâmetros da orientação exterior ($W, \phi, K, X^C, Y^C, Z^C$), e devolve para o programa principal os parâmetros ajustados. Ela é composta de dois módulos: DADOS RESSEÇÃO E RESSEÇÃO.

No módulo "DADOS RESSEÇÃO", a entrada dos dados é feita via teclado e específica para a foto 57; mas estes dados são facilmente substituídos, pois a estrutura do programa é modular. Os dados necessários são: a) coordenadas dos pontos de controle; b) parâmetros aproximados ($W_0, \phi_0, K_0, X_0^C, Y_0^C, Z_0^C$); c) distância focal "f".

O módulo "RESSEÇÃO" é subdividido nos seguintes submódulos: Rotação, Matriz A, Vetor L, Normais NU, Inversa, Vetor X e Converte. Um pequeno comentário sobre cada um deles pode ser visto na listagem do programa.

UNIDADE II - A Unidade II realiza o ajustamento paramétrico para obter-se coeficientes das equações da transformação afim, e devolve para o programa principal os coeficientes ajustados. Ela é composta pelos módulos: DADOS AFIM e CALCOEFICIENTES.

Os dados para o módulo "DADOS AFIM" também são inicializados via teclado, atribuindo-se os seguintes valores: coordenadas das marcas fiduciais — no sistema fotográfico e no sistema de máquina "scanner". Mas, também,

podem ser facilmente substituídos sem interferência no processo do cálculo dos coeficientes.

O módulo "CALCOEFICIENTES" calcula os coeficientes propriamente dito.

UNIDADE III = A Unidade III é composta de uma única subrotina CARGAFOTOMEMO, que transfere integralmente os valores digitais dos tons de cinza (512x512), do arquivo "foto 57" para a memória principal do computador. Este procedimento favorece a produção de ortofoto digital em microcomputador. O objetivo principal desta unidade é evitar o número de acessos ao disco, durante a busca do tom de cinza. O tamanho 512x512 foi escolhido em razão da resolução da tela do equipamento de vídeo disponível para o teste.

UNIDADE IV - A Unidade IV retifica a imagem, gerando um arquivo com o tom de cinza da ortofoto, ou um arquivo apenas com as coordenadas de máquina "scanner" (u,v) para o caso da extração do tom de cinza via varredura não-ortogonal. Esta unidade é composta de três módulos: COEFBILINEAR, MONITOR E NÃOORTOG.

O módulo "COEFBILINEAR" calcula os coeficientes do polinômio bilinear relacionando as coordenadas da malha regular do DTM (X,Y,Z) com as coordenadas de máquina "scanner" (u,v). Primeiramente transforma pontos âncora do DTM para o sistema fotográfico usando as equações de colinearidade, e do sistema fotográfico para o sistema de máquina usando as equações da transformação afim. Do conhecimento das

coordenadas dos pontos âncora no sistema de terreno (local — por exemplo) e no sistema de máquina, é estabelecido uma relação bilinear que possibilita interpolar as coordenadas de máquina (u,v).

O módulo "MONITOR" controla a geração da ortofoto a partir das cotas do DTM correspondentes a uma malha regular de 20m. Apenas uma parte do DTM é utilizada — 65 registros de 65 bytes. A partir dos registros 1 e 2 são geradas 64 células. As coordenadas (X,Y,Z) dos quatro cantos de cada célula sofrem as transformações geométricas já mencionadas. Interpola-se coordenadas máquina (u,v) no interior de cada célula repartindo cada célula em 64 partes (8 "pixels" por 8 "pixels"). Repete-se as operações para os registros 2 e 3, e assim sucessivamente. O módulo "MONITOR" também efetua a interpolação bilinear do tom de cinza usando a fórmula abaixo, onde t representa a matriz de tons de cinza da foto rasterizada, e, du , dv representam distâncias de $t(u,v)$ ao ponto que se deseja interpolar — como já ilustrado anteriormente na Figura 2.14.

$$t(u+du, v+dv) = t(u,v) + du(t(u+1,v) - t(u,v)) + \\ dv(t(u,v+1) - t(u,v)) + du.dv(t(u,v) - t(u+1,v) - \\ t(u,v+1) + t(u+1,v+1))$$

O módulo "NÃOORTOG" representa uma cópia levemente modificada do módulo "MONITOR". Não necessita do arquivo com os tons de cinza da foto rasterizada, nem gera um arquivo de tom de cinza, mas apenas cria um arquivo com as

DIAGRAMA DA ESTRUTURA DO PROGRAMA

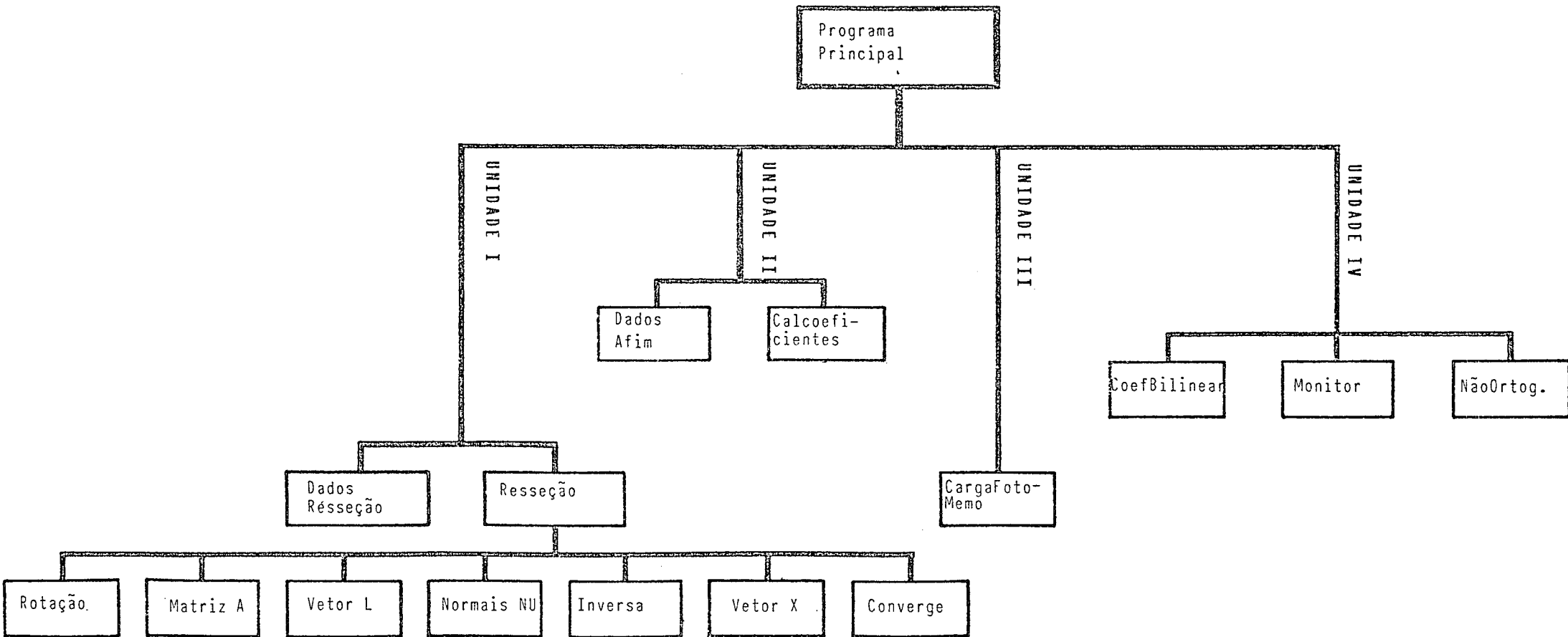


Figura 4.7 - Diagrama de Blocos da Estrutura do Programa.

coordenadas máquina (u,v) para o caso da extração do tom de cinza via varredura não-ortogonal.

4.4. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

A rasterização da foto aérea (1:18.400) foi realizada, na Alemanha, com o equipamento OPTRONICS PHOTOMATION P 1760, coletando "pixels" de 200 micra (3,7 metros no terreno), através de varredura ortogonal.

Uma unidade de fita, modelo ALLOY, foi usada para transportar os dados da fita magnética para o disco de 5 1/4 polegadas (360K).

O processamento foi realizado em três modelos diferentes de microcomputador — simplesmente para comparação de eficiência — a saber: a) PC-XT/Cobra, de 16 bits, compatível IBM; com processador 8086, sem disco rígido; b) PC-AT/Nova Data, compatível IBM, de 16 bits, com processador 80286, coprocessador 80287, disco rígido de 20 MB, e frequência de 8 MHertz; c) IBM-386/IBM, de 32 bits, processador 80386, coprocessador 80287 e disco rígido de 40 MB.

Para saída no vídeo foi usado um monitor MULTISYNC, e uma placa gráfica Revolution 512x512 - modelo 231032 da Number Nine Computer Corporation com 3 planos de imagem, um plano gráfico e aproximadamente 16 milhões de cores.

Para gerar uma cópia da ortofoto em papel fotográfico, usou-se o equipamento de saída, EBR modelo EAX-01801/01889 — ver Figura 4.8 e 4.9 — existente no INPE — (Insti-

tuto Nacional de Pesquisas Espaciais) - Cachoeira Paulista/SP. Segue algumas características deste equipamento.

De acordo com o Manual do EBR - modelo EAX, 01801/01889, ver referência [14], trata-se de um equipamento que converte imagem digital em analógica. A imagem analógica é formada expondo um filme sensível à um raio de luz com precisão controlada. O "EBR" é análogo à um reprojeter com tubo de raio catódico (CRT) onde as lentes e o "phosphor faceplate" foram removidos, e a reprojecção localizada no vácuo. Consiste de: canhão de elétrons; sistema eletromagnético para focalização, deflexão e controle da irradiação de elétrons; mecanismo de suporte do filme; sistema automático para manter a reprojecção no vácuo; circuitos eletrônicos e monitores. As funções de controle de operação são mínimas e acessíveis ao operador. A construção modular fornece fácil manutenção e reparação. Vários tipos de filmes podem ser usados como - por exemplo - filme à base de prata e os filmes registradores direto (que forma a imagem diretamente quando exposto aos elétrons). O filme sensível selecionado para o teste foi o filme registrador direto de elétron - Kodak, tipo S0-129.

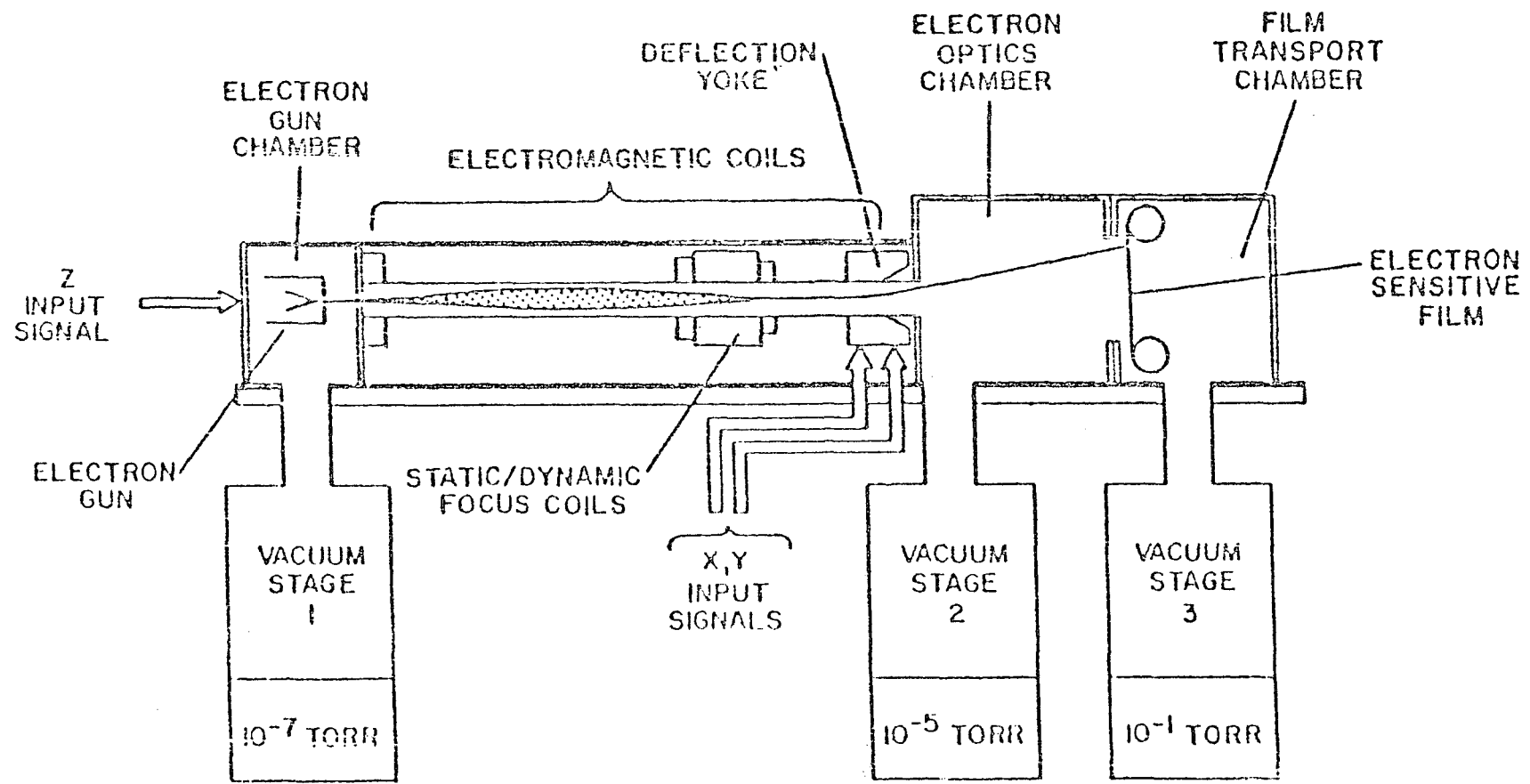


Figura 4.8 - Esquema do equipamento EBR (Electron Beam Recorder) - Modelo EAX, 01801/01889

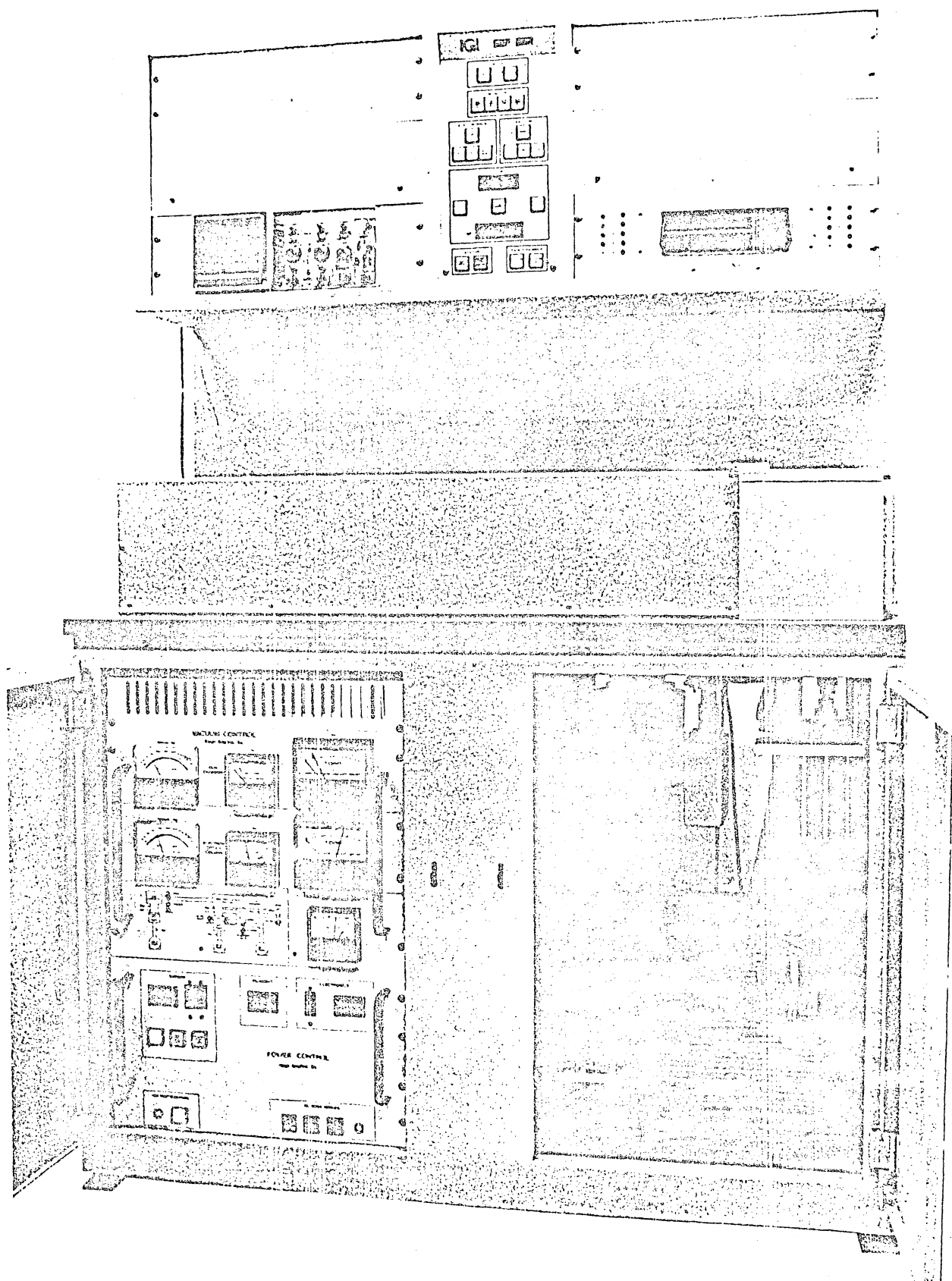


Figura 4.9 - Vista Frontal do EBR

4.5. RESULTADOS

A partir do teste realizado, foram observados os seguintes resultados:

a) Boa qualidade das imagens da foto e ortofoto digitais — observação feita pela comparação visual na tela.

b) Da observação pela comparação visual gráfica, por sobreposição numa mesa de luz, notou-se a coincidência das feições que aparecem no diapositivo da ortofoto e no mapa de Linha (ambos na escala 1:50000). Obviamente não ocorreu o mesmo quando comparados o diapositivo da foto e o mapa de linha (também ambos na escala 1:50000).

c) Cópia da ortofoto digital em papel fotográfico, na escala 1:27234, usando o interpolador "VIZINHO MAIS PRÓXIMO" para a busca do tom de cinza — ver Figura 4.10.

d) Cópia da ortofoto digital em papel fotográfico na escala 1:23925, usando o interpolador "BILINEAR" para a busca do tom de cinza — ver Figura 4.11.

e) Cópia da foto digital em papel fotográfico, na escala 1:39872 — ver Figura 4.12.

f) O registro dos tempos de processamento em três tipos diferentes de microcomputadores, como se observa abaixo:

	Tempo medido para gerar	
	<u>u</u> e <u>v</u>	tom de cinza
PC-XT	15min 00seg	25min 00seg
PC-AT	02min 12seg	05min 02seg
IBM/386	02min 05seg	04min 55seg

g) O registro de 5 segundos para o tempo de saída — reprojeção da imagem sobre o filme sensível, utilizando o equipamento EBR, modelo EAX 01801/01889.

h) Deslocamento (Δx e Δy) das coordenadas de foto, calculados em função de erros altimétricos (ΔZ) inseridos a propósito nas cotas dos pontos de controle — conforme se observa abaixo:

Ponto de controle nº 02			Ponto de controle nº 05		
ΔZ (m)	Δx (μm)	Δy (μm)	ΔZ (m)	Δx (μm)	Δy (μm)
0	0	0	0	0	0
2	20	10	2	80	40
4	40	20	4	160	20
6	50	40	6	250	30
8	70	60	8	330	70
10	90	70	10	410	120

Figura 4.10 - Cópia, da ortofoto digital, na escala 1:27234. Tom de cinza interpolado através do "vizinho mais próximo". Tamanho do pixel, aproximadamente 92 micra.



Figura 4.11 - Cópia, da ortofoto digital, na escala 1:23925. Tom de cinza interpolado através da "bilinear". Tamanho do pixel, aproximadamente 104 micra.



Figura 4.12 - Cópia, da foto digitalizada, na escala 1:39872. Tamanho do pixel, aproximadamente 92 micra.



5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Após a análise dos resultados obtidos com o teste realizado, concluiu-se que:

a) A ortofoto digital obtida apresenta qualidade visual tão boa quanto a da foto digital, se usado o método de interpolação "bilinear" para a busca do tom de cinza.

b) Na interpolação do tom de cinza, aplicando o método "vizinho mais próximo", resultou uma qualidade bem inferior comparada com o método de interpolação "bilinear".

c) O tempo de processamento poderá ser melhorado com o uso de computadores mais velozes ou adaptados para se obter maior velocidade.

d) As coordenadas de foto, obtidas pela aplicação das equações de colinearidade, podem estar deslocadas de até 100 micra quando a altitude (Z) do NIM é imprecisa de dois metros.

e) O tempo de processamento para produzir uma ortofoto digital do tamanho 5000 "pixels" por 5000 "pixels" ("pixel" com 100 micra) no microcomputador PC-AT seria de aproximadamente 8 horas; ou 3 horas para gerar apenas as coordenadas de máquina "scanner" (u, v) — caso opte-se pela extração dos tons de cinza via varredura não-ortogonal. Porém, usando-se computador — por exemplo — 50 vezes mais veloz obter-se-ia os tempos 10 minutos e 4 minutos respectivamente.

f) Segundo nosso conhecimento, como trata-se do primeiro trabalho no Brasil, nesta área, e ainda em pleno desenvolvimento nos países de maior tecnologia, recomenda-se a continuação dos estudos e testes no sentido de se obter um "software" mais generalizado e uma pesquisa quanto aos equipamentos — hoje disponíveis — de rasterização e reprojeção.

No momento de fechamento desta dissertação (set/89) está-se iniciando um novo teste onde se pretende rasterizar uma foto original (1:35000) com "pixel" de 40 micra e produzir a respectiva ortofoto (1:10000) com "pixel" de 100 micra, sendo assim a investigação deve continuar.

APÊNDICE I

Listagem do programa

(9R-)

(*****)

(08/07/89 003.00)

PROGRAMA ortofoto;

(%H 65520,278528,532480)

(Diretiva para alocação de memória

(%N+)

(Diretiva p/ usar ou emular coprocessador

(*****)

(MSDOS 3.3 TURBO PASCAL Versao 5.0

(E' necessario o uso de precisao estendida e COPROCESSADOR 87 para evitar a
(perda de precisao nas operacoes.

(Memoria minima de aproximadamente 550 k bytes

(O DTM devera estar inteiramente contido na foto digitalizada.

(O programa nao emitira uma mensagem de indice fora de dominio se a condicao
(acima nao for satisfeita pelos dados.

(Assume-se tambem que os arquivos de dados estejam coerentes.

(**

///// RESUMO /////

A EXECUCAO DO PROGRAMA ATRAVESSA AS SEGUINTE ETAPAS :

1.- Entrada de dados. Os dados de entrada sao compostos por :

a - distancia focal em mm;

b - coordenadas de foto e terrestres dos pontos de controle ;

c - parametros aproximados da orientacao exterior
(Omega0,Fi0,Capa0,Xc0,Yc0,Zc0) .

d - coordenadas de foto e de scanner das marcas fiduciais ;

e - arquivo contendo a foto aerea digitalizada (TOM);

f - arquivo contendo a altitude dos pontos da malha DTM ;

2.- Realiza a ressecao espacial para a obtencao dos parametros de
orientacao exterior (Omega,Fi,Capa,Xc,Yc,Zc), da equacao de
colinearidade .

3.- Realiza o ajustamento para calibrar o "Scanner" obtendo os
parametros da transformacao Afim que relaciona foto e "Scanner".

4.- Transforma as coordenadas terrestres dos pontos da malha DTM
(malha de 20 metros), em coordenadas de foto, aplicando a
equacao de colinearidade (Celula com 4 Pontos Ancora).

5.- Transforma as coordenadas de foto da etapa 4, em coordenadas
de scanner aplicando o modelo matematico da transformacao
afim .

6.- Densifica coordenadas de scanner da etapa 5 para o
espacamento desejado de saida da ortofoto, ou seja 2.5 em 2.5
metros, aplicando um polinomio bilinear.

7.- Correlaciona as coordenadas de scanner densificadas, da
etapa 6, com o tom de cinza obtido da varredura da foto
aerea obtendo o tom dos pontos retificados.

*)

(*****)

(Extensoes Turbo Pascal em relacao a linguagem Pascal ANSI/IEEE770X3.97-1983.)

(Convencoes usadas: Constantes simbolicas tem prefixo Cs e tipos criados Tn)
USES

CRT,DOS;

(BIBLIOTECAS Turbo Pascal)

TYPE (Tipos globais para todo o ambiente de OrtFoto

TyBaite = BYTE;

(8 bits char sem sinal 0..255)


```

(
    Convensao: Tipos criados tem prefixo ( Ty ) e Constantes ( Cs ) )
CONST
    CsMaxIteracoes = 6;
    CsMaxPtos = 8; ( maximo de pontos de controle )
    CsMaxEquacoes = CsMaxPtos * 2; ( 2 * pontos controle )
    CsMaxIncoq = 6; ( Ordem: Capa , Fi , Omega , Xc , Yc , Zc )
TYPE
    TyTolerancia=RECORD ( Tipos exportados pelo ambiente de Ressecao )
        TyRot:TyReal8; ( r/ teste de convergencia Ressecao )
        TolXYZ:TyReal8 ( r/ r/ r/ )
    END;

    TyCoord =ARRAY1..CsMaxPtos] OF TyReal8; ( vetor de coordenadas. )

    TyControle=RECORD ( Observacoes pontos de controle )
        SigmaFoto.
        Sigma0 :TyReal8; ( NumPontos:dominio = 1..CsMaxPtos )
        NumPontos:0..CsMaxPtos; ( dimensao ocupada nos vetores x y )
        xf.
        yf. ( Lb = foto em mm )
        Xt. ( Terreno: UTM metros )
        Yt.
        Zt :TyCoord
    END;

    TyAtitudeCamara =RECORD ( parametros X0 e depois Xa )
        Capa . ( r/ r/ r/ )
        Fi .
        Omega.
        Xc . ( UTM metros )
        Yc .
        Zc :TyReal8
    END;

    TyRotacao=RECORD ( n = R(Capa) * R(Fi) * R(Omega) )
        SK,CK,SF,CF,SW,CW , ( funcoes trigonometricas )
        m11,m12,m13.
        m21,m22,m23.
        m31,m32,m33:TyReal8
    END;

    TyMVCatidade=ARRAY1..CsMaxIncoq,1..CsMaxIncoq] OF TyReal8;

TYPE ( Ressecao )
    TyVetor =ARRAY1..CsMaxEquacoes] OF TyReal8;
    TyMatriz =ARRAY1..CsMaxIncoq] OF TyVetor;
    TyMeq = 1..CsMaxEquacoes + 1;
    TyRincog = 1..CsMaxIncoq + 1;

(-----)
(107/10/88 )
( Define os dados necessarios para a ressecao espacial. )
PROCEDURE DadosRessecao(VAR Focalmm :TyReal8; ( dist. focal camara )
    VAR Tolerancia :TyTolerancia; ( teste converge )
    VAR Controle :TyControle; ( Pontos controle )
    VAR AtitudeCamara:TyAtitudeCamara);

BEGIN ( DadosRessecao )
    Focalmm:=153.0; ( - p/ negativo + p/ diapositivo )
    Tolerancia.TolRot:=1.0e-4; ( r/ r/ r/ )
    Tolerancia.TolXYZ:=1.0e-2; ( metros )
    WITH Controle DO ( Coordenadas dos pontos de controle )
    BEGIN
        SigmaFoto:=1.0;
        Sigma0:=1.0;
        NumPontos:= 5; ( minimo 3 pontos )
        xfE13:= -73.68; yfE13:= 102.45;

```

```

xfL2J:= -25.00;      qfL2J:= 23.89;
xfL3J:= -65.28;      qfL3J:= -13.02;
xfL4J:= 33.49;       qfL4J:= 94.87;
xfL5J:= 111.28;      qfL5J:= 63.63;

```

```

XtL1J:= 3404038.0;   YtL1J:= 5318277.0;   ZtL1J:= 209.0;
XtL2J:= 3404877.0;   YtL2J:= 5316879.0;   ZtL2J:= 208.0;
XtL3J:= 3404139.0;   YtL3J:= 5316233.0;   ZtL3J:= 217.0;
XtL4J:= 3405937.0;   YtL4J:= 5318119.0;   ZtL4J:= 207.0;
XtL5J:= 3407321.0;   YtL5J:= 5317542.0;   ZtL5J:= 219.0;

```

END; (with)

WITH AtitudeCamara D0 (valores aproximados)

```

BEGIN
  Capa := 0.0;
  Fi := 0.0;
  Omega:= 0.0;
  Xc:= 3405400.0;
  Yc:= 5316500.0;
  Zc:= 2815.0;

```

END (with)

END; (DadosInicao)

(.....)

(.....)

(107/10/98)

```

( Ressecao espacial      Rotacao=R(Capa) * R(Fi) * R(Omega)
( Estima a atitude da camara ajustada e matriz de rotacao correspondente )
PROCEDURE Ressecao(VAR Tolerancia :Tolerancia; ( Leva converg. )
VAR Controle :TyControle;
Focalmm :TyFocal; ( dist. focal camara )
VAR AtitudeCamara:TyAtitudeCamara;
VAR Rotacao :TyRotacao; ( matriz rotacao )
VAR HVCatitude :TyHVCatitude; ( matriz var. cov. )
VAR Convergju :BOOLEM);

```

(.....)

(107/10/98)

```

( Monta a matriz de rotacao passiva R = R(E) * R(F) * R(O)
PROCEDURE Rotacao(VAR AtitudeCamara:TyAtitudeCamara;
VAR Rotacao :TyRotacao);

```

BEGIN (Rotacao)

WITH Rotacao D0

BEGIN

WITH AtitudeCamara D0

```

SIOP
  SK:=SIN(Capa);
  CK:=COS(Capa);
  SF:=SIN(Fi);
  CF:=COS(Fi);
  SW:=SIN(Omega);
  CW:=COS(Omega)

```

END; (with AtitudeCamara)

(matriz de rotacao passiva)

```

m11:= CK * CF;      m12:=CK * SF * SW + SK * CW;      m13:=SK * SW - CK * CF * CW;
m21:= -SF * CF;    m22:=CK * CW - SK * SF * SW;      m23:=SK * SF * CW + CF * SW;
m31:= SF;          m32:= -CF * SW;                    m33:= CF * CW

```

END (with Rotacao)

END; (Rotacao)

(.....)

(.....)

(107/10/98)

```

C Calcula a matriz n = dF(Xa) das derivadas parciais em Xa = 1,0
C Calcula para a coluna referente a um parametro desajudado
C Ordem: Capa, Fi, Omega, Xc, Yc, Zc
PROCEDURE MatrizA(      Beq;          #1gBeq;
                      HumColuna;    #1gHumCol;    (coluna desajudado)
                      FocalImm;     #1gFocImm;
                      VAR AtitudeCamara; #1gAtitudeCamara;
                      VAR Controle;  #1gControle;
                      VAR Rotacao;   #1gRotacao;
                      VAR d;         #1gVector);    (vetor da coluna)
VAR ( MatrizA )
    dX,dY,dZ :#1gVec10;
    q,f,xi,yi:#1gRes10;
    i         #1gBeq;
    j         #1gBeq;

BEGIN ( MatrizA )
    i:=1;
    j:=1;
    WHILE j <= Beq DO
        BEGIN
            WITH Controle,AtitudeCamara DO
                BEGIN
                    dX:=Xc[i] - Zc;
                    dY:=Yc[i] - Yc;
                    dZ:=Zc[i] - Zc;
                END; ( with )

                F:= FocalImm;
                WITH Rotacao DO
                    BEGIN
                        q := f / ( dZ * m31 + dY * m32 + dZ * m33 );
                        xi:=( dX * m11 + dY * m12 + dZ * m13 ) * q;
                        yi:=( dX * m21 + dY * m22 + dZ * m23 ) * q;

                        q:=(Controle.Zc[i] - AtitudeCamara.Zc);
                        q:=(q / ( xi * m13 + yi * m23 + f * m33 )) * f;

                        CASE HumColuna OF
                            1:BEGIN
                                ALJ := yi;
                                ALJ + IJ:= - xi;
                            END;
                            2:BEGIN
                                ALJ := - f * CK - xi * ( xi * CK - yi * SK ) / f;
                                ALJ + IJ:= - f * SK - yi * ( xi * CK - yi * SK ) / f;
                            END;
                            3:BEGIN
                                ALJ:=(( xi * ( xi * SK + yi * CK ) / f ) + f * SK ) * CF + yi * CF;
                                ALJ + IJ:=(( yi * ( xi * SK + yi * CK ) / f ) +
                                    f * CK ) * CF - xi * CF;
                            END;
                            4:BEGIN
                                ALJ := ( m31 * xi - m11 * f ) / q;
                                ALJ + IJ:= ( m31 * yi - m21 * f ) / q;
                            END;
                            5:BEGIN
                                ALJ := ( m32 * xi - m12 * f ) / q;
                                ALJ + IJ:= ( m32 * yi - m22 * f ) / q;
                            END;
                            6:BEGIN
                                ALJ := ( m33 * xi - m13 * f ) / q;
                                ALJ + IJ:= ( m33 * yi - m23 * f ) / q;
                            END;
                        END; ( case )
                    END; ( with )
                END; ( with )
            END;
            j:=j+1;
        END;
    DPC(1,2);

```

```

        INC(i)
    END ( with Mrotacao )
END ( while )
END; ( MatrizA )
(-----)

(-----)
(107/30/88 )
( Calcula o vetor L = F(XU); Lb )
PROCEDURE VetorL(      Neqc          :TyNeqc;
                    Focalmm       :TyReal8;
                    VAR AtitudeCamara:TyAtitudeCamara;
                    VAR Mrotacao   :TyMrotacao;
                    VAR Controle   :TyControle;
                    VAR L          :TyVetor);

VAR ( VetorL )
    dX,dY,dZ,q:TyReal8;
    i          :TyNeqc;
    j          :TyNeqc;

BEGIN ( VetorL )
    i:=1;
    j:=1;
    WHILE j <= Neqc DO
    BEGIN
        WITH AtitudeCamara,Controle DO
        BEGIN
            dX:=XtLiJ - Xc;
            dY:=YtLiJ - Yc;
            dZ:=ZtLiJ - Zc
        END; ( with )

        WITH Mrotacao,Controle DO
        BEGIN
            q:=- Focalmm / ( dX * m31 + dY * m32 + dZ * m33 );
            LLjJ:=( dX * m11 + dY * m12 + dZ * m13 ) * q - xfLiJ; ( Fx )
            INC(j);
            LLjJ:=( dX * m21 + dY * m22 + dZ * m23 ) * q - yfLiJ; ( Fy )
            INC(j);
            INC(i)
        END ( with Mrotacao )
    END ( while )
END; ( VetorL )
(-----)

(-----)
(107/10/88 )
( Forma a matriz normal N = p * AT * A )
( Forma a vetor normal U = p * AT * L )
( Simplificacao: foi assumido peso igual e portanto escalar. )
( Calcula usando um par de colunas de A de cada vez. )
PROCEDURE NormaisNU(      Neqc          :TyNeqc;
                        Nincog       :TyNincog;
                        Peso          :TyReal8;
                        Focalmm      :TyReal8;
                        VAR AtitudeCamara:TyAtitudeCamara;
                        VAR Controle   :TyControle;
                        VAR Mrotacao   :TyMrotacao;
                        VAR L          :TyVetor;
                        VAR N          :TyMatriz;
                        VAR U          :TyVetor);

VAR ( Normais NU )
    i,j :TyNincog;
    k   :TyNeqc;

```

```

s      :TyReal8;
Ai,Aj:TyVetor;                               ( colunas com derivadas )

BEGIN ( NormaisNU )
  FOR i:=1 TO Nincog DO
    BEGIN
      MatrizA(Neqc, i ,Focalmm,AtitudeCamara,Controle,Mrotacao,Ai);
      FOR j:= i TO Nincog DO                   ( forma triang. superior )
        BEGIN
          MatrizA(Neqc, j ,Focalmm,AtitudeCamara,Controle,Mrotacao,Aj);
          s:=0.0;
          FOR k:=1 TO Neqc DO s:=AiLkI * AjLkI + s; ( for k )
          NLI,jI:=s * Peso;                       ( triang. superior )
          NLj,iI:=s * Peso                         ( simetrico )
        END; ( for j )

          s:=0.0;
          FOR k:=1 TO Neqc DO s:=AiLkI * LkI + s; ( for k )
          ULI,I :=s * Peso
        END ( for i )
    END; ( NormaisNU )
(-----)

(-----)
(107/10/88 )
( Inverte a matriz N e retorna N invertida na propria matriz )
PROCEDURE Inversa( Nincog :TyNincog;
                  VAR N      :TyMatriz;
                  VAR Inverteu:BOOLEAN);

VAR ( Inversa )
  i,j,k,m:TyNincog;
  Vetor   :TyVetor;
  Temp    :TyReal8;

BEGIN ( Inversa )
  Inverteu:=TRUE;
  IF (Nincog = 1) AND (NLI,1I <> 0.0)
  THEN NLI,1I:=1.0 / NLI,1I
  ELSE BEGIN
    m:=Nincog - 1;
    FOR k:=1 TO Nincog DO
      BEGIN
        FOR j:=1 TO m DO
          BEGIN
            IF NLI,1I <> 0.0
            THEN VetorLjI:=NLI,j + 1I / NLI,1I
            ELSE BEGIN
              WRITELN('^G, 'ERRO: matriz pode ser singular');
              Inverteu:=FALSE;
              Espere(3000);
              WRITELN;
              Abandone
            END ( if )
          END; ( for j )

          VetorENincogI:=1.0 / NLI,1I;
          FOR i:=1 TO m DO
            BEGIN
              FOR j:=1 TO m DO NLI,jI:=NLI + 1,j + 1I - NLI + 1,1I * VetorLjI;
              NLI,NincogI:= - NLI + 1,1I * VetorENincogI
            END; ( for i )

            FOR j:=1 TO Nincog DO NENincog,jI:=VetorLjI ( for j )
          END ( for k )
        END ( if )
      END ( Inversa )

```

```

END; ( Inversa )
(-----)

(-----)
(107/10/88 )
( Formã vetor X = - N-1 * U correcao aos parametros aproximados )
PROCEDURE VetorX( Nincog:TyNincog;
                 VAR N      :TyMatriz;           ( inversa de N )
                 VAR U      :TyVetor;           ( At * P * L )
                 VAR X      :TyVetor);

VAR ( VetorX )
    i:TyNincog;
    j:TyNincog;
    s:TyReal19;
BEGIN ( VetorX )
    FOR i:=1 TO Nincog DO
        BEGIN
            s:=0.0;
            FOR j:=1 TO Nincog DO s:=N[i,j] * U[j] + s; ( for )
            X[i]:= - s
        END ( for i )
    END; ( VetorX )
(-----)

(-----)
(107/10/88 )
( Verifica se ajustamento convergiu e transfere parametros )
PROCEDURE Converte( Nincog      :TyNincog;
                   VAR Tolerancia :TyTolerancia;
                   VAR XO        :TyVetor;
                   VAR X         :TyVetor;
                   VAR AtitudeCamara:TyAtitudeCamara;
                   VAR Converte   :BOOLEAN);

VAR ( Converte )
    i:TyNincog;
BEGIN ( Converte )
    Converte:=TRUE;
    WITH Tolerancia DO
        BEGIN
            FOR i:=1 TO 3 DO
                BEGIN
                    XOE1[i] :=XOE1[i] + XE1[i];
                    Converte:=(ABS(XE1[i]) <= TolRot) AND Converte
                END; ( for )

            FOR i:=4 TO 6 DO
                BEGIN
                    XOE1[i] :=XOE1[i] + XE1[i];
                    Converte:=(ABS(XE1[i]) <= TolXYZ) AND Converte
                END ( for )
            END; ( with Tolerancia )

        WITH AtitudeCamara DO ( transfere valores ajustados )
            BEGIN
                Capa :=XOE1[1];
                Fi   :=XOE2[1];
                Omega :=XOE3[1];
                Xc   :=XOE4[1];
                Yc   :=XOE5[1];
                Zc   :=XOE6[1]
            END ( with )
        END; ( Converte )
(-----)

(-----)
(107/10/88 )

```

```

( Calcula o vetor v = F(Xa) - Lb )
( Forma Matriz MVC dos parametros MVC = Sigma0 * Sigma0 * N^-1 )
PROCEDURE MVC(      Neqc      :TyNeqc;
                  Nincog     :TyNincog;
                  Focalmm    :TyReal0;
                  Peso       :TyReal0;
                  VAR AtitudeCamara:TyAtitudeCamara;
                  VAR Krotacao  :TyKrotacao;
                  VAR Controle  :TyControle;
                  VAR N         :TyMatriz;      ( inversa de N )
                  VAR MVCatitudo :TyMVCatitudo);

VAR ( MVC )
  dX,dY,dZ,q:TyReal0;
  i
  j           :TyNeqc;
  v,VtpV,s2  :TyReal0;
BEGIN ( MVC )
  i:=1;
  j:=1;
  VtpV:=0.0;
  WHILE j <= Neqc DO
  BEGIN
    WITH AtitudeCamara,Controle DO
    BEGIN
      dX:=XtEiJ - Xc;
      dY:=YtEiJ - Yc;
      dZ:=ZtEiJ - Zc
    END; ( with )

    WITH Krotacao,Controle DO
    BEGIN
      q:= - Focalmm / ( dX * m31 + dY * m32 + dZ * m33 );
      v :=( dX * m11 + dY * m12 + dZ * m13 ) * q - xfEiJ; ( Fx )
      VtpV:=v * Peso * v + VtpV;
      INC(j);
      v :=( dX * m21 + dY * m22 + dZ * m23 ) * q - yfEiJ; ( Fy )
      VtpV:=v * Peso * v + VtpV;
      INC(j);
      INC(i)
    END ( with Krotacao )
  END; ( while )

  s2:=VtpV / ( Neqc - Nincog);      ( Sigma0 a posteriore )
  FOR i:=1 TO Nincog DO
    FOR j:=1 TO Nincog DO MVCatitudoEi,jJ:=NLEi,jJ * s2 ( for for )
  END; ( MVC )
(-----)

```

```

VAR ( Ressecacao )
  Iteracoes :0..CsMaxIteracoes;      ( contador de iteracoes )
  Inverteu   :BOOLEAN;                 ( inversao da matriz N )
  Neqc       :TyNeqc;                  ( numero de equacoes. )
  Nincog     :TyNincog;                ( numero de incognitas )
  Peso       :TyReal0;                 ( peso simplificado )
  XO         :TyVetor;                 ( valores aprox. parametros )
  L          :TyVetor;                 ( L = F(XO) - Lb )
  N          :TyMatriz;                ( matriz Normal At * P * A )
  U         ,                               ( coluna c/ At * P * L )
  X         :TyVetor;                 ( correcao aos parametros )

BEGIN ( Ressecacao )
  Iteracoes:=0;
  Nincog:=6;
  WITH Controle DO
  BEGIN
    Peso:=(Sigma0 / SigmaFoto) * (Sigma0 / SigmaFoto);

```

```

      Neqc:=NumPontos * 2
END; ( with )

REPEAT
  WITH AtitudeCamara DO
  BEGIN
    X0E1J:=Capa;
    X0E2J:=Fi;
    X0E3J:=Omega;
    X0E4J:=Xc;
    X0E5J:=Yc;
    X0E6J:=Zc
  END; ( with )

  Rotacao(AtitudeCamara,Mrotacao);
  Convergii:=FALSE;
  VetorL(Neqc,FocalImm,AtitudeCamara,Mrotacao,Controle,L);
  NormaisNU(Neqc,Nincog,Peso,FocalImm,AtitudeCamara,Controle,Mrotacao,L,N,U);
  Inversa(Nincog,N,Inverteu); ( devolve inversa de N em N )
  IF Inverteu
  THEN BEGIN
    VetorX(Nincog,N,U,X); ( solucao do sistema Normal )
    Converte(Nincog,Tolerancia,X0,X,AtitudeCamara,Convergii)
  END; ( if )
  INC(Iteracoes);
UNTIL Convergii OR ( Iteracoes )= CsMaxIteracoes);

IF Convergii THEN MVC(Neqc,Nincog,FocalImm,Peso,AtitudeCamara,
                      Mrotacao,Controle,N,MVCatitude) ( inversa de N )
END; ( Ressecao )
(-----)
(##### fim Unidade I #####)

(##### Unidade II #####)
(127/10/88)
CONST ( Constantes e Tipos exportados pelo ambiente da Calibracao )
  CsMaxRef2D = 8 ; (Numero maximo de pontos de referencia )
TYPE
  TyVetRef2D=ARRAY[1.. CsMaxRef2D] OF TyReal8; ( vetor de coordenadas )

  TyPontosRef2D=RECORD ( referencias p/ calibracao )
    TotalPontos:INTEGER;
    xm,ym, ( coordenadas de maquina Lb )
    xc,yc :TyVetRef2D ( coordenadas de calibracao )
  END;
    ( XSistM:= a1 * XSistC + b1 * YSistC + c1 )
    ( YSistM:= a2 * XSistC + b2 * YSistC + c2 )

  TyAfim=RECORD
    a1,b1,c1,
    a2,b2,c2:TyReal8 ( Coeficientes transf. afim )
  END;

(-----)
(127/10/88)
( Dados das marcas fiduciais para a calibracao do "Scanner" )
PROCEDURE DadosAfim(VAR PontosRef2D:TyPontosRef2D);
BEGIN ( DadosAfim )
  WITH PontosRef2D DO
  BEGIN
    TotalPontos:=4; ( Leituras no "Scanner" )
    xmE1J:= 570.2; xmE2J:= 6.3; xmE3J:= 571.2; xmE4J:=1137.6;
    ymE1J:=1141.6; ymE2J:= 578.6; ymE3J:= 13.3; ymE4J:= 575.6;
    ( Certificado de calibracao )
    xcE1J:= 0.0; xcE2J:= -113.05; xcE3J:= 0.0; xcE4J:=113.05;
    ycE1J:= -113.06; ycE2J:= 0.0; ycE3J:=113.06; ycE4J:= 0.0
  
```

```

END ( with )
END; ( DadosAfim )
(-----)

```

```

(-----)
( Calcula e retorna coeficientes p/ transformacao SistMaq / SistCalib )
( restricao: os pontos nao podem estar alinhados. )
( SistMaq = sistema de Maquina. SistCalib = sistema de Calibracao. )
( Assumido peso unitario para as observacoes e p/ sigma0. )
(* massa de teste

```

```

*** SISTEMA-1 MAQUINA ***      *** SISTEMA-2 CALIBRACAO ***
1  -115.1106      3.1138      1  -113.0010      0.0070
2   -3.5280     -111.3446      2   -0.0100     -112.9910
3   110.9322      0.2196      3   112.9890      0.0110
4   -0.6336      114.6614      4   -0.0050      113.0100

```

```

Transformacao:
1.0002334      0.0127849      -2.0783667
-0.0128245      1.0000224      1.6532132

53.2385      26.5320      ( maquina )
54.9770      25.5833      ( calibracao )
*)

```

```

(-----)
(127/10/88)
PROCEDURE CalCoeficientes(VAR PontosRef2D:TyPontosRef2D;
                          VAR Afim      :TyAfim;      ( retorna )
                          VAR emq      :TyReal8;
                          VAR Confirmou :BOOLEAN);      ( retorna )

```

```

(-----)
( Estima o erro medio quadratico da observacao isolada. )
PROCEDURE EstimaErro(VAR PontosRef2D:TyPontosRef2D;
                     VAR Afim      :TyAfim;      ( entram )
                     VAR emq      :TyReal8);      ( retorna )

```

```

VAR ( EstimaErro )
k   :INTEGER;
v,vv:TyReal8;      ( v = F(Xa) - Lb;      vv = Vt * P * V )

```

```

BEGIN ( EstimaErro )
vv:=0.0;
WITH Afim,PontosRef2D DO
FOR k:=1 TO TotalPontos DO
BEGIN
v:=a1 * xc[k] + b1 * yc[k] + c1 - xm[k];
vv:=v * v + vv;
v:=a2 * xc[k] + b2 * yc[k] + c2 - ym[k];
vv:=v * v + vv;
END; ( with for )

emq:=SQRT(vv / (PontosRef2D.TotalPontos - 1)) ( observacao isolada )
END; ( EstimaErro )
(-----)

```

```

VAR ( Calibrar )
mediaXc,mediaYc:TyReal8;      ( coordenadas medias SistMaq )
mediaXm,mediaYm:TyReal8;      ( coordenadas medias SistCalib )
dXc,dYc,dXm,dYm:TyReal8;      ( diferencas observado - medias )
sXc,sYc      :TyReal8;      ( somatorio )
sXm,sYm      :TyReal8;      ( somatorio )
sqXc,sqYc      :TyReal8;      ( somatorio quadrados )
spXcYc      :TyReal8;      ( somatorio do produto cruzado )
spXcXm,spYcYm :TyReal8;      ( somatorio produto SistMaq SistCalib )
spXcYm,spYcXm :TyReal8;
divisor      :TyReal8;      ( auxiliar de calculo )

```

```

i          :INTEGER;
           ( indexador dos vetores )

BEGIN ( Calibrar )
  WITH PontosRef2D,Afim DO
  BEGIN
    a1:=1.0;   b1:=0.0;   c1:=0.0;
    a2:=0.0;   b2:=1.0;   c2:=0.0;
    emq:=9.e9;

    Confirmou:=(TotalPontos >= 3) AND (TotalPontos <= CsMaxRef2D);
    IF Confirmou
    THEN BEGIN
      mediaXc:=0.0;      mediaYc:=0.0;
      mediaXm:=0.0;      mediaYm:=0.0;

      FOR i:=1 TO TotalPontos DO
      BEGIN
        writeln('XcL',i,'D',XcL[i]:15:2,' XmL',i,'D',XmL[i]:15:4);
        writeln('YcL',i,'D',YcL[i]:15:2,' YmL',i,'D',YmL[i]:15:4);
        writeln;

        mediaXm:=XmL[i] + mediaXm;      mediaYm:=YmL[i] + mediaYm;
        mediaXc:=XcL[i] + mediaXc;      mediaYc:=YcL[i] + mediaYc;
      END; ( for )

      mediaXm:=mediaXm / TotalPontos;   mediaYm:=mediaYm / TotalPontos;
      mediaXc:=mediaXc / TotalPontos;   mediaYc:=mediaYc / TotalPontos;

      sXc:=0.0;   sYc:=0.0;   sXm:=0.0;   sYm:=0.0;
      spXcYc:=0.0; spXcXm:=0.0; spYcYm:=0.0; spXcYm:=0.0; spYcXm:=0.0;
      sqXc:=0.0;   sqYc:=0.0;

      FOR i:=1 TO TotalPontos DO
      BEGIN
        dXc:=XcL[i] - mediaXc;   sXc:=sXc + dXc;   sqXc:=dXc * dXc + sqXc;
        dYc:=YcL[i] - mediaYc;   sYc:=sYc + dYc;   sqYc:=dYc * dYc + sqYc;

        dXm:=XmL[i] - mediaXm;   sXm:=sXm + dXm;
        dYm:=YmL[i] - mediaYm;   sYm:=sYm + dYm;
        ( soma produtos cruzados )

        spXcYc:=dXc * dYc + spXcYc;
        spXcXm:=dXc * dXm + spXcXm;
        spYcYm:=dYc * dYm + spYcYm;
        spXcYm:=dXc * dYm + spXcYm;
        spYcXm:=dYc * dXm + spYcXm;
      END; ( for )

      divisor:=sqXc * sqYc - spXcYc * spXcYc;
      IF divisor <> 0.0
      THEN BEGIN
        a1:=(sqYc * spXcXm - spXcYc * spYcXm) / divisor;
        b1:=(sqXc * spYcXm - spXcYc * spXcXm) / divisor;
        c1:=mediaXm - a1 * mediaXc - a2 * mediaYc;
        a2:=(sqYc * spXcYm - spXcYc * spYcYm) / divisor;
        b2:=(sqXc * spYcYm - spXcYc * spXcYm) / divisor;
        c2:=mediaYm - b1 * mediaXc - b2 * mediaYc;

        EstimaErro(PontosRef2D,Afim,emq)
      END
    ELSE BEGIN
      WRITELN(' ' :10,'Dados inconsistentes ou alinhados. ');
      Pausa
    END; ( if divisor )
    Confirmou:=divisor <> 0.0
  END
END

```

```

ELSE BEGIN
  WRITELN;
  WRITELN(' ':10, 'Numero de pontos deve ser >= 3 e <= ',CsMaxRef2D);
  WRITELN(' ':10, 'Fornecidos ',TotalPontos:7);
  Pausa
END ( if Confirmou )
END ( with )
END; ( Calibrar )
(-----)
(XXXXXXXXXXXX fjm_Unidade II XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX)

(XXXXXXXXXXXX Unidade III XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX)
( Carga da imagem de 512 * 512 bytes com tons de cinza da varredura da foto
( A imagem e carregada na memoria "Heap" na forma de colunas de 512 bytes,
( no sistema de eixos (u,v) da foto digitalizada na fita magnetica.
(*)
+-----) ( u = record      i <= u <= 512 )
| modulo de 512 * 512 recortado
| do Arquivo da fita magnetica
v ( v = byte      i <= v <= 512 )
*)
( Constantes e tipos exportados pelo ambiente de CargaFotoMemo )
CONST
  Cs512=512;          ( Tamanho da imagem de entrada e de saida f(Video) )
TYPE
  TyPtrReg  = ^ TyReg;          ( apontador p/ linha de varredura )
  TyReg     =ARRAY[1..Cs512] OF TyBaite; ( coluna varredura c/ 512 bytes )
  TyIndReg  = 1..Cs512 + 1;
  TyFotoMemo=ARRAY[1..Cs512] OF TyPtrReg; ( vetor de apontadores p/ vetores )
(-----)
(127/10/98)
( Transfere os dados de um arquivo de imagem 512 * 512 para a memoria. )
PROCEDURE CargaFotoMemo(VAR FotoMemo:TyFotoMemo; ( memoria 512 * 512 bytes )
  VAR TudoBem :BOOLEAN);
VAR ( CargaFotoMemo )
  NomeArq:TyNomeArq;          ( nome arquivo com a imagem )
  Arq     :FILE OF TyReg;     ( 512 registros de 512 bytes )
  Reg     :TyReg;
  u       :TyIndReg;
  j       :INTEGER;
BEGIN ( CargaFotoMemo )
  REPEAT
    WRITELN;
    WRITE(' ':10, 'Nome do Arquivo de varredura do "Scanner" ? ');
    READLN(NomeArq);
    TudoBem:=ChkDir(NomeArq);
    IF TudoBem
    THEN BEGIN
      IF ABS(MEMAVAIL * 16.0 ) > (1.0 * Cs512 * Cs512)
      THEN BEGIN
        ASSIGN(Arq,NomeArq);
        RESET(Arq);
        j:=FILESIZE(Arq);
        TudoBem:= j = Cs512;
        IF j > Cs512 THEN j:=Cs512;

        TempoXY(1,9);

        u:=1;
        WHILE u <= j DO
          BEGIN
            NEW(FotoMemo[u]);          ( aloca coluna 512 bytes na memoria )
            READ(Arq,FotoMemo[u]^ );  ( carrega a area alocada )
            INC(u)                    ( ==) (u+1)
          END
        END
      END
    END
  UNTIL TudoBem;
END;

```



```

BEGIN ( CoefBilinear )
  X4:=X1 + CsMalha;      Y4:=Y1 - CsMalha;      ( X3 = X1 e Y3 = Y4 e X2 = X4

WITH AtitudeCamara, Mrotacao D0
BEGIN
  XX:=X1 - Xc;      YY:=Y1 - Yc;      ZZ:=Z1 - Zc;      ( Ancora 1
  Denominador:=(m31 * XX + m32 * YY + m33 * ZZ) / f;
  X1Foto:=(m11 * XX + m12 * YY + m13 * ZZ) / Denominador;
  Y1Foto:=(m21 * XX + m22 * YY + m23 * ZZ) / Denominador;

  XX:=X4 - Xc;      ZZ:=Z2 - Zc;      ( Ancora 2
  Denominador:=(m31 * XX + m32 * YY + m33 * ZZ) / f;
  X2Foto:=(m11 * XX + m12 * YY + m13 * ZZ) / Denominador;
  Y2Foto:=(m21 * XX + m22 * YY + m23 * ZZ) / Denominador;

  XX:=X1 - Xc;      YY:=Y4 - Yc;      ZZ:=Z3 - Zc;      ( Ancora 3
  Denominador:=(m31 * XX + m32 * YY + m33 * ZZ) / f;
  X3Foto:=(m11 * XX + m12 * YY + m13 * ZZ) / Denominador;
  Y3Foto:=(m21 * XX + m22 * YY + m23 * ZZ) / Denominador;

  XX:=X4 - Xc;      ZZ:=Z4 - Zc;      ( Ancora 4
  Denominador:=(m31 * XX + m32 * YY + m33 * ZZ) / f;
  X4Foto:=(m11 * XX + m12 * YY + m13 * ZZ) / Denominador;
  Y4Foto:=(m21 * XX + m22 * YY + m23 * ZZ) / Denominador
END; ( with AtitudeCamara, Mrotacao )

WITH Afim D0
BEGIN
  X1Scan:= a1 * X1Foto + b1 * Y1Foto + c1;
  X2Scan:= a1 * X2Foto + b1 * Y2Foto + c1;
  X3Scan:= a1 * X3Foto + b1 * Y3Foto + c1;
  X4Scan:= a1 * X4Foto + b1 * Y4Foto + c1;

  Y1Scan:= a2 * X1Foto + b2 * Y1Foto + c2;
  Y2Scan:= a2 * X2Foto + b2 * Y2Foto + c2;
  Y3Scan:= a2 * X3Foto + b2 * Y3Foto + c2;
  Y4Scan:= a2 * X4Foto + b2 * Y4Foto + c2
END; ( with afim )

WITH Bilinear D0      ( coeficientes p/ 0.0 <= X <= 1.0 e 0.0 <= Y <= 1.0 )
BEGIN
  a0:=X1Scan;
  a1:=X2Scan - X1Scan;
  a2:=X3Scan - X1Scan;
  a3:=X1Scan - X2Scan - X3Scan + X4Scan;

  b0:=Y1Scan;
  b1:=Y2Scan - Y1Scan;
  b2:=Y3Scan - Y1Scan;
  b3:=Y1Scan - Y2Scan - Y3Scan + Y4Scan
END ( with Bilinear )
END; ( CoefBilinear )
(-----)

(*****
(127/07/89 127/10/88)
( Monitor e NaoOrtog )
( Cada um controla a geracao da ortofoto a partir de pares de perfis do DTM.
( Obs: .Para numeros Inteiros de 16 bits do PDP-11 permutar os bytes p/ o PC.
( .As cotas contidas no arquivo estao transladadas em 190m p/ poderem ser
( armazenadas em 1 byte. O valor real da cota=Valor do byte + 190 m
( .O arquivo consta de 276 registros de 508 bytes cada ( CCT do PDP-11 ).
( .Apenas uma parte do DTM sera utilizada 65 registros de 65 bytes
( . As cotas do DTM correspondentes a uma malha regular de 20m em 20m.
( .O intervalo de densificacao sera de 2.5 m resultando 2.5 * 8 = 20 m
( . Um par de perfis gera 8 linhas de 512 bytes pela densificacao de 64

```



```

VAR ( Monitor )
  NomeArq :TyNomeArq;
  ArqDTM :FILE OF TyRegPDP;
  TudoBem :BOOLEAN;
  RegPDP :TyRegPDP;
  Zdtm1 :
  Zdtm2 :TyZdtm;

  i,j,k,m,n:TyBaite;
  X1,Y1,Z1,Z2,
  Z3,Z4:TyReal8; ( DTM )

  X,Y :TyReal4; ( dominio: 0.0 <= X <= 1.0 e 0.0 <= Y <= 1.0 )
  f :TyReal8;
  Bilinear :TyBilinear; ( coeficientes bilinear )
  xScan,yScan:TyReal4; ( posicao p/ busca do ton )
  u,v :INTEGER;
  du,dv :TyReal4;
  TonInterp :TyReal4; ( tonalidade interpolada )
  RegOrto :TyRegOrto; ( 8 linhas de 512 bytes )
  ArqOrto :FILE; ( arquivo de RegOrto )

BEGIN ( Monitor )
  f:= -1.0 * Focalmm;
  TonInterp:=0.0;
  REPEAT
    WRITELN;
    WRITE( ':10, 'Nome do Arquivo de DTM ? ');
    READLN(NomeArq);
    TudoBem:=ChkDir(NomeArq);
    IF TudoBem
    THEN BEGIN
      ASSIGN(ArqOrto, 'ORTOFOTO.BIN');
      REWRITE(ArqOrto, SIZEOF(TyRegOrto));

      ASSIGN(ArqDTM, NomeArq);
      RESET(ArqDTM);

      SEEK(ArqDTM, CsYinic - 1);
      READ(ArqDTM, RegPDP);
    )
    WRITELN;
    WITH RegPDP DO
      WRITELN(CsYinic - 1:5, ' NumArq DTM: ', SWAP(NumArq):5, ' NumReg: ',
        SWAP(NumReg):5, ' CodReg: ', SWAP(CodReg):5);
    )
    TempoXY(1,20);
    GOTOXY(1,15); CLREOL; WRITE('Processado Perfil : ');

    FOR j:=0 TO CsQtdPerfis DO ( Recorta DTM e carrega o segundo perfil
      Zdtm2[Lj]:=RegPDP.Zs[Lj + CsDeltaJ] + Cs190;

      Y1:=CsCorteN; ( origem da area de interesse )
      FOR i:=2 TO CsQtdPerfis + 1 DO ( varre os 64 perfis restantes )
        BEGIN ( Pascal ANSI/IEEE770X3.97-1983 substituir MOVE por Zdtm1:=Zdtm2
          MOVE(Zdtm2,Zdtm1,SIZEOF(TyZdtm)); ( Segundo passa a ser primeiro )

          READ(ArqDTM,RegPDP);
          FOR j:=0 TO CsQtdPerfis DO ( Recorta DTM e carrega o segundo perfil
            Zdtm2[Lj]:=RegPDP.Zs[Lj + CsDeltaJ] + Cs190; ( for j )

```

```

                                Z2:=Zdtm1[0];
X1:=CsCorteE;                   Z4:=Zdtm2[0];           ( Retorna esquerda area corte
FOR k:=0, TO CsQtdPerfis - 1 DO   ( caminha 64 células esq p/ dir
BEGIN
  Z1:=Z2;   Z2:=Zdtm1[k + 1];   ( Final célula = inicio vizinha
  Z3:=Z4;   Z4:=Zdtm2[k + 1];
  CoefBilinear(f, AtitudeCâmara, Mrotacao, Afim, X1, Y1,
              Z1, Z2, Z3, Z4, Bilinear);
  WITH Bilinear DO
  BEGIN
    xScan:=a0;                   yScan:=b0;           ( canto superior esquerdo
    u:=TRUNC(xScan);             v:=TRUNC(yScan);
    du:=xScan - u;              dv:=yScan - v;
    TonInterp:=(Ton[u]^[v] - Ton[u + 1]^-[v] -
                Ton[u]^-[v + 1] + Ton[u + 1]^-[v + 1]) * du * dv +
                (Ton[u + 1]^-[v] - Ton[u]^-[v]) * du +
                (Ton[u]^-[v + 1] - Ton[u]^-[v]) * dv +
                Ton[u]^-[v];
    RegOrto[0], (CsDensifica + 1) * k]:=ROUND(TonInterp);
    X:=CsPasso;
    FOR n:=1 TO CsDensifica DO   ( resto da primeira linha
    BEGIN
      xScan:= a1 * X + a0;       yScan:= b1 * X + b0;
      u:=TRUNC(xScan);          v:=TRUNC(yScan);
      du:=xScan - u;           dv:=yScan - v;
      TonInterp:=(Ton[u]^-[v] - Ton[u + 1]^-[v] -
                  Ton[u]^-[v + 1] + Ton[u + 1]^-[v + 1]) * du * dv +
                  (Ton[u + 1]^-[v] - Ton[u]^-[v]) * du +
                  (Ton[u]^-[v + 1] - Ton[u]^-[v]) * dv +
                  Ton[u]^-[v];
      RegOrto[0], (CsDensifica + 1) * k + n]:=ROUND(TonInterp);
      X:=X + CsPasso
    END; ( for n )
    Y:=CsPasso;
    FOR m:=1 TO CsDensifica DO
    BEGIN
      xScan:=a2 * Y + a0;       yScan:=b2 * Y + b0;
      u:=TRUNC(xScan);          v:=TRUNC(yScan);
      du:=xScan - u;           dv:=yScan - v;
      TonInterp:=(Ton[u]^-[v] - Ton[u + 1]^-[v] -
                  Ton[u]^-[v + 1] + Ton[u + 1]^-[v + 1]) * du * dv +
                  (Ton[u + 1]^-[v] - Ton[u]^-[v]) * du +
                  (Ton[u]^-[v + 1] - Ton[u]^-[v]) * dv +
                  Ton[u]^-[v];
      RegOrto[m], (CsDensifica + 1) * k]:=ROUND(TonInterp);
      X:=CsPasso;
      FOR n:=1 TO CsDensifica DO
      BEGIN
        xScan:= a3 * X * Y + a2 * Y + a1 * X + a0;
        yScan:= b3 * X * Y + b2 * Y + b1 * X + b0;
        u:=TRUNC(xScan);        v:=TRUNC(yScan);
        du:=xScan - u;          dv:=yScan - v;
        TonInterp:=(Ton[u]^-[v] - Ton[u + 1]^-[v] - Ton[u]^-[v + 1] +
                    Ton[u + 1]^-[v + 1]) * du * dv +
                    (Ton[u + 1]^-[v] - Ton[u]^-[v]) * du +
                    (Ton[u]^-[v + 1] - Ton[u]^-[v]) * dv + Ton[u]^-[v];
        RegOrto[m], (CsDensifica + 1) * k + n]:=ROUND(TonInterp);
        X:=X + CsPasso
      END; ( for n )
      Y:=Y + CsPasso
    END ( for m )
  END

```

```

END; ( with Bilinear )
X1:=X1 + CsMalha ( caminha p/ direita 1 celula
END; ( for k )
( Procedimento BLOCKWRITE :extensao do Turbo Pascal
BLOCKWRITE(ArqOrto,RegOrto,1); ( 8 linhas de 512 bytes
GOTOXY(21,15); WRITE(i - 1:5);
Y1:=Y1 - CsMalha ( Desce 1 perfil
END; ( for i )

CLOSE(ArqDTM);
CLOSE(ArqOrto);
TempoXY(1,19);
GOTOXY(1,21);
WRITELN;
WRITELN(' ':10,^g,^g,'Criado: ORTOFOTO.BIN')
END
ELSE BEGIN
WRITELN(' ':10,'Arquivo nao encontrado. ');
WRITELN(' ':10,'Indique Drive e "PATH." ');
Pausa;
LimpaTela
END ( if )
UNTIL TudoBem OR (NomeArq = '')
END; ( Monitor )
(-----

(-----
( Gera coordenadas de "Scanner" p/ busca mecanica do nivel de cinza.
PROCEDURE NaoOrtog( Focalmm :TyReal8; ( distancia focal em mm
VAR AtitudeCamara:TyAtitudeCamara;
VAR Mrotacao :TyMrotacao; ( matriz de rotacao
VAR Afim :TyAfim; ( calibracao "Scanner"
VAR ( NaoOrtog )
NomeArq :TyNomeArq;
ArqDTM :FILE OF TyRegPDP; ( no lay-out da CCT PDP-11
TudoBem :BOOLEAN;

RegPDP :TyRegPDP;
Zdtm1 , ( perfis de 20m * 20m c/ cotas
Zdtm2 :TyZdtm;

i,j,k,m,n:TyBaite; (
X1,Y1,Z1,Z2, ( Perfil1 ----> +-----+
Z3,Z4:TyReal8; ( DTM ) C, | celula |
( | 20 * 20 |
( | Ancoras |
( Perfil2 ----> +-----+
( 3 4

X,Y :TyReal4; ( dominio: 0.0 <= X <= 1.0 e 0.0 <= Y <= 1.0
f :TyReal8;
Bilinear :TyBilinear; ( coeficientes bilinear
xScan,yScan:TyReal4; ( posicao p/ busca do ton

BEGIN ( NaoOrtog )
f:= -1.0 * Focalmm;
REPEAT
WRITELN;
WRITE(' ':10,'Nome do Arquivo de DTM ? ');
READLN(NomeArq);
TudoBem:=ChkDir(NomeArq);
IF TudoBem
THEN BEGIN
ASSIGN(ArqDTM,NomeArq);
RESET(ArqDTM);

```

```

SEEK(ArqDTM,CsYinic - 1);
READ(ArqDTM,RegPDP);
C)
WRITELN;
WITH RegPDP DO
  WRITELN(CsYinic - 1:5,'> NumArq DTM:',SWAP(NumArq):5,' NumReg:',
    SWAP(NumReg):5,' CodReg:',SWAP(CodReg):5);
C)
TempoXY(1,20);
GOTOXY(1,15); CLREOL; WRITE('Processado Perfil : ');

FOR j:=0 TO CsQtdPerfis DO      C Recorta DTM e carrega o segundo perfil
  Zdtm2[Cj]:=RegPDP.Zs[Cj + CsDeltaJJ + Cs190];

  Y1:=CsCorteN;                C origem da area de interesse
  FOR i:=2 TO CsQtdPerfis + 1 DO C varre os 64 perfis restantes
  BEGIN C Pascal ANSI/IEEE770X3.97-1983 substituir MOVE por Zdtm1:=Zdtm2
    MOVE(Zdtm2,Zdtm1,SIZEOF(TyZdtm)); C Segundo passa a ser primeiro

    READ(ArqDTM,RegPDP);
    FOR j:=0 TO CsQtdPerfis DO C Recorta DTM e carrega o segundo perfil
      Zdtm2[Cj]:=RegPDP.Zs[Cj + CsDeltaJJ + Cs190]; C for j

      Z2:=Zdtm1[Cj];
      X1:=CsCorteE; Z4:=Zdtm2[Cj]; C Retorna esquerda

      FOR k:=0 TO CsQtdPerfis - 1 DO C caminha 64 celulas esq p/ dir
      BEGIN
        Z1:=Z2; Z2:=Zdtm1[Ck + 1]; C Final celula = inicio vizinha
        Z3:=Z4; Z4:=Zdtm2[Ck + 1];

        CoefBilinear(f,AtitudeCamara,Mrotacao,Afim,X1,Y1,
          Z1,Z2,Z3,Z4,Bilinear);
        WITH Bilinear DO
        BEGIN
          Y:=0.0;
          FOR m:=0 TO CsDensifica DO
          BEGIN
            X:=0.0;
            FOR n:=0 TO CsDensifica DO
            BEGIN
              xScan:= a3 * X * Y + a2 * Y + a1 * X + a0;
              yScan:= b3 * X * Y + b2 * Y + b1 * X + b0;
              X:=X + CsPasso C 0.0 <= X <= 1.0
            END; C for n
            Y:=Y + CsPasso C 0.0 <= Y <= 1.0
          END C for m
        END; C with Bilinear
        X1:=X1 + CsMalha C caminha p/ direita 1 celula
      END; C for k
      GOTOXY(21,15); WRITE(i - 1:5);
      Y1:=Y1 - CsMalha C Desce 1 perfil
    END; C for j

  CLOSE(ArqDTM);
  TempoXY(1,19);
  GOTOXY(1,21);
  WRITELN;
  WRITELN
END
ELSE BEGIN
  WRITELN(' ':10,'Arquivo nao encontrado. ');
  WRITELN(' ':10,'Indique Drive e "PATH". ');
  Pausa;
  LimpaTela
END C if )

```



```

LimpaTela;
WRITELN;
WRITELN;
WRITELN;
WRITELN(' INICIO DE PROCESSAMENTO !!!!! ');
DadosRessecão(Focalmm,Tolerancia,Controle,AtitudeCamara);
Ressecão(Tolerancia,Controle,Focalmm,
          AtitudeCamara,Mrotacao,MVAtitude,Convergiu);
IF Convergiu
THEN BEGIN
  WRITELN(' ':10,'Ressecão com sucesso.',' ':32);
  DadosAfim(PontosRef2D);
  CalCoeficientes(PontosRef2D,Afim,Emq,Convergiu);
  IF Convergiu
  THEN BEGIN
    WRITELN(' ':10,'Calibracao "Scanner" Foto com sucesso. ');
    Depura(AtitudeCamara,Mrotacao,Afim,Emq);
    LimpaTela;
    WRITELN;
    WRITELN(' ':10,'1- Gerar Ortofoto com Tons de cinza. ');
    WRITELN(' ':10,'2- Varredura nao ortogonal. ');
    WRITELN;
    WRITE(' ':10,'Escolha ? ');
    IF PegaTecla = '1'
    THEN BEGIN
      MARK(MarcaMemo);
      CargaFotoMemo(FotoMemo,TudoBem);
      IF TudoBem
      THEN BEGIN
        WRITELN;
        WRITELN;
        WRITELN(' ':10,'Carga da foto digitalizada efetuada com sucesso. ');
        Monitor(Focalmm,AtitudeCamara,Mrotacao,Afim,FotoMemo)
        END; ( if tudobem )
        RELEASE(MarcaMemo)
        ( DISPOSE do Marca! APSI )
      END
    ELSE NaoOrtog(Focalmm,AtitudeCamara,Mrotacao,Afim)
    END ( if )
  END; ( if )
  WRITELN;
  WRITELN('^g,^g,' TERMINO DE PROCESSAMENTO !!!!! ')
END. ( Ortofoto )
( ***** )

```

SUMMARY

This dissertation presents procedures to get a digital orthophoto. It also shows results, analysis and conclusions taken from a test. The production of digital orthophoto is more automatized than the conventional one and permits more facilities for the treatment of the picture. In addition, the digital orthophoto can be produced in less time and is cheaper. The method tested starts from one DIM that has a regular shape and low density. At the first transforms coordinates of DIM into coordinates of picture by the collinearity equations and after that, this method transforms the coordinates of picture in to coordinates of machine (scanner) by the affine transformation. At the second step the method densifies the coordinates of machine by applying the bilinear interpolation. At the third step it looks for the grey tonality in a matrix gotten from the scanning on the original photo and, in this search, the bilinear interpolation is used again. The grey tonality is recorded in a magnetic form (disk or tape) and further it is printed with the aid of equipment that changes digital data into analogical data. The final result of the test was the production — in sensitive film — of a digital orthophoto (512x512 pixels) that showed a good visual quality.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 Andrade, J.B., Olivas Mary A.A. Calibração de Câmaras Aerofotogramétricas. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, 1980.
- 02 Collins Willian J. Programação Estruturada com Estudos de Casos em Pascal. Editora McGraw-Hill. São Paulo, 1988.
- 03 Ebner, H. et alii. "HIFI - A Minicomputer Program Package for Height Interpolation by Finite Elements". ISP Commission III, XIVth Congress Hamburg, 1980.
International archives of Photogrammetry, vol. XXIII, B9, p.532.
- 04 Farrer Harry et al. Programação Estruturada de Computadores. Algoritmos Estruturados. Editora Guanabara. Rio de Janeiro, 1986.
- 05 Gaydos, L. et alii. The Production of Orthophotographs By Digital Image Processing Techniques. Technical Papers, 1986, ACSM-ASPRS Annual Convention, vol.4, Photogrammetry: 241-249.
- 06 Göpfert W. (Institut für Angewandte Geodäsie - Frankfurt). Correspondência datada de 27

- de abril/83, contendo dados para o teste.
- 07 Horton, J., 1978, The PDS differential rectifier:
An economical approach to digital orthophotos.
Applied Optics Division, Perkin - Elmer Corp.
Garden Grove, Califórnia, USA.
- 08 Hössler Rainer. Differential Rectification of
Digital or Digitized Imageries. Artigo pu-
blicado, XIV Congresso, ISP, Comissão III.
Hamburg, 1980.
- 09 Houssay, P.R. Brossier. Digital Orthophotograph
At IGN-France. Comissão IV, pág.346-351,
vol.26, 16º Congresso - ISPRS, Kyoto, 1988.
- 10 Keating, T.J. & Boston, D.R. Digital Orthophoto
Production Using Scanning Microdensitometers.
Photogrammetric Engineering & Remote Sensing
Vol.45, nº 6: 735-740,1979.
- 11 Konecny, G. Methods and Possibilities for Digital
Diferencial Rectification. Photogrammetric
Engineering & Remote Sensing, Vol.45, nº 6 :
727-734, 1979.
- 12 Leberl, F. 1975. Photogrammetric Interpolation.
Photogrammetric Engineering & Remote Sensing
Vol.41, nº 5.
- 13 Lugnani, J.B. Introdução à Fototriangulação.
1ª edição. Curitiba, UFPR, 1984.

- 14 Manual do EBR - modelo EAX, 01801/01889.
- 15 Manual do Ortoprojeter OR - 1 da Wild.
- 16 Mayr, Werner & Heipke, Christian. A Contribution To Digital Orthophoto Generation. Artigo publicado pela Comissão IV, pág. 430-439, vol.27, parte B11, e referente ao 16º Congresso - ISPRS, Kyoto, 1988.
- 17 Menezes, Júlio Cesar. Conversações pessoais.
- 18 Moffit, Francis. Fotogrametria. 2ª edição. Pennsylvania, International Textbook, 1976.
- 19 Paredes, Evaristo Atencio. Introdução à Aerofotogrametria para Engenheiros. Maringá, PR, UEM, CNPq, Concitec, 1986.
- 20 Schut, G.H. 1976. Review of Interpolation Methods for Digital Terrain Models. The Canadian Surveyor, vol.30, nº 5, dec. 1976.
- 21 Tommaselli, A.M.G. Construção Analítica de Modelos e suas Aplicações. Revista Brasileira de Cartografia, nº 41 : 43-58, jan/87.
- 22 Wiesel, J. Herstellung Digitaler Orthophotos. In: Bähr (edt.) Digitale Bildverarbeitung, Anwendung in Photogrammetrie und Fernerkundung; Wichmann Verlag, Karlsruhe; ISBN 3-87907-149-7; pp 73-96.
- 23 Wolf, Paul R. Elements of Photogrammetry. 2ª edição. McGraw-Hill International Editions, 1988.