Campus de São Carlos

**Estudo do processo de captação de imagens
aplicado à fotogrametria digital**

David Luciano Rosalen

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ESTUDO DO PROCESSO DE CAPTAÇÃO
DE IMAGENS
APLICADO À FOTOGRAMETRIA
DIGITAL

Eng. David Luciano Rosalen

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia dos Transportes

Orientador: Prof. Dr. Irineu da Silva

São Carlos
1997

Class.	IGSC - EESC
Cut.	4957
Tempo	T 0031/98

S/S 942407

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

Rosalen, David Luciano
R788e Estudo do processo de captação de imagens
aplicado à fotogrametria digital / David Luciano
Rosalen. -- São Carlos, 1997.

Dissertação (Mestrado). -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1997.

Área: Transportes

Orientador: Prof. Dr. Irineu da Silva

1. Mensuração. 2. Topografia. 3. Fotogrametria.
4. Fotointerpretação. 5. Scanners. 6. Imagens. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **DAVID LUCIANO ROSALEN**

Dissertação defendida e aprovada em 22-12-1997
pela Comissão Julgadora:

Prof. Doutor **IRINEU DA SILVA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **VALDEMAR ANTÔNIO DEMÉTRIO**
(Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **SEGUNDO CARLOS LOPES**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)

Prof. Doutor **ANTÔNIO NELSON R. DA SILVA**
Coordenador da Área de Transportes

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Irineu da Silva à orientação e apoio durante a elaboração deste trabalho.

À Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A., principalmente aos engenheiros Amaury Alfredo Brandalize, Silas Sallem Filho e ao técnico Ivanir Bortolanza o apoio nos processos experimentais.

À Fundação Centro Tecnológico para Informática - CTI/ Instituto de Microeletrônica, principalmente aos pesquisadores Dr. Alaíde Pellegrini Mammana e ao Eng. Marcos Antônio Schreiner, pelo atendimento e sugestões dadas.

Ao Prof. Dr. Adilson Gonzaga pelas sugestões e apoio nos processos experimentais no Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP.

Ao Laboratório de Eletrônica do IFSC/USP, principalmente ao técnico Salvador Ferro, pelo apoio nos processos experimentais.

Ao Departamento de Ecologia da UFSCar pelo apoio nos processos experimentais.

Ao Instituto Militar de Engenharia - IME pelo apoio nos processos experimentais.

Aos Profs. Benedito Galvão Benze e José Carlos Fogo do Dep. de Estatística da UFSCar pelo apoio na avaliação dos resultados obtidos.

Ao Prof. Dr. Valdemar A. Demétrio pelo incentivo e amizade.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Transportes da EESC / USP, em especial a Heloisa, pela amizade e colaboração.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
1. INTRODUÇÃO.....	1-1
2. RESTITUIÇÃO FOTOGRAMÉTRICA	2-1
2.1. INTRODUÇÃO	2-1
2.1.1. Captação da imagem	2-1
2.1.2. Obtenção de pontos de apoio aerofogramétricos	2-1
2.1.3. Obtenção do modelo estereoscópico	2-2
2.1.4. Geração do mapa	2-2
2.2. RESTITUIDORES ANALÓGICOS	2-2
2.3. RESTITUIDORES SEMI-ANALÍTICOS	2-4
2.4. RESTITUIDORES ANALÍTICOS	2-6
2.4.1. Monocomparadores	2-7
2.4.2. Estereocomparadores	2-7
2.4.3. Restituidores Analíticos	2-8
2.5. ORTORESTITUIDORES	2-9
2.6. RESTITUIDORES DIGITAIS	2-9
2.7. ORIENTAÇÃO FOTOGRAMÉTRICA	2-12
2.7.1. Orientação Interna	2-13
2.7.2. Orientação Relativa	2-14
2.7.3. Orientação Absoluta	2-21

3. FOTOGRAMETRIA DIGITAL	3-1
3.1. INTRODUÇÃO	3-1
3.2. CAPTAÇÃO DE IMAGENS	3-2
3.3. IMAGENS FOTOGRÁFICAS	3-6
3.3.1. Emulsões Fotográficas e Resolução	3-6
3.3.2. Câmeras Aerofotogramétricas	3-9
3.4. IMAGENS DIGITAIS	3-13
3.4.1. Definição	3-13
3.4.2. Resolução Espacial de uma Imagem	3-14
3.4.3. Resolução Radiométrica de uma Imagem	3-14
3.4.4. Arquivos de Imagem	3-15
3.4.5. Captação de Imagens Digitais	3-17
3.4.6. Monitores de Saída	3-19
3.5. RESTITUIDORES DIGITAIS	3-20
3.5.1. Configuração Básica	3-20
3.5.2. Vantagens e Desvantagens de um Restituído Digital	3-21
3.5.3. Equipamentos Digitais Existentes no Mercado	3-22
3.6. PERSPECTIVAS FUTURAS	3-24
 4. SCANNERS	 4-1
4.1. INTRODUÇÃO	4-1
4.2. RESOLUÇÃO DE DIGITALIZAÇÃO	4-2
4.3. CLASSIFICAÇÃO DOS SCANNERS	4-6
4.3.1. Sistemas de Movimentação dos Sensores	4-6
4.3.2. Sistemas de Arranjo dos Sensores	4-8
4.3.3. Sistemas de Iluminação	4-9
4.3.4. Utilização dos Scanners	4-11
4.4. FONTES DE ERROS DOS SCANNERS	4-14
4.5. CALIBRAÇÃO DE SCANNERS	4-16

5. METODOLOGIA ADOTADA PARA A CALIBRAÇÃO DE SCANNERS	5-1
5.1. INTRODUÇÃO	5-1
5.2. GRELHA DE CALIBRAÇÃO GRÁFICA	5-3
5.2.1. <i>Modelo Geométrico da Grelha de Calibração</i>	5-3
5.2.2. <i>Material de Suporte e Gravação</i>	5-4
5.2.3. <i>Leitura das Coordenadas Calibradas</i>	5-5
5.3. GRELHA DE CALIBRAÇÃO DIGITAL	5-6
5.4. SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DE SCANNERS - SCS	5-6
5.4.1. Módulo I - Leitura Automática das Coordenadas Deformadas	5-7
5.4.2. Módulo II - Transformação do Sistema de Coordenadas Deformadas no Sistema de Coordenadas Calibradas Ajustadas	5-11
 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	6-1
6.1. GRELHA DE CALIBRAÇÃO GRÁFICA	6-1
6.2.1. <i>Material de Suporte e Gravação da Grelha</i>	6-1
6.2.2. <i>Leitura das Coordenadas Calibradas</i>	6-1
6.3. NUMERIZAÇÃO DAS GRELHAS GRÁFICAS	6-1
6.4. SCS - MÓDULO I	6-2
6.5. SCS - MÓDULO II	6-6
 7. CONCLUSÕES.....	7-1
 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	8-1

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Fluxograma do funcionamento de um restituidor analógico.....	2-3
Figura 2-2: Restituidor analógico A-10 (WILD).....	2-4
Figura 2-3: Fluxograma do funcionamento de um restituidor semi-analítico	2-5
Figura 2-4: Restituidor analógico PC-1 adaptado para semi-analítico através do software PC-PRO 600.	2-5
Figura 2-5: Estereopantógrafo APT-2 (WILD)	2-6
Figura 2-6: Fluxograma do funcionamento de um restituidor analítico.....	2-8
Figura 2-7: Estação de trabalho analítica SD - 3000 (LEICA/WILD).....	2-9
Figura 2-8: Ortorestituidor PP8-8 acoplado a um restituidor A-8	2-10
Figura 2-9: Fluxograma do funcionamento de um restituidor digital	2-11
Figura 2-10: Restituidor analógico B-8S (WILD)	2-11
Figura 2-11: Orientação fotogramétrica e sistemas de coordenadas.....	2-12
Figura 2-12: Elementos de orientação interna.....	2-15
Figura 2-13: Pontos de von Gruber.....	2-18
Figura 2-14: Elementos de orientação relativa para fotos aproximadamente verticais.....	2-20
Figura 2-15: Elementos de orientação absoluta	2-29
Figura 2-16: Resumo das etapas de uma restituição analítica	2-32
 Figura 3-1: Comparação entre um olho humano e uma câmera	3-3
Figura 3-2: Processo de captação e tratamento de imagens na fotogrametria digital	3-5
Figura 3-3: Componentes de uma câmera aerofotogramétrica	3-9
Figura 3-4: Esquema de funcionamento do sistema aerofotogramétrico RC-30.....	3-10
Figura 3-5: Câmera aerofotogramétrica RC-30 (WILD)	3-11
Figura 3-6: Representação matricial de uma imagem digital	3-13
Figura 3-7: Componentes de um restituidor digital.....	3-21
Figura 3-8: Restituidor digital DVP	3-23
Figura 3-9: Restituidor digital DPW	3-24

Figura 4-1: Esquema genérico de um scanner	4-2
Figura 4-2: Scanner de mesa.....	4-7
Figura 4-3: Scanner de tambor	4-7
Figura 4-4: Scanner de rolo.....	4-8
Figura 4-5: Vista esquemática da unidade de numerização do scanner DSW-100 HELAVA/LEICA, onde temos o sistema de iluminação (1), a placa de numerização (2) e dois sensores (3a,b).....	4-9
Figura 4-6: Sistemas de iluminação encontrados nos scanners	4-11
Figura 5-1: Processo de calibração de scanners	5-2
Figura 5-2: Configuração geométrica da borda da grelha de calibração	5-3
Figura 5-3: Tela principal do SCS.....	5-7
Figura 5-4: Módulo I do SCS	5-8
Figura 5-5: Máscara horizontal de varredura	5-10
Figura 5-6: Máscara vertical de varredura.....	5-10
Figura 5-7: Máscara final de varredura	5-11
Figura 5-8: Módulo II do SCS.....	5-12
Figura 5-9: Opção de cálculo sem transformação.....	5-17
Figura 5-10: Opção de cálculo com transformação de dois parâmetros.....	5-20
Figura 5-11: Opção de cálculo com transformação de seis parâmetros.....	5-24
Figura 5-12: Opção de cálculo com transformação de seis parâmetros e com ajustamento	5-28

Figura 6-1: Detalhe da grelha de calibração digital (Scanner SHARP - Grelha de esp. de 25 μm)	6-2
Figura 6-2: Detalhe da grelha de calibração digital (Scanner HP - Grelha de esp. de 89 μm)	6-3
Figura 6-3: Detalhe da grelha de calibração digital (Scanner DSW - Grelha de esp. de 25 μm)	6-3
Figura 6-4: Detalhe da grelha de calibração digital (Scanner SHARP - Grelha de esp. de 89 μm)	6-4
Figura 6-5: Vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas transladas para o scanner HP (grelha de espessura de 89 μm)	6-9
Figura 6-6: Vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas transladas para o scanner SHARP (grelha de espessura de 89 μm)	6-10
Figura 6-7: Vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas transladas para o scanner DSW (grelha de espessura de 89 μm)	6-11
Figura 6-8: Vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas transformadas para o scanner HP (grelha de espessura de 89 μm)	6-14
Figura 6-9: Vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas transformadas para o scanner SHARP (grelha de espessura de 89 μm)	6-15
Figura 6-10: Vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas transformadas para o scanner DSW (grelha de espessura de 89 μm)	6-16
Figura 6-11: Vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas ajustadas para o scanner HP (grelha de espessura de 89 μm)	6-20
Figura 6-12: Vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas ajustadas para o scanner SHARP (grelha de espessura de 89 μm)	6-21
Figura 6-13: Vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas ajustadas para o scanner DSW (grelha de espessura de 89 μm)	6-22

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Precisão de equipamentos restituídos analógicos	2-6
Tabela 2-2: Quadro resumo de metodologias de captação, orientação e restituição fotogramétricas	2-12
Tabela 3-1: Determinação experimental da resolução de uma câmera métrica.....	3-7
Tabela 3-2: Emulsões utilizadas na fotogrametria.....	3-8
Tabela 3-3: Informações impressas na aerofoto produzida pela câmera RC-30	3-12
Tabela 3-4: Valores numéricos de um pixel em diferentes sistemas.....	3-15
Tabela 3-5: Resolução encontrada em sensores de estado sólido.....	3-18
Tabela 3-6: Características técnicas das câmeras digitais utilizadas no sistema V-STARS (LEICA).....	3-19
Tabela 3-7: Resolução de monitores de vídeo mais usuais no mercado.....	3-20
Tabela 4-1: Resolução de diferentes modelos de scanners utilizados na Fotogrametria Digital.....	4-3
Tabela 4-2: Resolução e tamanho de arquivos para uma foto 230x230 mm.....	4-5
Tabela 4-3: Precisão planimétrica em metros alcançada numa restituição fotogramétrica realizada no DVP - Digital Photogrammetric Station	4-5
Tabela 4-4: Características técnicas dos principais scanners desktops encontrados no mercado	4-13

Tabela 6-1: Espessura das linhas em pixels nas grelhas digitais.....	6-5
Tabela 6-2: Erros residuais e precisões em milímetros obtidas sem a transformação das coordenadas (grelha de espessura de 89 μm)	6-6
Tabela 6-3: Parâmetros e fatores de transformação obtidos com a transformação das coordenadas utilizando-se dois parâmetros (grelha de espessura de 89 μm).....	6-7
Tabela 6-4: Erros residuais e precisões em milímetros obtidas com a transformação das coordenadas utilizando-se dois parâmetros (grelha de espessura de 89 μm).....	6-8
Tabela 6-5: Parâmetros e fatores de transformação obtidos com a transformação das coordenadas utilizando-se seis parâmetros (grelha de espessura de 89 μm).....	6-12
Tabela 6-6: Erros residuais e precisões em milímetros obtidas com a transformação das coordenadas utilizando-se seis parâmetros (grelha de espessura de 89 μm).....	6-13
Tabela 6-7: Parâmetros e fatores de transformação obtidos com a transformação das coordenadas utilizando-se seis parâmetros com ajustamento (grelha de espessura de 89 μm)	6-17
Tabela 6-8: Erros residuais e precisões em milímetros obtidas com a transformação das coordenadas utilizando-se seis parâmetros com ajustamento (grelha de espessura de 89 μm)	6-18

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- BMP - "Bitmaps"
- CAPES - Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior
- CTI - Fundação Centro Tecnológico para Informática.
- DTP - "DeskTop Publishing Scanners".
- EESC - Escola de Engenharia de São Carlos.
- GIF - "Graphics Interchange Format"
- IFSC - Instituto de Física de São Carlos.
- IME - Instituto Militar de Engenharia.
- JPEG - "Joint Photographic Experts Group"
- MDT - Modelo Digital de Terrenos.
- MMQ - Método dos Mínimos Quadrados.
- PCX - "PC Paintbrush"
- SCS - Sistema de Calibração de Scanners.
- TIFF - "Tagged Image File Format"
- UFSCar - Universidade Federal de São Carlos.
- USP - Universidade de São Paulo.

LISTA DE SÍMBOLOS

- $\tilde{x}_i, \tilde{y}_i$ - Coordenadas Calibradas.
- ε_i, η_i - Coordenadas Deformadas.
- x_i, y_i - Coordenadas Deformadas Transladadas.
- x'_i, y'_i - Coordenadas Deformadas Transformadas.
- $\bar{x}_i, \bar{y}_i$ - Coordenadas Deformadas Ajustadas.
- a_1, a_6 - Parâmetros de transformação das coordenadas (transformação utilizando-se dois parâmetros).
- $a'_1, a'_2, a'_3, a'_4, a'_5, a'_6$ - Parâmetros de transformação das coordenadas (transformação utilizando-se seis parâmetros).
- $\bar{a}_1, \bar{a}_2, \bar{a}_3, \bar{a}_4, \bar{a}_5, \bar{a}_6$ - Parâmetros de transformação das coordenadas (transformação utilizando-se seis parâmetros com ajustamento).
- T_x, T_y - Fatores de transformação das coordenadas (transformação utilizando-se dois parâmetros).
- $T'_x, T'_y, K'_x, K'_y, \alpha', e'$ - Fatores de transformação das coordenadas (transformação utilizando-se seis parâmetros).
- $\bar{T}_x, \bar{T}_y, \bar{K}_x, \bar{K}_y, \bar{\alpha}, \bar{e}$ - Fatores de transformação das coordenadas (transformação utilizando-se seis parâmetros com ajustamento).
- $v_{\varepsilon_i}, v_{\eta_i}$ - Erros residuais das coordenadas deformadas.
- v_{x_i}, v_{y_i} - Erros residuais das coordenadas deformadas transladadas.
- $v_{x'_i}, v_{y'_i}$ - Erros residuais das coordenadas deformadas transformadas.

- v_{x_i}, v_{y_i} - Erros residuais das coordenadas deformadas ajustadas.
- $\bar{v}_\varepsilon, \bar{v}_\eta$ - Média dos erros residuais das coordenadas deformadas.
- $\bar{v}_x, \bar{v}_y$ - Média dos erros residuais das coordenadas deformadas transladadas.
- $\bar{v}_{x'}, \bar{v}_{y'}$ - Média dos erros residuais das coordenadas deformadas transformadas.
- $\bar{v}_{\bar{x}}, \bar{v}_{\bar{y}}$ - Média dos erros residuais das coordenadas deformadas ajustadas.
- $s_{\varepsilon_0}, s_{\eta_0}$ - Precisão dos erros residuais das coordenadas deformadas.
- s_{x_0}, s_{y_0} - Precisão dos erros residuais das coordenadas deformadas transladadas.
- s_{x_b}, s_{y_b} - Precisão dos erros residuais das coordenadas deformadas transformadas.
- $s_{\bar{x}_0}, s_{\bar{y}_0}$ - Precisão dos erros residuais das coordenadas deformadas ajustadas (ou precisão a posteriori da observação padrão).
- $\bar{s}_{\varepsilon_0}, \bar{s}_{\eta_0}$ - Precisão da média dos erros residuais das coordenadas deformadas.
- $\bar{s}_{x_0}, \bar{s}_{y_0}$ - Precisão da média dos erros residuais das coordenadas deformadas transladadas.
- $\bar{s}_{x_b}, \bar{s}_{y_b}$ - Precisão da média dos erros residuais das coordenadas deformadas transformadas.
- $\bar{s}_{\bar{x}_0}, \bar{s}_{\bar{y}_0}$ - Precisão da média dos erros residuais das coordenadas deformadas ajustadas.
- $s_{\bar{x}_i}, s_{\bar{y}_i}$ - Precisão das coordenadas deformadas ajustadas.
- $s_{a_1}, s_{a_2}, s_{a_3}, s_{a_4}, s_{a_5}, s_{a_6}$ - Precisão dos parâmetros ajustados de transformação das coordenadas.

RESUMO

Com o advento da Fotogrametria Digital nos últimos anos, a numerização de fotogramas através de scanners tornou-se uma etapa obrigatória nos processos fotogramétricos. Este trabalho tem como objetivo principal apresentar uma técnica de calibração de scanners, utilizando-se uma Transformação Afim de seis parâmetros com superabundância de observações. A metodologia proposta foi aplicada em três modelos de scanners diferentes e os resultados obtidos, nas condições experimentais, demonstraram uma boa adequação do modelo matemático proposto.

ABSTRACT

With the approach of Digital Photogrammetry the last years, the digitizing of pictures through scanners has been an obligatory stage in photogrammetric procedures. The main purpose of this paper is to show a scanners calibration technique, by using an affine six-parameters transformation with redundancy. The proposed methodology was applied in three different models of scanners, and, in experimental states, the results gotten showed a good fit of the proposed mathematic model.

1. INTRODUÇÃO

A palavra Fotogrametria tem como origem três palavras gregas, *foto* (luz) + *gramma* (traçado) + *metron* (medida), o que significaria literalmente: “medir por meio do traçado da luz”. Como esse “traçado luminoso” pode ser registrado num filme fotográfico, poderíamos agora obter um novo significado: “medir através de fotografias”. Dessa maneira, chegamos à definição de fotogrametria encontrada no “Manual of Photographs” (1980), editado pela American Society of Photogrammetry (Associação Americana de Fotogrametria): **“Fotogrametria é a ciência ou a arte de se obterem medidas confiáveis por meio de fotografias”**.

É importante diferenciarmos também “fotogrametria” de “fotointerpretação”. Fotointerpretação, de acordo com o “Manual of Photographic Interpretation”, é a **“ciência ou a arte de examinar imagens fotográficas com o objetivo de identificar objetos e determinar seus significados”**. Sendo assim, a fotogrametria (aspecto quantitativo) é utilizada na fotointerpretação quando a mesma exigir medições de relativa precisão na obtenção de seu produto final, que são os mapas temáticos (aspecto qualitativo).

Podemos classificar a fotogrametria em três categorias: fotogrametria **terrestre**, **aérea** e **espacial**. A fotogrametria terrestre é realizada através de câmeras métricas terrestres acopladas ou não a teodolitos e seu eixo de visada é horizontal; a fotogrametria aérea ou aerofotogrametria utiliza-se de câmeras métricas aéreas colocadas em aviões e finalmente a fotogrametria espacial é realizada através de satélites e/ou ônibus espacial. O presente trabalho focalizará a aerofotogrametria, por se tratar da categoria mais utilizada.

A importância da fotogrametria como uma técnica de se obter medidas de objetos é mundialmente reconhecida e a sua aplicabilidade abrange diferentes áreas, tais como:

- a) Mapeamento Cartográfico (constitui a sua mais importante aplicação, sendo amplamente utilizada);
- b) Geologia;
- c) Engenharia Agrônômica e Florestal;

- d) Projetos e construções civis (destacando-se a elaboração de ante-projetos de vias em geral);
- e) Cadastro urbano e rural;
- f) Arquitetura e Arqueologia;
- g) Meteorologia e Oceanografia;
- h) Medicina;
- i) Criminologia.

Dada a sua importância e as suas inúmeras aplicações, a fotogrametria tem sido alvo de constantes inovações tecnológicas. Dos primórdios da fotogrametria até a década de 60, tivemos um grande desenvolvimento de equipamentos ótico-mecânicos que realizam o processo de orientação fotogramétrica analogicamente. Essa etapa é conhecida como **Fotogrametria Analógica**.

Na década de 70, com o avanço da eletrônica e o surgimento de computadores mais compactos e com maior capacidade de cálculo, os processos fotogramétricos passaram a ser executados de maneira analítica, dando origem aos chamados restituidores analíticos, surgindo, dessa forma, a **Fotogrametria Analítica**.

A partir da década de 80, a informática teve grandes avanços, tanto em nível de hardwares, como de softwares, o que possibilitou o desenvolvimento de numerizadores (ou "scanners") mais eficientes; propiciando, dessa forma, o uso de imagens digitais em substituição às imagens fotográficas na fotogrametria. Estabelecendo dessa forma, mais uma etapa da fotogrametria, a **Fotogrametria Digital**, consolidada com o lançamento dos primeiros restituidores digitais nos anos 90.

A Fotogrametria Digital faz uso dos métodos analíticos de cálculo, porém não mais utiliza imagens na forma de negativos, diapositivos ou papel, mas sim imagens na forma numérica ou digital, obtidas via scanners. Dessa forma as operações realizadas nas imagens não são mais ótico-eletromecânicas, mas digitais via softwares específicos.

Como é de se esperar, o processo de captação de imagens digitais, especificamente a numerização de imagens fotográficas, leva a deformações, que devem ser quantificadas e avaliadas. Dessa maneira, o objetivo principal deste trabalho é propor uma técnica de calibração de scanners e testá-la em três modelos de scanners (dois scanners de mesa, "desktop", de diferentes formatos e um scanner fotogramétrico).

Outro objetivo é descrever os processos de numerização via scanners e dar uma visão geral dos processos analíticos de orientação fotogramétrica e da Fotogrametria Digital, visto que tais noções teóricas praticamente inexistem publicadas em português.

2. RESTITUIÇÃO FOTOGRAMÉTRICA

2.1. INTRODUÇÃO

Como foi citado anteriormente, a aplicação de maior importância da fotogrametria é a elaboração de mapas. Para obter um mapa de uma determinada área através da aerofotogrametria, temos basicamente quatro etapas, descritas a seguir.

2.1.1. Captação da imagem

O processo de captação da imagem consiste em registrar, através de um sensor, o posicionamento espacial dos acidentes naturais e artificiais da superfície do terreno. Essa captação, na aerofotogrametria, é realizada através de câmeras métricas aéreas, originando as aerofotos, que são agrupadas em pares homólogos (estereopares), que possibilitam a visão estereoscópica.

Atualmente, com o advento da fotogrametria digital, o processo de captação passou a ter uma etapa a mais, que é a numerização das imagens fotográficas através de "scanners".

2.1.2. Obtenção de pontos de apoio aerofotogramétricos

Pontos de apoio são pontos de coordenadas conhecidas (X,Y,Z), localizados na área a ser fotografada. Esses pontos são utilizados para a orientação absoluta do modelo estereoscópico.

Os pontos da rede geodésica nacional podem ser aproveitados como pontos de apoio nos levantamentos aerofotogramétricos. No caso da inexistência ou

insuficiência de pontos na região a ser levantada, há a necessidade de um levantamento de campo para obtê-los. Atualmente o Sistema de Posicionamento Global - GPS ("Global System Positioning") tem sido utilizado para implantação desses pontos de apoio.

Os pontos de apoio devem ser convenientemente distribuídos sobre a área a ser fotografada, considerando evidentemente o processo de aerotriangulação para a sua densificação.

2.1.3. Obtenção do modelo estereoscópico

A partir das imagens obtidas são formados os pares estereoscópicos, que orientados, possibilitam a formação de um modelo tridimensional da superfície fotografada. Esse modelo obtido constitui a base para a geração dos mapas.

2.1.4. Geração do mapa

O mapa é gerado através da projeção ortogonal da superfície da área abrangida pelo modelo estereoscópico.

Essa transformação de um estereopar de fotografias (projeção perspectiva central) com uma superposição adequada, em uma representação em projeção ortogonal é denominada **restituição fotogramétrica**.

Existem basicamente três diferentes maneiras de se realizar a restituição fotogramétrica: o método **empírico** ou **analógico**, o método **analítico** e mais recentemente o método **digital**. Para cada um desses métodos de restituição existem equipamentos restituidores diferentes.

2.2. RESTITUIDORES ANALÓGICOS

A **restituição analógica** é realizada através de equipamentos que podem ser classificados, de acordo com o sistema de projeção, em restituidores mecânicos, óticos ou óticos-mecânicos. Estes equipamentos permitem a orientação do estereopar e conseqüentemente a obtenção do modelo estereoscópico. Na restituição analógica, o aparelho restituidor utilizado é do tipo analógico e o processo de restituição é também analógico. Esse tipo de equipamento imperou na fotogrametria até a década de 70.

O mapa, nesse caso, é gerado em papel diretamente pelo operador ou indiretamente via pantógrafo. Essa operação é realizada através da navegação da marca-índice pelo modelo estereoscópico. A representação do

relevo do terreno através de curvas de nível é obtida de forma similar, isto é, o operador, através da visão estereoscópica fornecida pelo modelo, navega a marca-índice numa diferença de nível igual a zero, desenhando dessa maneira as curvas de nível.

A Figura 2-1 representa o esquema simplificado de funcionamento de um restituidor analógico e a Figura 2-2 ilustra o restituidor analógico A-10 da Wild.

Figura 2-1: Fluxograma do funcionamento de um restituidor analógico

Figura 2-2: Restituídor analógico A-10 (Wild)

2.3. RESTITUIDORES SEMI-ANALÍTICOS

Com o avanço da eletrônica e o aparecimento dos computadores mais eficientes, foi possível, mesmo num restituidor analógico, gerar um mapa numérico, para posterior edição em sistemas de computação gráfica. Os restituidores assim adaptados realizam a **restituição semi-analítica**.

De acordo com Mitishita et alii (1989), são necessários os seguintes equipamentos para transformar um restituidor analógico num semi-analítico:

- a) um sistema de quantificação dos movimentos nas direções x , y e z (um codificador);
- b) um conversor dos sinais emitidos pelos codificadores;
- c) um computador com um programa adequado para a recepção, processamento e gerenciamento dos dados.

A empresa Wild desenvolveu um software específico para coleta e edição desse tipo de dados; o sistema desenvolvido que denomina-se PC-PRO 600, é um aplicativo para rodar no sistema CAD MicroStation da Intergraph. Esse sistema também é utilizado em restituidores analíticos (DSR 14, SD 2000 e SD 3000, todos fabricados pela Wild).

Em muitos casos, em restituidores semi-analíticos, a orientação absoluta é realizada analiticamente, pois geralmente os softwares de edição possuem aplicativos para esse fim (como o PC-PRO 600 e o Maxi-Cad).

A Figura 2-3 representa o esquema simplificado de funcionamento de um restituidor semi-analítico. Na Figura 2-4 encontramos o restituidor analógico PC-1 adaptado para semi-analítico.

Figura 2-3: Fluxograma do funcionamento de um restituidor semi-analítico

Figura 2-4: Restituidor analógico PC-1 adaptado para semi-analítico através do software PC-PRO 600.

A precisão da restituição analógica varia de acordo com o restituidor utilizado, sendo que os mesmos podem também ser classificados segundo a sua precisão, como indica a Tabela 2-1.

Tabela 2-1: Precisão de equipamentos restituidores analógicos

Restituídor	Precisão planimétrica (μ no plano de origem)	Precisão altimétrica (/1000 H)	Exemplo
1.a ordem	± 4	0,1 - 0,2	A-10 Wild, PG-3 Kern
2.a ordem	$\pm 4 - 10$	0,2 - 0,6	A-8 Wild, PG-2 Kern
3.a ordem	$\pm 10 - 20$	> 0,6	B-8 Wild, Planitop Zeiss- Oberkochen

Fonte: Cuervo y Estevez (1980)

Existem também os restituidores de "4.^a ordem", que são denominados de estereopantógrafos, isto é, são constituídos por um pantógrafo conectado a um estereoscópio de espelhos, permitindo dessa forma a realização de uma restituição expedita (vide Figura 2-5).

Figura 2-5: Estereopantógrafo APT-2 (WILD)

2.4. RESTITUIDORES ANALÍTICOS

A metodologia analógica da fotogrametria não foi desenvolvida por desconhecimento da metodologia analítica de cálculo, mas sim devido a não existir, na época, máquinas calculadoras capazes de realizar os cálculos envolvidos no processo. Esse fato foi resumido pela seguinte frase de Otto von Gruber (um dos precursores da fotogrametria): "*a fotogrametria é a arte de se evitarem os cálculos matemáticos*". Porém com o advento dos computadores, esses cálculos tornaram-se possíveis, surgindo, então, a **fotogrametria analítica**.

Na fotogrametria analítica, os restituidores analógicos foram substituídos pelos restituidores analíticos, onde os processos analógicos de orientação do estereopar são realizados por soluções matemáticas, que somente puderam ser implementadas com o desenvolvimento dos computadores de maior capacidade de cálculo e de programas computacionais.

O processo de geração do mapa na restituição analítica, apesar de ser numérico, é ainda analógico, isto é, o operador desenha esse mapa "manualmente" baseando-se no modelo estereoscópico.

Também nos restituidores analíticos de última geração existem softwares aplicativos que realizam operações fotogramétricas, como a aerotriangulação de forma numérica ou ainda conforme descreve Campos (1994), softwares que possibilitam a geração de modelos digitais do terreno ("MDTs"), a partir de uma malha regular de pontos sobre o modelo estereoscópico, também gerada de forma automatizada.

O protótipo do 1.º restituidor analítico foi patenteado por U. V. Helava no ano de 1957. O primeiro modelo comercial, entretanto, surgiu 20 anos depois em 1976 no Congresso Internacional de Fotogrametria em Helsinque (Finlândia).

Na fotogrametria analítica podem ser utilizados os equipamentos descritos a seguir.

2.4.1. Monocomparadores:

São equipamentos que medem as coordenadas da foto e posteriormente necessitam de um outro instrumento denominado de "Transferidor de pontos", que transfere os pontos medidos no monocomparador para a outra foto do estereopar, permitindo dessa maneira medir a paralaxe dos pontos. A Kern desenvolveu um equipamento denominado de CPM 1, que aglutinava um monocomparador e um transferidor de pontos num só aparelho. Esse tipo de equipamento não permite logicamente a visão estereoscópica e somente realiza medições, portanto os dados obtidos devem ser posteriormente transferidos para um computador para posterior processamento (sistema "off-line").

2.4.2. Estereocomparadores

Um estereocomparador funciona da mesma forma de um monocomparador, porém o mesmo trabalha com as duas fotos do estereopar, dispensando, dessa maneira, o Transferidor de pontos e permitindo também a visão estereoscópica.

2.4.3. Restituidores Analíticos

Um restituidor analítico pode ser definido como um estereocomparador totalmente integrado a um computador, permitindo um processo "on-line", onde o modelo estereoscópico é continuamente orientado à medida que se navega no mesmo com a marca-índice. Podemos citar como exemplos o Kern DSR, Zeiss Planicomp, Wild DSR 14, Wild SD 2000 e o SD 3000; sendo que esses dois últimos são os modelos mais atuais no mercado. Os restituidores analíticos de última geração possuem diversos softwares integrados que realizam diferentes funções como criar MDTs, edição gráfica (como o já citado PC-PRO 600) e outras tarefas fotogramétricas.

A Figura 2-6 representa o esquema simplificado de funcionamento de um restituidor analítico e a Figura 2-7 ilustra o restituidor digital SD 3000 fabricado pela Leica/Wild.

Figura 2-6: Fluxograma do funcionamento de um restituidor analítico
Fonte: Silva (1994).

Figura 2-7: Estação de trabalho analítica SD 3000 (Leica/Wild)

2.5. ORTORESTITUIDORES

É importante destacar que no processo de restituição fotogramétrica podemos obter como produto final do processo, em vez de um mapa gráfico ou digital, uma **ortofoto**. Como indicam Tavares & Fagundes (1991) uma ortofotografia é geometricamente equivalente a uma carta, isto é, também consiste numa projeção ortogonal de uma porção do terreno em um plano tangente à calota terrestre correspondente; sendo que a diferença reside no fato dos objetos serem representados pictoriamente, ao invés de serem representados através de linhas, pontos e convenções cartográficas.

Para produção de ortofotografias, existem os chamados **ortorestituidores**, que também podem ser analógicos, analíticos ou digitais. Como exemplos de equipamentos ortorestituidores podemos citar o SFOM 693, Kelsh K-320, Zeiss Ortho-3 Projector e o Wild PPO-8 (analógicos); o Wild Avioplan OR-1 e o Zeiss Orthocomp Z-2 (analíticos). No caso da fotogrametria digital, um restituidor digital poderá produzir uma ortoimagem numérica como um aplicativo do sistema, como exemplo, podemos citar o restituidor digital DPW da Wild.

Na Figura 2-8 encontramos o ortorestituidor PPO-8 adaptado para operar em conjunto com um restituidor A-8.

Figura 2-8: Ortorestituidor PPO-8 acoplado a um restituidor A-8

2.6. RESTITUIDORES DIGITAIS

Na restituição analítica, assim como na analógica, utilizam-se imagens fotográficas; na **restituição digital** porém, as imagens utilizadas são numéricas, obtidas através da digitalização das imagens fotográficas. O processo de orientação é analítico, porém um restituidor digital abarca muitas outras tarefas, todas elas realizadas via softwares aplicativos (como ~~o~~ tratamento de imagens, geração de MDTs, aerotriangulação, ortorestituição, etc.).

A Figura 2-9 representa o esquema simplificado de funcionamento de um restituidor digital.

Figura 2-9: Fluxograma do funcionamento de um restituidor digital
Fonte: Silva (1994).

No capítulo 3 a fotogrametria digital será exposta mais detalhadamente, já que ela constitui a última grande inovação tecnológica nessa área.

É interessante situar o Brasil quanto aos tipos de restituidores fotogramétricos em atividade. O Brasil foi um dos países que mais adquiriu equipamentos analógicos no mundo, principalmente os eficientes restituidores B-8 fabricados pela empresa Wild (Figura 2-10).

Figura 2-10: Restituidor analógico B-8S (Wild)

Atualmente no Brasil, as empresas de fotogrametria brasileiras encontram-se na fase de transição dos equipamentos semi-analíticos para os digitais, com alguns restituidores analíticos em uso.

Na Tabela 2-2 é exposto um quadro resumo das metodologias de captação de imagens, orientação fotogramétrica e geração de mapas e no próximo item é apresentado o processo de orientação fotogramétrica, que irá gerar o modelo estereoscópico do terreno.

Tabela 2-2: Quadro resumo de metodologias de captação, orientação e restituição fotogramétricas

Etapa	Fotogrametria Analógica	Fotogrametria Semi-analítica	Fotogrametria Analítica	Fotogrametria Digital	Fotogrametria Digital (futuro)
Cronologia	Imperou até a década de 70	Surgiu a partir da década de 60/70, sendo utilizada até hoje	Surgiu a partir da década de 70, sendo utilizada até hoje	Surgiu a partir da década de 90	? /
Captação da Imagem	Câmeras Fotográfica	Câmeras Fotográfica	Câmeras Fotográfica	Câmeras Fotográfica e "Scanners"	Câmera Digital
Imagem utilizada na restituição	Fotográfica em diapositivos, negativos e papel	Fotográfica em diapositivos, negativos e papel	Fotográfica em diapositivos, negativos e papel	Digital (arquivos numéricos)	Digital (arquivos numéricos)
Orientação	Analógica	Analógica (Orientação absoluta em alguns casos é realizada analiticamente)	Analítica	Analítica	Analítica
Geração do mapa	Analógica	Analógica	Analógica	Analógica	Digital (correlação de imagens)
Geração de Curvas de nível	Analógica	Analógica	Analógica	Digital (MDT)	Digital (MDT)
Edição do Mapa	Graficamente	Digital (CAD)	Digital (CAD)	Digital (CAD)	Digital (CAD)
Observações	-	-	-	Sistema multi-tarefas (aerotriangulação, ortofoto, etc.)	Sistema multi-tarefas (aerotriangulação, ortofoto, etc.)

2.7. ORIENTAÇÃO FOTOGRAMÉTRICA

Para a obtenção do modelo estereoscópico da área levantada temos que realizar a orientação do par de fotografias homólogas.

O processo de orientação fotométrica consiste basicamente em reconstruir a posição exata que tinha cada fotografia no momento da exposição; onde a partir das coordenadas dos fotogramas (x' , y' - foto esquerda; x'' , y'' - foto

direita), são obtidas as coordenadas do Modelo Estereoscópico (x, y, z) e finalmente as Coordenadas do Terreno (X, Y, Z) (Figura 2-11).

Figura 2-11: Orientação Fotogramétrica e Sistemas de Coordenadas
Fonte: Adaptado de Lopez-Cuervo (1980)

Esse processo pode ser dividido em três fases: a **orientação interior** ou **interna**, a **orientação relativa** e a **orientação absoluta**. Alguns autores agrupam a orientação relativa e a absoluta num só item denominado de **orientação exterior**. Todas essas etapas serão descritas a seguir.

2.7.1. Orientação Interna

A orientação interna, é assim denominada porque constitui no processo que cria a **geometria interna** da câmera aérea no restituidor. Para tanto, faz-se necessário a localização da imagem fotográfica em relação ao centro

perspectivo, que é definido pela lente da câmera. Essa operação reconstitui o feixe perspectivo central de cada fotografia.

A orientação interna é responsável pelas coordenadas da foto (x' , y' e x'' , y'') e seus parâmetros de orientação são:

- a) a posição do ponto principal de cada foto (centro da fotografia) do par estereoscópico, (x_o', y_o') , (x_o'', y_o'') ;
- b) a distância principal (distância focal calibrada da câmera fotogramétrica) do par estereoscópico, (c) ;

2.7.1.1. Metodologia Analógica

A metodologia **analógica** para esse processo consiste nas seguintes etapas:

- a) Centragem das fotografias: consiste em fazer coincidir as marcas fiduciais de cada diapositivo com as marcas existentes no porta-placas do restituidor; com essa operação colocamos o centro da imagem (foto) aproximadamente no centro de projeção.
- b) Ajuste da distância focal: consiste em colocar os projetores do restituidor na mesma distância focal calibrada (" c ") da câmera aerofotogramétrica utilizada.
- c) Iluminar os porta-placas: consiste em iluminar os porta-placas que contêm os diapositivos das fotos; completando assim a reconstrução dos raios luminosos.

2.7.1.2. Metodologia Analítica

A metodologia **analítica** para a obtenção da orientação interior seria transformar o sistema de coordenadas da foto, lidas no restituidor, para o sistema de coordenadas da foto, fornecidas pela calibração da câmera (Figura 2-12).

Figura 2-12: Elementos de orientação interna

A transformação adotada nesse caso seria uma Transformação Afim Isogonal (Transformação Conforme) Bidimensional, expressa por Eq. 2-1.

$$\begin{aligned} \text{Eq. 2-1} \quad x' &= \tau_x + \kappa \cdot m_{11} \cdot \varepsilon' - \kappa \cdot m_{21} \cdot \eta' \\ y' &= \tau_y + \kappa \cdot m_{12} \cdot \varepsilon' + \kappa \cdot m_{22} \cdot \eta' \end{aligned}$$

onde:

x', y' = coordenadas da foto calibradas

ε', η' = coordenadas lidas no comparador

τ_x, τ_y = fatores de translação

κ = fator de escala

$m_{11} = \cos \alpha$

$m_{12} = \sin \alpha$

$m_{13} = -\sin \alpha$

$m_{14} = \cos \alpha$

α = ângulo de rotação

Pode-se escrever a mesma equação na forma vetorial (Eq. 2-2).

$$\text{Eq. 2-2} \quad x' = \tau + \kappa \cdot M_{\alpha}^T \cdot \varepsilon'$$

onde:

$$x' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \text{ Vetor das Coordenadas da Foto Calibrada}$$

$$\tau = \begin{pmatrix} \tau_x \\ \tau_y \end{pmatrix} \text{ Vetor de Translaç \~ao}$$

$$M_\alpha = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \text{ Matriz de Rotaç \~ao Bidimensional (Matriz Ortogonal)}$$

κ = Fator de Escala

$$\varepsilon' = \begin{pmatrix} \varepsilon' \\ \eta' \end{pmatrix} \text{ Vetor das Coordenadas da Foto obtidas no Restituidor}$$

De maneira similar as mesmas equações são obtidas para a foto esquerda (x'', y'' e ε'', η'').

Nessa transformação deseja-se calcular os parâmetros de orientação interna (τ_x , τ_y , α e κ), para poder transformar as coordenadas (ε', η') lidas no restituidor, nas coordenadas calibradas (x', y') da foto.

Para solucionar esse sistema de quatro incógnitas (τ_x , τ_y , α e κ), há a necessidade de dois pontos de coordenadas conhecidas nos dois sistemas (cada ponto fornece duas equações); esses pontos de coordenadas conhecidas são as marcas fiduciais.

As coordenadas desses pontos são obtidas medindo-as no restituidor e as coordenadas da câmera são fornecidas pelo seu certificado de calibração. Temos, portanto, quatro pontos conhecidos que fornecerão oito equações para quatro incógnitas; como o número de equações é superior ao de incógnitas, esse de sistema equações é então ajustado pelo Método dos Mínimos Quadrados.

2.7.2. Orientação Relativa

A orientação relativa, é assim denominada porque estabelece a posição **relativa** entre as fotos, isto é, faz com que os raios luminosos dos pontos homólogos se encontrem num único ponto, eliminando dessa maneira a

paralaxe em x e y desses pontos. O conjunto de todos esses pontos de intersecção dos raios luminosos dos pontos homólogos é denominado de **modelo estereoscópico**, portanto, essa operação cria um **modelo tridimensional da superfície fotografada**.

A orientação relativa é *responsável* pelos valores das *coordenadas do modelo* (x, y, z) e seus **parâmetros de orientação** são: $\omega', \phi', \kappa', by', bz'$ ou $\omega'', \phi'', \kappa'', by'', bz''$ ou combinações.

Para compreender melhor o processo de orientação relativa faz-se necessário descrever os movimentos que a câmera aérea sofre no espaço. Temos dois tipos de movimentos, os **movimentos angulares** e os **movimentos lineares**, que serão descritos a seguir (vide Figura 2-11).

a) Movimentos lineares:

Deslocamento " b_x "- este movimento introduz uma paralaxe b_x de igual valor em todos os pontos da imagem; é um movimento longitudinal à linha de vôo. É provocado pela alteração da velocidade de vôo do avião.

Deslocamento " b_y "- este movimento introduz uma paralaxe b_y de igual valor em todos os pontos da imagem; é um movimento transversal à linha de vôo. É provocado pelo desvio da aeronave de sua linha de vôo.

Deslocamento " b_z "- este movimento amplia ou reduz as fotos. É um movimento gerado pela variação da altura de vôo da aeronave.

b) Movimentos angulares:

Rotação " ω "- giro em torno do eixo x da câmara. É provocado devido à *inclinação* ("tilt"), isto é, uma oscilação da aeronave no sentido longitudinal de sua linha de vôo.

Rotação " ϕ "- giro em torno do eixo y da câmara. É provocado devido ao *desvio* ("crab"), isto é, uma oscilação da aeronave no sentido transversal de sua linha de vôo.

Rotação " κ "- giro em torno do eixo z (vertical) da câmara. É provocado devido a *deriva* ("drift"), isto é, o desvio da aeronave de sua linha de vôo.

2.7.2.1. Metodologia Analógica

O **processo analógico** adotado para essa orientação foi proposto por Otto von Gruber, que se baseou num postulado da Geometria Projetiva, que assegura:

"Se cinco raios de um plano se interceptam, todos os raios desse plano se interceptam".

Von Gruber propôs a eliminação da paralaxe em cinco pontos, mais um de conferência, dando assim um total de seis pontos, conhecidos como pontos standart ou **pontos de von Gruber**.

Os pontos de von Gruber situam-se de acordo com o ilustrado na Figura 2-13, sendo que os pontos 1 e 2 correspondem aos pontos principais das duas fotos do estereopar (a distância entre 1 e 2 é a **fotobase - b**). Os pontos 3 e 4, assim como os pontos 5 e 6, são escolhidos a partir dos pontos 1 e 2, através de uma linha perpendicular à fotobase e as distâncias 3-1, 4-2, 5-1 e 6-2 são aproximadamente iguais a fotobase.

Figura 2-13: Pontos de von Gruber

Em cada ponto de von Gruber, temos uma paralaxe em x (p_x) e em y (p_y). A paralaxe em x é facilmente eliminada quando aproximamos ou afastamos os projetores (db_z) ou introduzindo um db_x (altera somente p_x e não p_y). Porém para eliminar a paralaxe em y é mais difícil e para tanto utiliza-se os movimentos de rotação e translação descritos anteriormente.

Os movimentos ω , ϕ , κ , b_y e b_z , induzem paralaxe em y . Existem restituidores analógicos que somente permitem realizar rotações (ω , ϕ , κ), já os chamados restituidores universais permitem realizar tanto rotações como translações (ω , ϕ , κ , b_y e b_z).

Portanto, dependendo do modelo de restituidor utilizado, esse método pode ser realizado de duas maneiras diferentes. A primeira maneira é movimentar ambos os projetores do restituidor (realiza-se somente rotações) e a outra é

manter um projetor fixo e movimentar o outro (realiza-se tanto rotações como translações). A seguir as duas opções são descritas passo a passo.

a) Movimentando-se ambos os projetores:

1. Elimina-se p_y no ponto 1 girando um ângulo κ'' na foto 2 (foto da direita);
2. Elimina-se p_y no ponto 2 com κ' ;
3. Elimina-se p_y no ponto 3 com ϕ'' ;
4. Elimina-se p_y no ponto 4 com ϕ' ;
5. Elimina-se p_y no ponto 5 com ω' ou ω'' ;
6. O ponto 6 serve para verificação, caso este esteja com uma paralaxe residual acentuada, faz-se uma super-correção com um valor " k ", dado pela Eq. 2-3.

$$\text{Eq. 2-3} \quad k = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{c^2}{d^2} - 1 \right)$$

onde:

c - é a distância focal calibrada do ponto 5 no sistema de ordenadas;

d - é a distância topográfica sobre o eixo y do ponto 5 em relação ao eixo x que passa pelo centro da foto.

Normalmente considera-se o valor de k igual a 0,5. Após esta super-correção reinicia-se novamente a operação até eliminar a paralaxe residual em 6.

b) Movimentando-se somente um projetor:

1. Elimina-se p_y no ponto 1 b_y'' ;
2. Elimina-se p_y no ponto 2 com κ'' ;
3. Elimina-se p_y no ponto 3 com b_z'' ;
4. Elimina-se p_y no ponto 4 com ϕ'' ;
5. Elimina-se p_y no ponto 5 com ω'' ;
6. No ponto 6 faz-se a super-correção, reiniciando a operação até eliminar a paralaxe residual.

2.7.2.2. Metodologia Analítica

O processo **analítico** baseia-se na condição de coplanaridade, isto é, que se no mínimo cinco raios homólogos, bem distribuídos no modelo, se cruzem no espaço (intersecção dos raios luminosos homólogos), todos os demais raios irão se cruzarem. Essa condição é representada pela Figura 2-14.

Figura 2-14: Elementos de orientação relativa para fotos aproximadamente verticais
Fonte: Adaptado de Kraus (1993)

O processo de orientação interna analítica baseia-se numa Transformação Afim Isogonal (Transformação Conforme) Tridimensional, expressa por Eq. 2-4.

$$\begin{aligned}x_1 &= t_{x1} + k \cdot (m_{11} \cdot x' + m_{21} \cdot y' - m_{31} \cdot c) \\y_1 &= t_{y1} + k \cdot (m_{12} \cdot x' + m_{22} \cdot y' - m_{32} \cdot c) \\z_1 &= t_{z1} + k \cdot (m_{13} \cdot x' + m_{23} \cdot y' - m_{33} \cdot c)\end{aligned}$$

Eq. 2-4

$$\begin{aligned}x_2 &= t_{x2} + k \cdot (m_{11} \cdot x'' + m_{21} \cdot y'' - m_{31} \cdot c) \\y_2 &= t_{y2} + k \cdot (m_{12} \cdot x'' + m_{22} \cdot y'' - m_{32} \cdot c) \\z_2 &= t_{z2} + k \cdot (m_{13} \cdot x'' + m_{23} \cdot y'' - m_{33} \cdot c)\end{aligned}$$

onde:

x_1, y_1, z_1 = coordenadas do modelo relativas a foto 1

x_2, y_2, z_2 = coordenadas do modelo relativas a foto 2

x', y' = coordenadas da foto 1

x'', y'' = coordenadas da foto 2

c = distância focal calibrada

t_{x1}, t_{y1}, t_{z1} = fatores de translação da foto 1

t_{x2}, t_{y2}, t_{z2} = fatores de translação da foto 2

k = fator de escala

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

$m_{12} = -\cos \phi \cdot \sin \kappa$

$m_{13} = \sin \phi$

$m_{21} = \cos \omega \cdot \cos \kappa + \sin \omega \cdot \sin \phi \cdot \sin \kappa$

$m_{22} = \cos \omega \cdot \sin \kappa - \sin \omega \cdot \sin \phi \cdot \cos \kappa$

$m_{23} = -\sin \omega \cdot \cos \phi$

$m_{31} = \sin \omega \cdot \cos \kappa - \cos \omega \cdot \sin \phi \cdot \sin \kappa$

$m_{32} = \sin \phi \cdot \sin \kappa + \cos \omega \cdot \sin \phi \cdot \cos \kappa$

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

ω', ϕ', κ' = ângulos de rotação da foto 1

$\omega'', \phi'', \kappa''$ = ângulos de rotação da foto 2

Dividindo x e y por z , obtemos Eq. 2-5.

$$x_1 = t_{x1} + (z_1 - t_{z1}) \cdot \left(\frac{m_{11} \cdot x' + m_{21} \cdot y' - m_{31} \cdot c}{m_{13} \cdot x' + m_{23} \cdot y' - m_{33} \cdot c} \right)$$

$$y_1 = t_{y1} + (z_1 - t_{z1}) \cdot \left(\frac{m_{12} \cdot x' + m_{22} \cdot y' - m_{32} \cdot c}{m_{13} \cdot x' + m_{23} \cdot y' - m_{33} \cdot c} \right)$$

Eq. 2-5

$$x_2 = t_{x2} + (z_2 - t_{z2}) \cdot \left(\frac{m_{11} \cdot x' + m_{21} \cdot y' - m_{31} \cdot c}{m_{13} \cdot x' + m_{23} \cdot y' - m_{33} \cdot c} \right)$$

$$y_2 = t_{y2} + (z_2 - t_{z2}) \cdot \left(\frac{m_{12} \cdot x' + m_{22} \cdot y' - m_{32} \cdot c}{m_{13} \cdot x' + m_{23} \cdot y' - m_{33} \cdot c} \right)$$

Supondo um arco α pequeno (≈ 0), podemos aproximar $\cos(\alpha) \approx 1$ e $\sin(\alpha) \approx \alpha$ dessa maneira, considerando que as rotações ω , ϕ e κ sejam pequenas, obtemos uma matriz de rotação simplificada (Eq. 2-6).

$$dM_{\omega, \phi, \kappa} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix}$$

onde:

$$\begin{aligned} m_{11} &= 1 \\ m_{12} &= -d\kappa \\ m_{13} &= d\phi \\ m_{21} &= d\kappa \\ m_{22} &= 1 \\ m_{23} &= -d\omega \\ m_{31} &= -d\phi \\ m_{32} &= d\omega \\ m_{33} &= 1 \end{aligned}$$

Eq. 2-6

Observando a Figura 2-14, obtemos Eq. 2-7.

$$\begin{aligned} \omega' &= d\omega'; \quad \omega'' = d\omega'' \\ \phi' &= d\phi'; \quad \phi'' = d\phi'' \\ \kappa' &= d\kappa'; \quad \kappa'' = d\kappa'' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x'_0 &= 0; \quad x''_0 = b_x \\ y'_0 &= 0; \quad y''_0 = db_y \\ z'_0 &= 0; \quad z''_0 = db_z \end{aligned}$$

Eq. 2-7

$$\begin{aligned} x_{01} &= 0; \quad x_{02} = bx \\ y_{01} &= 0; \quad y_{02} = db_y \\ z_{01} &= 0; \quad z_{02} = db_z \end{aligned}$$

Temos:

$$\begin{aligned} t_{x1} &= x'_0 - x_{01}; \quad t_{x2} = x''_0 - x_{02} \\ t_{y1} &= y'_0 - y_{01}; \quad t_{y2} = y''_0 - y_{02} \\ t_{z1} &= z'_0 - z_{01}; \quad t_{z2} = z''_0 - z_{02} \end{aligned}$$

Eq. 2-8

Substituindo Eq. 2-7 em Eq. 2-8, obtemos Eq. 2-9.

$$\begin{aligned}t_{x1} &= 0; \quad t_{x2} = b_x \\t_{y1} &= 0; \quad t_{y2} = db_y \\t_{z1} &= 0; \quad t_{z2} = db_z\end{aligned}$$

Eq. 2-9

*Fazendo: $z_1 = z_2 = z$ (modelo tridimensional)**Temos: $t_{z1} = h + z$* *Finalmente obtemos: $z = -h$*

Substituindo Eq. 2-6 e Eq. 2-9 em Eq. 2-5, obtemos Eq. 2-10.

$$\begin{aligned}x_1 &= (-h) \cdot \left(\frac{x' - (y') \cdot d\kappa' - (c) \cdot d\phi'}{(-x') \cdot d\phi' + (y') \cdot d\omega' - c} \right) \\y_1 &= (-h) \cdot \left(\frac{(x') \cdot d\kappa' + y' + (c) \cdot d\omega'}{(-x') \cdot d\phi' + (y') \cdot d\omega' - c} \right)\end{aligned}$$

Eq. 2-10

$$\begin{aligned}x_2 &= b_x + (-h - bz) \cdot \left(\frac{x'' - (y'') \cdot d\kappa'' - (c) \cdot d\phi''}{(-x'') \cdot d\phi'' + (y'') \cdot d\omega'' - c} \right) \\y_2 &= db_y + (-h - bz) \cdot \left(\frac{(x'') \cdot d\kappa'' + y'' + (c) \cdot d\omega''}{(-x'') \cdot d\phi'' + (y'') \cdot d\omega'' - c} \right)\end{aligned}$$

Dividindo-se Eq. 2-10 por $-c$, obtemos-se Eq. 2-11.

Eq. 2-11

$$x_1 = (-h) \cdot \left(\frac{-\frac{x'}{c} + \left(\frac{y'}{c}\right) \cdot d\kappa' + d\phi'}{1 + \left(\frac{x'}{c}\right) \cdot d\phi' - \left(\frac{y'}{c}\right) \cdot d\omega'} \right)$$

$$y_1 = (-h) \cdot \left(\frac{\left(-\frac{x'}{c}\right) \cdot d\kappa' - \frac{y'}{c} - d\omega'}{1 + \left(\frac{x'}{c}\right) \cdot d\phi' - \left(\frac{y'}{c}\right) \cdot d\omega'} \right)$$

$$x_2 = b_x + (-h - bz) \cdot \left(\frac{-\frac{x''}{c} + \left(\frac{y''}{c}\right) \cdot d\kappa'' + d\phi''}{1 + \left(\frac{x''}{c}\right) \cdot d\phi'' - \left(\frac{y''}{c}\right) \cdot d\omega''} \right)$$

$$y_2 = db_y + (-h - bz) \cdot \left(\frac{\left(-\frac{x''}{c}\right) \cdot d\kappa'' - \frac{y''}{c} - d\omega''}{1 + \left(\frac{x''}{c}\right) \cdot d\phi'' - \left(\frac{y''}{c}\right) \cdot d\omega''} \right)$$

Expandindo Eq. 2-11 em séries de potências $1/(1+x) = 1 - x + x^2 - x^3 + \dots + (-1)^n \cdot x^n$ e desprezando os termos de ordem maior ou igual a dois, obtemos Eq. 2-12.

Eq. 2-12

$$x_1 = (-h) \cdot \left[-\frac{x'}{c} + \left(\frac{x'^2}{c^2}\right) \cdot d\phi' - + \left(\frac{x'y'}{c^2}\right) \cdot d\omega' + \left(\frac{y'}{c}\right) \cdot d\kappa' + d\phi' \right]$$

$$y_1 = (-h) \cdot \left[-\frac{y'}{c} - \left(\frac{y'^2}{c^2}\right) \cdot d\omega' + \left(\frac{x'y'}{c^2}\right) \cdot d\phi' + \left(\frac{x'}{c}\right) \cdot d\kappa' - d\omega' \right]$$

$$x_2 = b_x + (-h - db_z) \cdot \left[-\frac{x''}{c} + \left(\frac{x''^2}{c^2}\right) \cdot d\phi'' - + \left(\frac{x''y''}{c^2}\right) \cdot d\omega'' + \left(\frac{y''}{c}\right) \cdot d\kappa'' + d\phi'' \right]$$

$$y_2 = db_y + (-h - db_z) \cdot \left[-\frac{y''}{c} - \left(\frac{y''^2}{c^2}\right) \cdot d\omega'' + \left(\frac{x''y''}{c^2}\right) \cdot d\phi'' + \left(\frac{x''}{c}\right) \cdot d\kappa'' - d\omega'' \right]$$

Simplificando Eq. 2-12, obtemos Eq. 2-13.

Eq. 2-13

$$x_I = h \cdot \left[\frac{x'}{c} - \left(1 + \frac{x'^2}{c^2} \right) \cdot d\phi' + \left(\frac{x'y'}{c^2} \right) \cdot d\omega' - \left(\frac{y'}{c} \right) \cdot d\kappa' \right]$$

$$y_I = h \cdot \left[\frac{y'}{c} - \left(\frac{x'y'}{c^2} \right) \cdot d\phi' + \left(1 + \frac{y'^2}{c^2} \right) \cdot d\omega' - \left(\frac{x'}{c} \right) \cdot d\kappa' \right]$$

$$x_2 = b_x + (h + db_z) \cdot \left[\frac{x''}{c} - \left(1 + \frac{x''^2}{c^2} \right) \cdot d\phi'' + \left(\frac{x''y''}{c^2} \right) \cdot d\omega'' - \left(\frac{y''}{c} \right) \cdot d\kappa'' \right]$$

$$y_2 = db_y + (h + db_z) \cdot \left[\frac{y''}{c} - \left(\frac{x''y''}{c^2} \right) \cdot d\phi'' + \left(1 + \frac{y''^2}{c^2} \right) \cdot d\omega'' + \left(\frac{x''}{c} \right) \cdot d\kappa'' \right]$$

A condição de colinearidade é atingida quando $y_1 = y_2$, portanto, temos:

$$h \cdot \left[\frac{y'}{c} - \left(\frac{x'y'}{c^2} \right) \cdot d\phi' + \left(1 + \frac{y'^2}{c^2} \right) \cdot d\omega' - \left(\frac{x'}{c} \right) \cdot d\kappa' \right] =$$

Eq. 2-14

$$db_y + (h + db_z) \cdot \left[\frac{y''}{c} - \left(\frac{x''y''}{c^2} \right) \cdot d\phi'' + \left(1 + \frac{y''^2}{c^2} \right) \cdot d\omega'' + \left(\frac{x''}{c} \right) \cdot d\kappa'' \right]$$

Nesses condições a paralaxe em y é igual a zero, $p_y = 0$. Como $p_y = y_2 - y_1$, obtemos Eq. 2-15.

$$p_y = \left(\frac{c}{h} \right) \cdot db_y + \left(\frac{y''}{h} \right) \cdot db_z + \left(\frac{x'y'}{c} \right) \cdot d\phi' - \left(c + \frac{y'^2}{h} \right) \cdot d\omega' -$$

Eq. 2-15

$$-(x') \cdot d\kappa' - \left(\frac{x''y''}{c} \right) \cdot d\phi'' + \left(c + \frac{y''^2}{c} \right) \cdot d\omega'' + (x'') \cdot d\kappa''$$

Como observamos pela Eq. 2-15, temos oito incógnitas. Como cada ponto fornece uma equação, necessitar-se-ia de oito pontos, porém, como já foi visto, cinco pontos são suficientes. Dessa forma, podemos realizar os cálculos analíticos de duas maneiras:

a) Calcular as paralaxes somente por rotações (os dois projetores "giram"):

Como:

$$db_y = db_z = d\omega' = 0$$

A Eq. 2-15 ficará na forma da Eq. 2-16.

$$\text{Eq. 2-16} \quad p_y = \left(\frac{x'y'}{c} \right) d\phi' - (x') \cdot d\kappa' - \left(\frac{x''y''}{c} \right) d\phi'' + \left(c + \frac{y''^2}{c} \right) d\omega'' + (x'') \cdot d\kappa''$$

b) Calcular as paralaxes por rotações e translações (um projetor fica "fixo" e o outro "gira"):

Como:

$$d\omega' = d\phi' = d\kappa' = 0$$

A Eq. 2-15 ficará na forma da Eq. 2-17.

$$\text{Eq. 2-17} \quad p_y = \left(\frac{c}{h} \right) db_y + \left(\frac{y''}{h} \right) db_z - \left(\frac{x''y''}{c} \right) d\phi'' + \left(c + \frac{y''^2}{c} \right) d\omega'' + (x'') \cdot d\kappa''$$

Dessa maneira mede-se a paralaxe no mínimo em cinco pontos, obtêm-se os elementos de orientação relativa e finalmente calcula-se as coordenadas (x , y , z) do modelo através de Eq. 2-18 ou Eq. 2-19.

$$\begin{aligned} \text{Eq. 2-18} \quad x &= k \cdot (m_{11} \cdot x' + m_{21} \cdot y' - m_{31} \cdot c) \\ y &= k \cdot (m_{12} \cdot x' + m_{22} \cdot y' - m_{32} \cdot c) \\ z &= k \cdot (m_{13} \cdot x' + m_{23} \cdot y' - m_{33} \cdot c) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Eq. 2-19} \quad x &= b_x + k \cdot (m_{11} \cdot x'' + m_{21} \cdot y'' - m_{31} \cdot c) \\ y &= b_y + k \cdot (m_{12} \cdot x'' + m_{22} \cdot y'' - m_{32} \cdot c) \\ z &= b_z + k \cdot (m_{13} \cdot x'' + m_{23} \cdot y'' - m_{33} \cdot c) \end{aligned}$$

onde m_{ij} são os elementos da Matriz de Rotação Tridimensional (Eq. 2-4) e k é o fator de escala calculado através de Eq. 2-20.

$$k = \frac{h}{c}$$

Eq 2-20

onde:

 h = altura de projeção c = distância focal calibrada

Vetorialmente, obtemos:

Eq. 2-21

$$x = k \cdot M_{\omega, \phi, \kappa}^T \cdot x'$$

Eq. 2-22

$$x = b + k \cdot M_{\omega, \phi, \kappa}^T \cdot x''$$

onde:

$$x = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \text{ Vetor das Coordenadas do Terreno}$$

$$b = \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} \text{ Vetor de Translação}$$

$$M_{\omega, \phi, \kappa} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \text{ Matriz de Rotação Tridimensional (Matriz Ortogonal)}$$

 k = Fator de Escala

$$x' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \text{ Vetor das Coordenadas da Foto 1}$$

$$x'' = \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} \text{ Vetor das Coordenadas da Foto 2}$$

No caso de medir a paralaxe num número de pontos superior a cinco, faz-se então um ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados.

2.7.3. Orientação Absoluta

Terminada a orientação relativa, está formado o modelo estereoscópico. Resta agora determinar suas dimensões e sua posição a fim de torná-lo

homotético direto à superfície fotografada, isto é, *orientar o modelo em relação a vertical e corrigir a sua escala.*

A orientação absoluta é *responsável* pelas coordenadas do terreno (X, Y, Z) e seus parâmetros de orientação são:

- b) b_x (fator de escala);
- c) Ω (rotação do modelo em torno do eixo x);
- d) Φ (rotação do modelo em torno do eixo y);

2.7.3.1. Metodologia Analógica

A metodologia **analógica** de orientação absoluta pode ser dividida em duas etapas que serão descritas a seguir.

a) Corrigir a escala do modelo:

Corrigir a escala do modelo consiste em colocar este na escala de restituição e é realizada através das seguintes etapas:

- 1- Obtemos a escala do modelo através da relação entre a distância de dois pontos de coordenadas conhecidas e identificadas no terreno e no modelo. É recomendável verificar a escala do modelo em mais de uma distância.
- 2- Ajustamos a escala do modelo na escala que desejamos, afastando ou aproximando os projetores no eixo x .

b) Nivelar o modelo:

O nivelamento consiste em orientar a vertical do modelo em relação a vertical do terreno. Esse nivelamento é obtido girando as duas fotos simultaneamente até que a base do modelo "toque" a horizontal.

Esta operação baseia-se então em calcular os giros Ω e Φ através das seguintes etapas:

1. Ajustar a inclinação transversal do modelo, girando " Ω " geral em torno do eixo X
2. Ajustar a inclinação longitudinal do modelo, girando " Φ " geral em torno do eixo Y

O princípio do nivelamento consiste no cálculo de Ω e Φ a serem introduzidos no restituidor. Estes valores são calculados em função da distância entre os pontos (conhecidas na primeira etapa, pois os pontos

utilizados são os mesmos) e a diferença entre as cotas lidas no instrumento e as altitudes reais dos pontos de controle no terreno.

2.7.3.2. Metodologia Analítica

A metodologia **analítica** para a obtenção da orientação absoluta consiste em transformar o sistema de coordenadas do modelo no sistema de coordenadas do terreno (vide Figura 2-15).

Figura 2-15: Elementos de orientação absoluta

A transformação nesse caso consiste numa Transformação Afim Isogonal (Transformação Conforme) Tridimensional, expressa por Eq. 2-23.

$$\begin{aligned} X &= T_X + K \cdot (m_{11} \cdot x + m_{21} \cdot y + m_{31} \cdot z) \\ Y &= T_Y + K \cdot (m_{12} \cdot x + m_{22} \cdot y + m_{32} \cdot z) \\ Z &= T_Z + K \cdot (m_{13} \cdot x + m_{23} \cdot y + m_{33} \cdot z) \end{aligned}$$

Eq. 2-23

onde:

X, Y, Z = coordenadas do terreno

x, y, z = coordenadas do modelo

T_X, T_Y, T_Z = fatores de translação

K = fator de escala

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

$$m_{12} = \sin \Omega \cdot \sin \Phi \cdot \cos K + \cos \Omega \cdot \sin K$$

$$m_{13} = -\cos \Omega \cdot \sin \Phi \cdot \cos K + \sin \Omega \cdot \sin K$$

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

$$m_{22} = -\sin \Omega \cdot \sin \Phi \cdot \sin K + \cos \Omega \cdot \cos K$$

$$m_{23} = \cos \Omega \cdot \sin \Phi \cdot \sin K + \sin \Omega \cdot \cos K$$

$$m_{31} = \sin \Phi$$

$$m_{32} = -\sin \Omega \cdot \cos \Phi$$

$$m_{33} = \cos \Omega \cdot \cos \Phi$$

Ω, Φ, K = ângulos de rotação

Pode-se escrever a mesma equação na forma vetorial (Eq. 2-24).

$$\text{Eq. 2-24} \quad X = T + K \cdot M_{\Omega, \Phi, K}^T \cdot x$$

onde:

$$X = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \text{ Vetor das Coordenadas do Terreno}$$

$$T = \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix} \text{ Vetor de Translação}$$

$$M_{\Omega, \Phi, K} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \text{ Matriz de Rotação Tridimensional (Matriz Ortogonal)}$$

K = Fator de Escala

$$x = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \text{ Vetor das Coordenadas do Modelo}$$

Deseja-se calcular os parâmetros de orientação absoluta ($T_x, T_y, T_z, \Phi, \Omega, K, K$), para poder transformar as coordenadas (x, y, z) do modelo no sistema de coordenadas (X, Y, Z) do terreno.

Para solucionar esse sistema de sete incógnitas ($T_x, T_y, T_z, \Phi, \Omega, K, K$), temos que ter pontos de controle, isto é, pontos de coordenadas conhecidas no terreno. Temos três tipos de pontos:

1. Pontos de controle planialtimétricos (X, Y, Z conhecidos) - fornecem três equações;
2. Pontos de controle planimétricos (X, Y conhecidos) - fornecem duas equações;
3. Pontos de controle altimétricos (Z conhecido) - fornece uma equação.

Portanto são necessários no mínimo um ponto planialtimétrico e dois planimétricos ($1 \times 3 + 2 \times 2 = 7$) ou três planimétricos e um altimétrico ($2 \times 3 + 1 \times 1 = 7$).

Caso haja um número de pontos de controle superior ao mínimo necessário, o número de equações será então superior ao de incógnitas, nesse caso realiza-se um ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados.

Existe outra metodologia analítica de orientação fotogramétrica, onde a orientação relativa e a orientação absoluta são realizadas simultaneamente. Essa metodologia, assim como a descrita anteriormente estão resumidamente esquematizadas na Figura 2-16.

Figura 2-16: Resumo das etapas de uma restituição analítica

3. FOTOGRAMETRIA DIGITAL

3.1. INTRODUÇÃO

O processo de restituição fotogramétrica na fotogrametria digital é analítico, porém, conforme já citado anteriormente, difere da fotogrametria analítica pelo fato de utilizar imagens numéricas ou digitais no lugar de imagens fotográficas.

Esse fato é muito importante, pois muitas vezes ocorre uma certa confusão na diferenciação entre um restituidor digital e um analítico ou mesmo entre um semi-analítico. Esses equipamentos fazem uso de softwares aplicativos, utilizados geralmente para a edição dos mapas gerados; porém esses equipamentos não utilizam imagens numéricas, mas sim imagens fotográficas convencionais.

Na verdade um restituidor verdadeiramente digital deveria, além de fazer uso de imagens numéricas, realizar, de acordo com Ribeiro & Cintra (1991), as seguintes tarefas:

- a) aquisição digital de imagens;
- b) tratamento digital de imagens (correções radiométricas e geométricas, por exemplo);
- c) restituição digital (correlação de imagens e reconhecimento de padrões).

Outra diferença importante é que um restituidor digital realiza outras operações fotogramétricas além da restituição como, por exemplo, aerotriangulação e obtenção de ortofotos digitais. Constituindo-se dessa forma num verdadeiro sistema multi-tarefas, onde todas as tarefas são realizadas via softwares. Temos assim uma estação de trabalho (Workstations) em substituição aos equipamentos ótico-eletromecânicos analíticos. Resumindo, o software substituiu o hardware (Silva, 1994).

O fundamento da fotogrametria digital surgiu na década de 50, porém somente nos anos 80 com o desenvolvimento de numerizadores digitais eficientes a mesma tomou impulso. Comercialmente, nos anos 90 tivemos o lançamento dos primeiros restituidores verdadeiramente digitais.

Nos próximos itens é definida o que vem a ser uma imagem digital, processos de captação de imagens, as operações e componentes de um restituidor digital, assim como as suas vantagens e desvantagens e finalmente uma breve descrição dos modelos existentes no mercado.

3.2. CAPTAÇÃO DE IMAGENS

A luz ao incidir sobre qualquer superfície é refletida, o que permite a sua visualização pelo mecanismo de visão biológico. No caso do homem, seu sensor de visão é constituído de cones e bastonetes situados na retina do globo ocular. Esses sensores são sensíveis ao espectro de luz visível dentro do espectro eletromagnético.

Uma câmera fotográfica pode ser comparada ao olho humano, onde seu sistema de lentes é equivalente ao cristalino, o diafragma à íris e os filtros à córnea. A emulsão fotográfica (superfície fotosensível) equivaleria à retina, sendo que os grânulos da emulsão seriam os cones e bastonetes (sensores).

O diâmetro dos cones e bastonetes do olho humano variam na faixa de 2 a 5,5 μm e a resolução angular é de cerca de 20". Na Fig. 3-1 encontramos um diagrama de um olho humano comparado a uma câmera fotográfica

Figura 3-1: Comparação entre um olho humano e uma câmera
 Fonte: Paredes (1980).

No processo de visão humana temos mecanismos de processamento de imagens, isto é, a luz é recebida nos sensores e posteriormente transformada em sinais elétricos enviados ao cérebro pelo sistema nervoso, onde a imagem é então gerada e interpretada. Nesse caso o sistema de visão humana aproxima-se dos modernos sistemas digitais de captação e processamento de imagens, onde também sinais elétricos são convertidos em imagens e também processados; porém, para tanto, esses sinais elétricos são numerizados para que possam ser manipulados via softwares através de computadores. A todo esse processo é dado o nome de visão robótica ou computacional.

Até aproximadamente o início da década de 80, o processo de captação de imagens na fotogrametria constituía-se somente na **tomada da fotografia** via câmeras métricas específicas e o seu respectivo processamento (revelação da emulsão fotográfica). A partir da década de 90, com o advento da fotogrametria digital, esse processo de captação de imagem passou a ter mais uma etapa, a **numerização** dessa imagem (geralmente um Diapositivo) e o seu respectivo processamento, que constitui na aplicação de técnicas específicas de tratamento de imagens a fim de preparar a mesma para o processo de restituição fotogramétrica.

A Fig. 3-2 representa o processo de captação e tratamento da imagem na fotogrametria digital.

Figura 3-2: Processo de captação e tratamento de imagens na fotogrametria digital

3.3. IMAGENS FOTOGRÁFICAS

3.3.1. Emulsões Fotográficas e Resolução

Uma câmera aerofotogramétrica é constituída de um sensor que registra as informações luminosas num filme fotográfico. Esse filme é composto de uma base feita de material resistente, estável e flexível; a base mais utilizada é a de polietileno. Essa base é recoberta por uma emulsão fotossensível, fixada por um material adesivo (gelatina). A composição dessa emulsão é de grânulos de brometo de prata e uma pequena porcentagem de iodeto de prata.

A fotossensibilidade da emulsão, de acordo com o seu uso, pode abranger diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético:

- a) emulsão pancromáticas (branco e preto - é a emulsão mais utilizada);
- b) emulsão ortocromática (ultravioleta, azul e verde);
- c) emulsão infravermelha (são soluções pancromáticas recobertas com uma camada de vapor de Hg, que permite a captação da faixa do infravermelho);
- d) emulsão colorida (três camadas sensíveis, azul, verde e vermelha).
- e) emulsão infravermelha colorida.

A resolução de uma fotografia aérea abrange a combinação lente, filme e filtro. A resolução pode ser expressa por número de linhas duplas por milímetros ($R_L = L/\text{mm}$ ou lpmm), isto é, se uma fotografia possui 200 L/mm, significa que podem ser contadas 200 linhas pretas, separadas por 200 linhas brancas no espaço de um milímetro.

A determinação da resolução é realizada fotografando-se desenhos de resolução conhecida e através de um microscópio conta-se o número de linhas. Geralmente essa contagem é realizada em áreas circulares concêntricas da foto, determinadas pelo ângulo de abertura τ . A resolução é uma média ponderada dos valores obtidos em cada área (como ilustra a Tab. 3-1).

Tabela 3-1: Determinação experimental da resolução de uma câmera métrica

$\tau (^{\circ})$	Área amostrada - A (mm ²)	R_L (L/mm)
0	230	93
5	730	85
10	1280	75
15	1660	75
20	1990	75
25	2420	71
30	1640	63
35	580	53
$\Sigma A = 10.530$		$\Sigma(A \cdot R_L) = 759.070$
$R_{L\text{médio}} = (\Sigma(A \cdot R_L) / \Sigma A) = 72 \text{ L/mm}$		

Fonte: Kraus (1993)

Pode-se determinar também uma resolução máxima teórica através da Eq. 3-1.

$$\text{Eq. 3-1} \quad R_{L\text{max}} [L / mm] = \frac{1000 [\mu m / mm]}{\delta [\mu m]}$$

onde:

$$\delta [\mu m] = \frac{k}{2}$$

$$k = \frac{f}{d}$$

O valor de δ é a menor distância entre dois elementos que permite enxergar dois pontos distintos. O valor de k é obtido dividindo-se a distância focal (f) da câmera pelo diâmetro da lente (d).

A resolução pode também ser expressa de forma angular (R_{α}) através da Eq. 3-2.

$$\text{Eq. 3-2} \quad R_{\alpha} ["] = \left(\frac{\cos^2 \tau}{R_L [L / mm]} \right) \cdot \rho''$$

onde:

τ = ângulo de abertura;

R_L = resolução linear;

ρ'' = 202665 (fator de conversão radianos para segundos)

Como já foi citado anteriormente, a resolução de uma imagem fotográfica é determinada pela combinação do filme, filtro e lente. No caso da emulsão fotográfica, quanto menor a sua granulação maior o seu poder resolutivo e menor a sua sensibilidade, isto é, exige maior tempo de exposição, o que não é desejável na aerofotogrametria, já que um tempo maior de exposição irá proporcionar maior arraste na imagem (consequentemente maiores deformações), pois a foto é tirada em movimento. A granulação das emulsões variam de 0,5 a 2,0 μm , indo até 5,0 μm no máximo.

Possuindo a R_L de uma imagem, pode-se determinar o tamanho de seu menor elemento ("pixel" - p) através da Eq. 3-3.

$$\text{Eq. 3-3} \quad p[\mu\text{m}] = \frac{1000[\mu\text{m} / \text{mm}]}{2.(R_L[L / \text{mm}])}$$

Na Tab. 3-2, encontramos a resolução de diversas emulsões fotográficas utilizadas na fotogrametria.

Tabela 3-2: Emulsões utilizadas na fotogrametria

Fabricante	Produto	Tipo	R_L (L/mm) (contraste 1000:1)
AgfaGevaert	Aviphot Pan 150	Pan +	143
AgfaGevaert	Aviphot Pan 200	Pan +	100
Kodak	Plus-X-Aerographic 2402	Pan +	160
Kodak	Panatomic-X- Aerographic II 2412	Pan +	400
Kodak	High Definition Aerial 3414	Pan +	800
Kodak	Infrared Aerographic 2424	Infra-Ver.	80
Kodak	Aerocolor Negative 2445	Cor Neg.	80
Kodak	Aerochrome MS 2448	Cor Pos.	80
Kodak	Aerochrome Infrared 2443	Cor Infra-Ver. Pos.	63

Fonte: Adaptado Kraus (1993)

O processamento de uma emulsão fotográfica compreende quatro banhos diferentes, o revelador, o neutralizador ou paralisador, o fixador e a lavagem. Todas essas operações devem ser realizadas meticulosamente, pois os filmes, quando submetidos a variações de umidade e temperatura, podem sofrer deformações que posteriormente provocarão distorções na imagem.

3.3.2. Câmeras Aerofotogramétricas

As câmeras utilizadas na aerofotogrametria são denominadas de **câmeras métricas**. Uma câmera métrica é aquela que obrigatoriamente possui as seguintes propriedades:

- a) distância focal calibrada;
- b) imprime no original fotográfico as "marcas fiduciais", que permitem o estabelecimento de um sistema de coordenadas na fotografia.

Essas duas propriedades são indispensáveis para a realização da orientação interna, descrita anteriormente.

Uma câmera aérea é composta pelas seguintes partes (conforme ilustra a Fig. 3-3):

- a) cone (contém a objetiva, obturador, diafragma e cone interno);
- b) corpo da câmera (inclui o sistema de funcionamento);
- c) magazine (depósito do filme fotográfico);
- d) acessórios (inclui sistema de suspensão, controle da câmera, instrumentos auxiliares, objetivas de observação, etc.).

Figura 3-3: Componentes de uma câmera aerofotogramétrica
Fonte: Kraus (1993)

Atualmente as câmeras aerofotogramétricas constituem num conjunto de equipamentos eletrônicos que não só realizam a captação da imagem, mas também auxiliam no planejamento e controle de voo aerofotogramétrico.

Por exemplo podemos citar o sistema de fotografia aérea Wild RC-30, ilustrado na Fig. 3-4.

Figura 3-5: Esquema de funcionamento do sistema aerofotogramétrico RC-30
Fonte: Ficha Técnica Wild RC-30

Como observamos na Fig. 3-4, o sistema RC-30 é bastante sofisticado. Esse sistema possui o módulo ASCOT (Aerial Survey Control Tool), assistido pelo sistema GPS, o qual comunica, em tempo real, o posicionamento do avião para o piloto e para o operador da câmera; também auxilia no planejamento do voo aerofotogramétrico e realiza a retificação automática da deriva (desvio da rota de voo). Esse sistema realiza a transformação automática do

sistema de coordenadas WGS-84 utilizado pelo GPS para o sistema de coordenada local. Na Fig. 3-5 encontramos a ilustração da câmera aerofotogramétrica RC-30.

Figura 3-5: Câmera aerofotogramétrica RC-30 (WILD)

A interface EDI, estabelece a comunicação entre o sistema ASCOT e a câmera aérea. Graças ao um sistema de diodos luminosos permite o registro dos dados na película fotográfica.

O sistema PEM é o controlador automático do tempo de exposição da emulsão fotográfica, permitindo dessa maneira tempos curtos de exposição com abertura ótima.

Na Tab. 3-3 encontramos todos os tipos de dados gravados em uma película fotográfica produzida pela câmera RC-30.

Tabela 3-3: Informações impressas na aerofoto produzida pela câmara RC-30 (WILD)

Câmera	Posicionamento	Vôo
Abertura do Diafragma	Altitude	Escala do mapa
Tempo de exposição	Longitude	Hora
Contador de imagens	Latitude	Região
N.º de série da câmara		Faixa de vôo
Tipo de filtro		Tripulação
Tipo de emulsão		Companhia de vôo
Marcas Fiduciais		N.º do contrato
		Cliente

3.4. IMAGENS DIGITAIS

3.4.1. Definição

Uma imagem digital consiste numa matriz G bi-dimensional com $i \times j$ elementos g_{ij} . Cada elemento é denominado de "elemento de imagem" ou "pixel" (picture element). Nessa matriz G as linhas têm o índice i , indo de 1 a I linhas, isto é, $i=1(1)I$. Para colunas temos o índice j , indo de 1 a J colunas, $j=1(1)J$. Cada elemento da matriz recobre uma área de $\Delta\xi \times \Delta\eta$ (ver Fig. 3-6).

Figura 3-6: Representação matricial de uma imagem digital
Fonte Kraus (1993)

Cada pixel tem a sua localização definida na matriz que representa a imagem por um sistema de coordenadas (ξ, η) , como indica a Fig. 3-6. Dessa forma o sistema de coordenadas permite a identificação do pixel e na medida do possível essa identificação pode ser automatizada via softwares específicos.

3.4.2. Resolução Espacial de uma Imagem

Entende-se por resolução espacial o número de elementos ("pixels") contidos numa determinada medida linear. Quanto melhor a resolução, maior o número de pixels e consequentemente menor o tamanho dos mesmos.

A resolução espacial pode ser representada por dpi ou dpmm ("dots per inch" ou "dots per millimeter"), traduzindo, ppp ou ppm (pontos por polegada ou pontos por milímetro).

Cada ponto dessa unidade é equivalente a um pixel. Por exemplo, uma imagem de resolução de 300x300 dpi possui um pixel de dimensões iguais a 85x85 μm . É importante ressaltar que a forma do pixel não é necessariamente um quadrado, pode-se ter um pixel retangular quando temos resoluções diferenciadas em x e y ; por exemplo, numa resolução de 1850x2540 dpi, teríamos um pixel de 14x10 μm .

Também temos que quanto melhor a resolução, teremos um maior número de pixels na imagem e consequentemente, uma imagem de maior tamanho em bytes.

3.4.3. Resolução Radiométrica de uma Imagem

A resolução radiométrica refere-se a coloração da imagem, isto é, as cores que cada pixel poderá assumir. Por se tratar de imagens numéricas essa cor se traduz por um determinado número.

Por exemplo, no caso de imagens em preto e branco o pixel pode assumir o valor 0 ou 1, ocupando somente um bit de memória. Nesse caso temos imagens de 1 bit.

No caso de imagens monocromática, cada pixel pode assumir até 256 valores diferentes, numa escala de 0 a 255 níveis de cinza; escala essa bem superior à capacidade do olho humano, que é de 64 níveis (desde que esses níveis estejam localizados um ao lado do outro). O valor de 256 é devido a informação que pode ser armazenada em 8 bits (1 byte), isto é, $2^8 = 256$. Temos nesse caso imagens de 8 bits.

Já no caso de imagens coloridas, teremos uma matriz para cada faixa do espectro eletromagnético abrangido e essas mesmas têm dimensões iguais, formando então, uma imagem em bloco com n camadas. Geralmente uma imagem colorida possui três matrizes, uma para a cor vermelha, outra para a cor azul e outra para a cor verde (sistema RGB). Nesse caso então, cada

elemento corresponderá a 24 bits (3×8), ou 3 bytes, portanto teremos 2^{24} (ou 256^3) = 16.777.216 cores diferentes. Temos nesse caso imagens de 24 bits.

Quanto melhor a resolução radiométrica, mais fiel será a imagem digitalizada em relação a imagem original no tocante a sua coloração, pois terá uma qualidade pictórica melhor.

Porém obviamente, quanto melhor a resolução radiométrica, maior será o tamanho em bytes da imagem obtida, pois cada pixel ocupará um maior número de bits para traduzir essa informação pictórica.

Na Tab. 3-4, encontramos a representação dos valores de um pixel em diferentes sistemas numéricos.

Tabela 3-4: Valores numéricos de um pixel em diferentes sistemas

Decimal	Octaldecimal	Hexadecimal	Binário
0	000	00	00000000
1	001	01	00000001
2	002	02	00000010
.	.	.	.
.	.	.	.
127	177	7F	01111111
128	200	80	10000000
.	.	.	.
.	.	.	.
254	376	FE	11111110
255	377	FF	11111111

Fonte Kraus (1993)

3.4.4. Arquivos de Imagem

As imagens geradas de uma digitalização são arquivos no formato binário, (arquivos do tipo "raster") que podem ser enviados para uma tela, para um arquivo de armazenamento ou para impressão.

Esses arquivos são estruturados basicamente em duas partes:

- Cabeçalho:** armazena informações importantes, como resolução, número total de cores, tamanho e outros dados.
- Mapa de bits ("Bitmaps"):** é a representação binária da cor ou tom de cinza de cada pixel.

Devido ao fato de se poder enviar uma mesma imagem para diferentes saídas, cria-se a possibilidade de se vincular o formato do arquivo com o formato exigido pelo mecanismo de saída.

Dessa maneira, podemos ter arquivos de imagem já adequados para um determinado formato de saída (impressora ou tela), isto é, os dados estão armazenados no formato exato para serem enviados ao equipamento de saída.

Por outro lado, pode-se ter arquivos de imagem que independem do equipamento de saída; nesse caso, o arquivo pode, por exemplo, possuir resolução e cores superiores ao mecanismo de saída, e também, a representação das cores pode independe da forma como o equipamento destino as representa. Nesse caso, a conversão fica a cargo de programas específicos ("drivers").

Um problema com os arquivos de imagem é o seu tamanho. Como as imagens possuem, freqüentemente, grandes áreas com cores ou padrões uniformes, a aplicação de técnicas de compressão diminui acentuadamente o tamanho dos arquivos. Existem duas formas de compressão:

- a) Destrutiva: a imagem comprimida não é igual à imagem antes da compressão, perda compensada pela alta taxa de compressão.
- b) Não destrutiva: a imagem comprimida não se altera; aplica-se nesse caso os mesmos métodos utilizados pelos programas compactadores de arquivos como ARJ, PKZIP, etc..

Os principais tipos de arquivos gerados no processo de digitalização são (Madeira et al., 1995):

- a) **.BMP** ("Bitmaps" - Mapa de Bits) - tipo de arquivo muito utilizado pelo Windows, armazena os dados em mapas de bits, de forma independente do equipamento de saída; possui compressão RLE (Run Length Encoded - Comprimento Codificado), apesar de não ser utilizado atualmente; e trabalha com 16 milhões de cores.
- b) **.PCX** ("PC Paintbrush")- da Zoft Corporation, depende do equipamento de saída, por exemplo, caso a visualização da imagem for feita em uma tela SVGA, o arquivo é gerado para essa tela, inclusive trabalha com o número de cores que o equipamento de saída permite, até 256 cores na versão 3.0; possui compressão de imagens.
- c) **.TIFF** ("Tagged Image File Format" - Formato de Arquivo Categorizadas) - criado para ser utilizado como intercâmbio de imagens entre programas

e equipamentos (inclusive scanner); possui compressão e trabalha com 16 milhões de cores.

- d) .JPEG ("Joint Photographic Experts Group" - Grupo de Especialistas em Fotografia) - também é independente do equipamento de saída, trabalha com 16 milhões de cores e possui sistema de compressão destrutivo; nesse esquema define-se a qualidade final relativa da imagem (em percentual) e a taxa de compressão é em função disso.
- e) .GIF ("Graphics Interchange Format" - Formato de Intercâmbio de Gráficos) - criado e utilizado pela CompuServe, pode acomodar mais do que uma imagem por arquivo, é independente do equipamento de saída e não possui compressão; de forma diferente de outros formatos, as informações nele contidas não estão vinculadas com posições dentro do arquivo, mas baseadas em blocos descritores, que precedem as imagens.

É importante o conhecimento dos arquivos gerados no processo de captação de imagens numéricas, tanto para uma melhor compreensão das possíveis distorções que possam surgir, assim como também para realizar os processos posteriores de manipulação das mesmas.

3.4.5. Captação de Imagens Digitais

Basicamente, as imagens digitais utilizadas na fotogrametria são captadas por via de:

- a) câmeras digitais;
- b) imageadores ou numerizadores ("scanners");
- c) sensores espaciais (satélites).

Os sensores espaciais abrangem diferentes dispositivos de captação de imagens, que vão desde câmeras fotográficas, câmeras de TV, radares, sistemas laser até os modernos sensores CCD. Os sensores espaciais não serão aqui tratados pois fogem dos objetivos deste trabalho. No caso dos scanners, os mesmos serão mais detalhados em capítulo posterior.

Tanto os scanners, como as câmeras digitais possuem o mesmo tipo de dispositivo, o CCD ("Charge Coupled Devices" - Dispositivo de Acoplamento de Cargas) que é constituído num arranjo de diodos fotosensíveis de auto-varredura, também conhecidos como arranjos de estado sólido, diferentemente das câmeras de TV, baseadas em frágeis tubos de vidro com uma região sensível a luz (vidicons, pumblicons, orthicons etc.).

A diferença principal de uma câmera digital de um scanner encontra-se no sistema ótico, onde o mesmo é projetado para situações diversas, por exemplo, uma câmera é utilizada para captar imagens numa distância superior a do scanner.

Outra diferença importante entre uma câmera digital e um scanner é que enquanto numa câmera a fonte de iluminação é externa tal como numa câmera fotográfica comum, num scanner a fonte de iluminação é interna, isto é, o scanner possui um sistema de iluminação próprio.

Devido a compatibilidade do sistema ótico com o tamanho dos sensores, as câmeras digitais possuem uma resolução inferior a dos scanners, por exemplo, scanners de alta resolução possuem um espaçamento entre seus elementos de cerca de 7 μm , para uma câmera digital esse valor, mesmo com as melhores lentes fotográficas não produzem bom contraste com uma abertura razoável, portanto o espaçamento das câmeras giram em torno de 25 μm , valor esse bem mais compatível com as lentes disponíveis. Na Tab. 3-5 encontramos a resolução e o espaçamento dos elementos para sensores CCD, e outros tipos de arranjos de estado sólido (CCPD, SSPD e CID).

Tabela 3-5: Resolução encontrada em sensores de estado sólido

Tipo de arranjo		CCD	CCPD	SSPD	CID
Linear	N.º de elementos	2048	2048	-	-
	Espaçamento (μm)	15 a 100	13 a 16	-	-
Matricial	N.º de elementos	64x64	488x380	244x188	64x64
	Espaçamento (μm)	75 a 100	30x30	35x60	75 a 100

Fonte: Gonzaga (1994)

Os dispositivos CCD nas câmeras digitais podem ser distribuídos de forma linear ou matricial, de acordo com a utilização. Sua resolução hoje ultrapassa a das câmeras de TV, porém ainda estão muito aquém das câmeras fotográficas. Por exemplo, uma câmera digital CCD standart, pode alcançar uma resolução de cerca de 20 L/mm, resolução essa bem inferior a das imagens fotográficas que podem alcançar em média 100 L/mm (ver Tab. 3-5).

Uma câmera digital CCD atualmente é incapaz de substituir uma câmera aerofotogramétrica, primeiro devido à sua resolução inferior como já foi comentado, depois ao tamanho da imagem produzida, muito pequena (cerca de 25x25 mm) quando comparada a uma imagem fotográfica de 230x230

mm, portanto recobriria uma porção de terreno menor. Também existem problemas quanto a sua estabilidade em plataformas aéreas e finalmente problemas de armazenamento da imagem digital, problema esse que será exposto mais adiante.

Baseado em todos esse fatos é que a fotogrametria digital ainda continua obtendo as imagens básicas via câmeras fotográficas para posteriormente numerizá-las através de scanners de alta resolução.

A câmera digital é utilizada em alguns casos, como por exemplo para captar parte de imagens em alguns restituidores analíticos e comparadores digitais. Esse tipo de operação exige uma grelha calibrada na câmera ou então sistema mecânico de posicionamento da câmera muito preciso para que seja possível unir os fragmentos de imagem captados.

Uma outra aplicação de câmeras digitais, desenvolvida recentemente, é o sistema V-STARS da LEICA, utilizado em mensuração industrial. Esse sistema faz uso das câmeras digitais descritas na Tab. 3-6.

Tabela 3-6: Características técnicas das câmeras digitais utilizadas no sistema V-STARS da LEICA.

Características	V-STARS/E		V-STARS/S & /W	
	Kodak DCS 420 m	Kodak DCS 460 m	Kodak Megaplug 1.4	Kodak Megaplug 4.2
Nº de elementos	1012 x 1524	2036 x 3060	1317 x 1035	2029 x 2044
Tamanho do conjunto de sensores (mm)	9.3 x 14.0	18.4 x 27.6	9.0 x 7.0	18.5 x 18.5
Tamanho do pixel (µm)	9.2	9.0	6.8	9.1

Fonte: Brown & Dold (1995)

3.4.6. Monitores de Saída

A exibição de imagens nos monitores existentes no mercado representa uma outra limitação da fotogrametria digital. Por exemplo, supor uma imagem aerofotogramétrica de 230x230 mm, se cada pixel dessa imagem possuir 7,5x7,5 µm de dimensões, teremos uma imagem de aproximadamente 30.666x30.666 pixels; caso essa imagem fosse exibida numa relação de 1:1 (imagem/monitor) na estação de trabalho DSW-100 da Wild, que adota um monitor de 1024x768 pixels (cada pixel 280x280 µm), seria possível visualizar somente cerca de 3% da imagem total, ampliada 37 vezes! Devido ao tamanho excessivamente grande do pixel do monitor.

Na Tab. 3-7, encontramos a resolução e a amplitude de cores abrangida pelos monitores atuais.

Tabela 3-7: Resolução de monitores de vídeo mais usuais no mercado

Nº de elementos	Nº de Cores	Tamanho do Pixel (μm)
640 x 480	16	280
800 x 600	256	280
1024 x 768	65.000	280
1280 x 1024	16.700.000	280

3.5. RESTITUIDORES DIGITAIS

3.5.2. Configuração Básica

A configuração básica de um restituidor digital de acordo com Silva (1994) abrange:

a) Periféricos de entrada / saída para a interface operador e máquina:

- monitor de computador para a visualização das imagens;
- mesa de desenho ("plotter");
- impressora gráfica;
- sistema para numerização das imagens ("scanner");
- sistema ótico para a visão estereoscópica;
- sistema para a movimentação das imagens e da marca-índice.

b) Hardware para o controle do sistema:

- unidade central composta de um computador e de processadores periféricos do tipo "array processor" ou "transputers";
- unidades de armazenamento das informações (disco rígido, fitas magnéticas ou discos óticos).

c) Softwares aplicativos:

- módulos para a aquisição das imagens;
- módulos para a orientação do modelo;
- módulos para aquisição de dados;
- módulos para a manipulação e edição dos dados;
- aplicativos periféricos.

Como foi anteriormente citado, tivemos a substituição dos equipamentos ótico-eletromecânicos de alta precisão dos restituidores analíticos por uma estação de trabalho multi-tarefa ("Workstation"), onde todas as operações são realizadas via softwares. A Fig. 3-7 representa esquematicamente um restituidor digital.

Figura 3-7: Componentes de um restituidor digital
Fonte: Silva (1995)

3.5.3. Vantagens e Desvantagens de um Restituidor Digital

As vantagens da fotogrametria digital quando comparada à analítica, são inúmeras, como cita Silva (1994):

- ausência de mecanismos óticos de alta precisão no instrumento;
- ausência de problemas de movimentação mecânica das imagens;
- a não necessidade de calibração regulares do instrumento;

- estabilidade das imagens, uma vez que elas são armazenadas numericamente;
- manipulação das imagens sem contato manual;
- apresentação das imagens conforme as necessidades do usuário (como por exemplo, a variação do contraste);
- operações visuais reduzidas devido a implantação de algoritmos de correlação e tratamento de imagens;
- acesso facilitado às informações radiométricas das imagens;
- a não necessidade da repetição da orientação interna;
- ausência de paralaxe entre as imagens e a marca flutuante;
- a não necessidade de operadores altamente qualificados devido a automatização do sistema;
- atua como um sistema multi-tarefas (pode atuar, por exemplo, como um comparador e um transferidor de pontos para aerotriangulação).

Todavia, a fotogrametria digital apresenta algumas desvantagens, como cita Silva (1994):

- a necessidade da numerização das imagens fotográficas;
- o campo de visão da imagem é inversamente proporcional ao seu nível de resolução. Uma alta resolução implica em pequeno campo de visão (ver item anterior sobre monitores de saída);
- dificuldade em movimentar toda a imagem em tempo real;
- dificuldade para operar com imagens coloridas;
- elevado espaço necessário para armazenamento de imagens (ver próximo capítulo sobre tamanho de arquivos gerados no processo de captação numérica de imagens);
- a necessidade de reeducação de fotogrametristas ortodoxos.

3.5.4. Equipamentos Digitais Existentes no Mercado

Devido a fotogrametria digital ser ainda muito recente, são poucos os equipamentos disponíveis no mercado. As principais empresas fabricantes e os respectivos modelos são relacionados abaixo.

a) Intergraph (Huntsville, EUA):

ImageStation

- Monitor: 1664 x 1248 pixels, 24 bits por pixel;
- Visão estereoscópica: alternância de imagens (120 Hz, 60 Hz para cada imagem);
- Computador: processador 14 MIPS, 1 GByte de capacidade de armazenagem.

b) MATRA (França):

TRASTER T10

- Monitor: 1280 x 1028 pixels, 24 bits por pixel;
- Visão estereoscópica: alternância de imagens (120 Hz, 60 Hz para cada imagem);
- Computador: Sun SPARCstation, 600 MByte de capacidade de armazenagem.

c) Leica - Wild (Heerbrug, Suíça):

DVP - Digital Vídeo Plotter (Fig. 3-8)

- Monitor: 800 x 600 ou 1024 x 786 pixels, 24 bits por pixel;
- Visão estereoscópica: estereoscópio de espelhos;
- Computador: PC, 1.7 MByte de capacidade de armazenagem;
- Software: desenvolvido pela Universidade de Laval, Quebec, Canadá.

Figura 3-8: Restituidor digital DVP

Sistema DPW (Leica/Wild-Helava) (Fig. 3-9)

- Monitor: 1280 x 1028 pixels, 24 bits por pixel;
- Visão estereoscópica: alternância de imagens (120 Hz, 60 Hz para cada imagem);
- Computador: Sun SPARCstation 2 e 10 (sistema operacional UNIX), 1.7 GByte de capacidade de armazenagem.

- Scanner: DSW 100, resolução superior a 40 L/mm, tamanho mínimo do pixel igual a 7 μm ;
- Sistema DPW 650 e DPW 750, realizam as operações básicas fotogramétricas;
- Sistema para aerotriangulação DCCS - Digital Correlator Comparator System.

Figura 3-9: Restituidor digital DPW

3.6. PERSPECTIVAS FUTURAS

A tendência para o futuro da fotogrametria seria a substituição completa dos equipamentos restituidores analógico e semi-analíticos e uma concorrência entre os equipamentos analíticos e digitais. Na medida que o custo de um restituidor digital diminui, e as metodologias de captação de imagens numéricas são aperfeiçoadas, a difusão dos equipamentos digitais será cada vez maior; por exemplo, no Brasil no transcorrer de 1996 e 1997, duas das principais empresas de fotogrametria, a ESTEIO Eng. e Aerolevantamentos S.A. e a BASE Aerofotogrametria e Projetos S.A., já adquiriram estações de trabalho digitais.

Acredita-se ainda que com o advento de uma câmera digital que substitua eficientemente a câmera analógica, a fotogrametria digital substitua definitivamente a analítica. Isso deve-se ao fato de que dessa maneira não haveria mais a necessidade da etapa preliminar de numerização de imagens analógicas, dispensando assim o uso de scanners de alta resolução,

simplificando o processo de restituição digital e principalmente diminuindo o custo de um restituidor digital, já que o preço de um scanner de alta resolução ainda é elevado.

Apesar dessas dificuldades, naturais de um técnica ainda muito recente, o futuro da fotogrametria digital é promissor, pois como indica Silva (1995), a fotogrametria digital permitirá um avanço na interligação da fotogrametria e do sensoriamento remoto, na automatização dos processos de restituição e na geração de informações georeferenciadas na forma raster ou vector para alimentarem os Sistemas de Informações Geográficas - SIG.

4. SCANNERS

4.1. INTRODUÇÃO

Conforme comentado anteriormente, a captação de imagens numéricas na fotogrametria digital é realizada através de scanners. De acordo com Kraus (1993), a captação de imagens via scanners de alta resolução é fundamental para a obtenção de trabalhos de elevada precisão.

Um scanner é basicamente constituído por sensores tipo CCD, com um sistema interno de iluminação. Na Fig. 4-1 encontramos um esquema genérico de um scanner.

Figure 1. System overview.

Figura 4-1: Esquema genérico de um scanner

Fonte: Bethel (1995)

Nos próximos itens serão apresentados importantes aspectos a serem considerados no processo de digitalização de imagens através de scanners.

4.2. RESOLUÇÃO DE DIGITALIZAÇÃO

No processo de digitalização, via scanner, a resolução espacial adotada deve assegurar que o nível de resolução da imagem original seja mantido dentro de limites adequados. Para tanto, deve-se adequar o intervalo de digitalização (ΔD) à resolução da fotografia; essa adequação é feita mediante a relação exposta na Eq. 4-1.

$$\text{Eq. 4-1} \quad \Delta D [\text{mm}] = \frac{0,7}{2 \cdot R_L [L / \text{mm}]}$$

onde:

R_L = resolução linear da fotografia

Por exemplo, uma imagem fotográfica de 50 L/mm, levaria a um intervalo de digitalização de 7 μm , que é um valor bem difícil de ser alcançado,

portanto na fotogrametria digital poucos modelos de scanners existentes no mercado são adequados. Também recomenda-se que a precisão dos scanners utilizados deve ser menor igual a de $\pm 3 \mu\text{m}$ (Kraus, 1993).

É interessante diferenciar o intervalo de digitalização e o tamanho do sensor; num processo ideal, o intervalo deveria ser igualitário ao tamanho, porém nem sempre isso acontece, podendo-se ter situações onde o intervalo é inferior ao tamanho, o que leva a perda de nitidez na imagem (Kraus, 1993).

Além da elevada resolução de um scanner utilizado na fotogrametria digital, o mesmo deve ter um tamanho adequado ao das imagens fotográficas aéreas (230x230 mm), que gira em torno de 250x250 mm.

Na Tab. 4-1 encontramos a resolução espacial alcançada por diferentes modelos de scanners utilizados na fotogrametria digital.

Tabela 4-1: Resolução espacial de diferentes modelos de scanners utilizados na fotogrametria digital

Scanner	Resolução (dpi)	Tamanho do Pixel (μm)
Du Pont High-Light	1850 x 2540	14 x 10
	1875 x 2540	14 x 10
	1875 x 1132	14 x 22
Helava DSW-100	-	13 x 13
Vexcel VX-3000	-	10 x 10
	-	24 x 24
Philips CCD	-	8 x 12
Agfa ACS-100	2400 x 2400	11 x 11
	1800 x 1800	14 x 14
	900 x 900	28 x 28
	300 x 300	85 x 85
Agfa Horizon	1200 x 1200	21 x 21
Screen DT - S103AI	2000 x 2000	13 x 13
Crosfield	900 x 900	28 x 28
	1800 x 1800	14 x 14
Perkin Elmer	-	22 x 22
Wehril	-	12 x 12
Zeiss PhtoScan PS1	-	8 x 8

Fonte: Adaptado Kölbl (1994)

No caso da resolução radiométrica, na fotogrametria digital quase não se utiliza imagens de 1 bit (imagens preto e branco), pois nesse tipo de imagem se perderia muitas informações pictóricas da imagem original.

Utiliza-se na maioria das vezes imagens em tons de cinza, isto é, imagens de 8 bits, pois além de ocuparem um espaço três vezes menor de armazenamento quando comparadas à imagens coloridas de 24 bits, a grande maioria das imagens originais utilizadas são fotogramas pancromáticas.

As imagens coloridas geram arquivos muito grandes e são utilizadas em casos específicos.

Essa questão do tamanho dos arquivos digitais gerados é um dos problemas fundamentais para a fotogrametria digital, pois devido a precisão que se exige nas restituições fotogramétricas, faz-se necessário uma alta resolução de digitalização, que geram, conseqüentemente, arquivos muito grandes.

Por exemplo, uma foto aérea de 230x230 mm, irá gerar, quando numerizada num intervalo de 7,5x7,5 μ m, uma imagem com 30.666 x 30.666 pixels, como cada pixel ocupa um byte (imagem em tons de cinza), necessita-se de 940 Mbytes, para o estereopar fotogramétrico, $940 \times 2 = 1880$ Mbytes de espaço de gravação.

Já para uma imagem colorida RGB de 3 bytes/pixel, necessita-se para o estereopar de 5640 Mbytes! Para um conjunto de 500 imagens coloridas (um rolo de filme aerofotogramétrico), são necessários $1880 \times 500 = 940$ Gbytes! Portanto um restituidor digital exige um sistema de gravação de dados em fita magnética ou disco ótico.

Esses arquivos digitais grandes, além do problema de armazenamento, têm ainda a questão do processamento em tempo real. Na Tab. 4-2 encontramos exemplificado em maiores detalhes o tamanho de imagens gerado pela digitalização para uma foto aérea de 230x230 mm.

Tabela 4-2: Resolução e tamanho de arquivos para uma foto 230x230 mm

Resolução		Tamanho do Pixel	Arq. Preto e Branco 1 bit (MBytes)	Arq. Tons de Cinza 8 bits (MBytes)	Arq. Colorido RGB 24 bits (MBytes)
(dpi)	(dpmm)	(μm)			
300	11.8	85	0.9	7.3	21.9
400	15.7	64	1.6	13.0	39.0
450	17.7	56	2.1	16.4	49.2
500	19.7	51	2.5	20.3	60.9
600	23.6	42	3.7	29.2	87.6
800	31.5	32	6.5	51.8	155.4
1200	47.2	21	15.0	120.0	360.0
2400	94.5	11	25.7	437.2	1311.6
3400	133.9	7.5	117.6	940.4	2821.2

Dessa maneira, quanto melhor a precisão, menor o tamanho do pixel e consequentemente, maior o arquivo gerado. Exemplificando, em testes realizados no restituidor digital DVP - Digital Photogrammetric Station (comercializado pela WILD/LEICA), foi constatado que tanto a precisão planimétrica, como a altimétrica equivalem aproximadamente a 70% do tamanho do pixel, sendo assim a precisão de uma restituição digital vai depender além da escala do fotograma, da resolução espacial, como ilustra a Tab. 4-3.

Tabela 4-3: Precisão planimétrica em metros alcançada numa restituição fotogramétrica realizada no DVP - Digital Photogrammetric Station

Escala do Fotograma				Resolução	Pixel	Arquivo
1:5000	1:10000	1:15000	1:20000	(dpmm)	(μm)	(MBytes)
0.30	0.60	0.90	1.20	11.8	85	7.3
0.22	0.45	0.67	0.90	15.7	64	13.0
0.20	0.40	0.60	0.80	17.7	56	16.4
0.18	0.36	0.54	0.72	19.7	51	20.3
0.15	0.30	0.45	0.60	23.6	42	29.2
0.11	0.22	0.34	0.45	31.5	32	51.8
Precisão (m)						

Fonte: DVP GEOMATIC SYSTEMS INC. (1993)

Além das informações referentes a resolução radiométrica que cada elemento armazena, outras informações são armazenadas. Resumindo, por exemplo, num modelo estereoscópico digital colorido, cada elemento da matriz que o representa, possuiria as seguintes informações:

- a) Coordenadas: (X, Y, Z) , onde X e Y seriam as coordenadas planimétricas do terreno e Z a altitude;
- b) Tonalidade das cores: (R, G, B) , vermelho, verde e azul, respectivamente.

4.3. CLASSIFICAÇÃO DOS SCANNERS

Podemos classificar os scanners de acordo com diferentes critérios, tais como:

- a) o sistema de movimentação dos sensores;
- b) o sistema de arranjo dos sensores;
- c) o sistema de iluminação;
- d) a sua utilização.

4.3.1. Sistemas de Movimentação dos Sensores

Essa classificação é baseada pela maneira com que os sensores varrem o documento a ser numerizado. Temos basicamente quatro tipos que serão descritos a seguir.

4.3.1.1. *Scanners de Mão*

Nesse tipo de scanner, o documento é fixado numa superfície qualquer e o scanner é passado manualmente sobre o mesmo.

4.3.1.2. *Scanners de Mesa*

Nos scanners de mesa o documento é fixado em uma superfície plana, sobre a qual se move um sensor, em ambas as direções. Cada incremento no movimento do sensor corresponde ao tamanho de um pixel. A Fig. 4-2 ilustra esse modelo de scanner.

Figura 4-2: Scanner de mesa

Fonte: Scarim & Teixeira (1994)

4.3.1.3. Scanners de Tambor

Nos scanners de tambor o documento é fixado na superfície de um cilindro giratório. Um sensor e uma fonte de luz movem-se em conjunto, ao longo da geratriz do cilindro. A cada volta completa do cilindro, o sensor é movimentado um passo, o que corresponde ao tamanho do pixel. A Fig. 4-3 ilustra esse modelo de scanner.

Figura 4-3: Scanner de tambor

Fonte: Scarim & Teixeira (1994)

4.3.1.4. Scanners de Rolo

Nos scanners de rolo, um feixe de luz emitido por uma fonte é refletido pela superfície do documento e, em seguida, focado por um sistema de lentes de alta resolução, sobre um conjunto de câmaras. Os documentos devem ser fixados ao rolo giratório. O conjunto da câmara é fixo e alinhado

transversalmente no sentido de movimento do rolo, cobrindo toda a largura do scanner. Dessa forma, uma linha de imagem é formada a cada incremento do movimento do rolo. Ao contrário do scanner de tambor, o comprimento do papel é limitado somente pela capacidade de armazenamento do computador. A Fig. 4-4 ilustra esse modelo de scanner.

Figura 4-4: Scanner de rolo
Fonte: Scarim & Teixeira (1994)

4.3.2. Sistemas de Arranjo dos Sensores

Essa classificação é baseada na maneira pela qual os sensores são arranjados internamente no scanner. Existem basicamente três tipos de arranjos que serão descritos a seguir.

4.3.2.1. Sensores Simples

São scanners compostos por um sensor unitário, que varre linha por linha da imagem. Como exemplo podemos citar: CROSSFIELD, HELL, OPTRONICS e SCITEX.

4.3.2.2. Sensores em Linha

São scanners compostos por sensores dispostos em uma linha unitária, que varrem faixas da imagem. Como exemplo pode-se citar o PhotoScan PS1 (utilizado pela ZEISS e INTERGRAPH). Esse scanner possui 2048 elementos em linha de tamanho igual a $7,5 \mu\text{m}$ e alcança uma precisão em torno de $1,0 \mu\text{m}$.

4.3.2.3. Sensores em Matriz

São scanners compostos por sensores dispostos em linhas e colunas, formando uma matriz. Digitalizam uma porção da imagem de cada vez, portanto esse tipo de equipamento contém uma grelha de coordenadas conhecidas para unir as porções da imagem digitalizadas separadamente (algumas câmeras fotográficas, como a Leica R5 e a Linhof & Rollei 6006 já imprimem na foto uma grelha). Como exemplo podemos citar o scanner RS1 da ROLLEI, Vexcel VX 300 e o DSW 100 utilizado pela Leica/Helava.

Na Fig. 4-5 encontramos um esquema de um scanner utilizado em fotogrametria.

Figura 4-5: Vista esquemática da unidade de numerização do scanner DSW100 Helava-Leica, onde temos o sistema de iluminação (1), a placa de numerização (2) e dois sensores (3a,b).
Fonte: Kölbl (1996)

4.3.3. Sistemas de Iluminação

Essa classificação baseia-se no sistema de iluminação dos scanners, que constitui um importante fator para a reprodução da imagem digitalizada; temos basicamente dois sistemas, que serão descritos a seguir.

4.3.3.1. Sistema Direto

Um sistema de iluminação direto possui um condensador que amplia a faixa de incidência da fonte de luz. Esse tipo de sistema possui como vantagem a

economia de energia elétrica, pois exige lâmpadas de baixa potência e pode utilizar fibra ótica para a transmissão da energia elétrica para a fonte de luz. Um acentuado sistema de iluminação direto provoca um pequeno ângulo de abertura ótica que incrementa consideravelmente a profundidade do campo de visão. Esse tipo de sistema também é menos sensível a efeitos de desfocagem. Por outro lado, pode provocar efeitos de difração (Kölbl & Bach, 1996).

4.3.3.2. *Sistema Difuso*

Um sistema difuso de iluminação pode ser obtido de diferentes maneiras, uma delas é quando se utiliza uma placa de vidro leitosa que provoca a difusão dos raios luminosos (Kölbl & Bach, 1996).

O quociente de transparência medido entre os raios paralelos de um sistema de iluminação direto e os raios difusos é conhecido como quociente de Callier e é proporcional à granulometria do filme. Na determinação da granulometria, a Kodak recomenda o uso do sistema difuso, pois uma determinação equivalente no sistema direto não é definido adequadamente.

Na Fig. 4-6 encontramos a representação esquemática desses dois sistemas.

Figura 4-6: Sistemas de iluminação encontrados nos scanners
Fonte: Kölbl & Bach (1996)

4.3.4. Utilização dos Scanners

A utilização dos scanners atualmente abrange diversos setores. Muitas vezes o que determina a utilização de um tipo ou de outro é a resolução alcançada pelo mesmo. Dessa maneira podemos classificar os scanners nos tipos descritos a seguir.

4.3.4.1. Scanners de Mão

Constituem os tipos mais simples de scanners e possuem baixa resolução. O modelo dos scanners de mão são desenvolvidos de acordo com o fim para que os mesmos são destinados. Nessa categoria encontramos por exemplo, os scanners utilizados em caixas de supermercados e os scanners utilizados em trabalhos de editoração eletrônica não profissionais.

4.3.4.2. "DeskTop Publishing Scanners" (DTP)

São scanners de mesa, possuem uma resolução de baixa a média, conforme o modelo e são utilizados na editoração eletrônica. O formato desses scanners gira em torno do formato A4. Na Tab. 4-4 encontramos exemplos dessa categoria de scanners.

Encontram-se também scanners de mesa em formatos maiores, em torno de 250 x 250 mm. Nessa categoria temos os scanners utilizados em processos de editoração eletrônica mais profissionais, geralmente em gráficas.

O uso de scanners desktops comuns na fotogrametria digital tem sido objeto de estudo, pois o custo dos mesmos é bem inferior aos scanners de mesa especialmente desenvolvidos para fotogrametria como os descritos na Tab. 4-1.

O motivo do alto custo desses scanners é a sua elevada resolução aliada a grande precisão mecânica de movimentação dos sensores. O alto custo de um restituidor digital deve-se em grande parte ao custo do scanner; o restituidor digital DVP da WILD/LEICA, utiliza um scanner desktop de tamanho apropriado a uma foto aérea, barateando dessa maneira, dentre outros motivos, o seu preço de aquisição.

Scanners de formato A4 (210x297 mm), que são menores do que uma foto aérea (230x230 mm) poderiam ser utilizados na fotogrametria digital terrestre, pois uma foto terrestre possui um tamanho que gira em torno de 60 x 80 mm, tamanho esse compatível com estes modelos de scanners.

Tabela 4-4: Características técnicas dos principais scanners desktops encontrados no mercado

Scanner	Formato (mm)	Resolução Máxima (dpi)
AVISION AV 660	210 x 290	600 x 600
AVISION AV 800	216 x 356	300 x 600
EPSON ACTIONSCANNING	216 x 297	300 x 300
EPSON ES 1000 C	216 x 297	400 x 400
EPSON ES 1200 C	216 x 297	600 x 600
HEWLETT PACKARD SCANJET 3C	215 x 356	600 x 1200
MICROTEK SCANMAKER II XE	216 x 356	300 x 600
UMAX UC 1260-PRO	215.9 x 355.0	1200 x 600

Fonte: Madeira et al. (1995)

4.3.4.3. Scanners de Grande Formato

Nesse grupo encontramos scanners de resolução média utilizados em trabalhos profissionais de editoração.

Temos nessa categoria os scanners de *tambor* e de *rolo*. O formato maior desses scanners permite a numerização de documentos grandes, como plantas, projetos, mapas, etc..

4.3.4.4. Scanners Fotogramétricos

No caso da fotogrametria digital, devido às características do documento a ser digitalizado, utilizam-se scanners de mesa, pois um scanner de mão além de possuir baixa resolução, não tem nenhuma estabilidade de digitalização, já que todo o processo é manual; quanto aos scanners de tambor ou rolo poderiam danificar a foto a ser numerizada, devido ao sistema cilíndrico de movimentação.

Os scanners de mesa utilizados na fotogrametria são equipamentos especialmente desenvolvidos para esse fim e possuem alta resolução e grande precisão geométrica e radiométrica, pois a natureza dos trabalhos fotogramétricos assim o exigem.

O formato desse tipo de scanner gira em torno de 250x250 mm, de maneira que se possa numerizar perfeitamente uma foto aérea de 230x230 mm.

4.4. FONTES DE ERROS DOS SCANNERS

Obviamente é esperado que no processo de numerização via scanners ou através de outros instrumentos numerizadores ocorram distorções, havendo dessa maneira perda de qualidade da imagem original. A avaliação dessas distorções é fundamental para que se possa estabelecer o grau de confiança que a fotogrametria digital pode oferecer.

Essas distorções podem ser agrupadas em dois grandes grupos: distorções relativas à geometria interna da imagem e distorções relativas aos tons de cinza no caso de imagens de 8-bits ou no caso de imagens de 16-bits, a sua coloração.

Dessa maneira, conforme cita Kölbl (1996), podemos resumir que para a obtenção de uma qualidade adequada da imagem digital, três pontos fundamentais devem ser analisados:

- a qualidade geométrica obtida;
- a fidelidade à tonalidade ou às cores da imagem original digitalizada;
- a resolução da imagem digital.

A avaliação da qualidade geométrica das imagens digitalizadas constitui um dos objetivos do presente trabalho; já a questão da fidelidade da tonalidade ou da coloração foge dos objetivos, portanto não foi avaliada. Conforme comentado anteriormente, a resolução de uma imagem digital é dividida em dois tipos, a *resolução espacial* e a *resolução radiométrica*, sendo que essa última é intimamente ligada a questão da tonalidade ou coloração das imagens.

Num processo de avaliação de scanners, Kölbl & Bach (1996), citam aspectos importantes a serem analisados:

- a) Geometria: na fotogrametria analítica a precisão alcançada pelos restituidores é em torno de $\pm 2 \mu\text{m}$, portanto é essa a ordem de grandeza que deve ser alcançada nos scanners.
- b) Resolução da imagem: esse parâmetro é decisivo na determinação da qualidade dos filmes fotográficos utilizados na fotogrametria. Sendo assim o processo de numerização deve manter uma resolução o mais próximo possível da imagem original, de acordo com a precisão esperada; dessa forma um pixel de $10 \mu\text{m}$ é adequado para fotogramas em tons de cinza e um pixel de $15\text{-}20 \mu\text{m}$ para fotogramas coloridos.

- c) Reprodução de cores: o scanner deve manter dentro de limites aceitáveis as cores do original fotográfico.
- d) Compressão dos dados: os grandes arquivos gerados no processo de digitalização devem ser reduzidos através de técnicas de compressão de dados; sendo assim é interessante que o software que acompanha o scanner possua rotinas que permitam essa manipulação.
- e) Manejo do instrumento: o manuseio do scanner deve ser fácil e que permita diferentes ajustes de maneira que se possa trabalhar adequadamente as imagens e ainda, se possível, permitir que todos esses ajustes sejam executados via softwares.

O grau das distorções provocadas pelos scanners nas imagens originais irá variar, logicamente, conforme o modelo de scanner utilizado. Os scanners fotogramétricos são scanners de alta precisão, portanto de alto custo, daí a necessidade de se testar scanners DTP que tenham a grande vantagem de um preço de aquisição bem inferior aos scanners fotogramétricos. Porém além da baixa precisão geométrica, os scanners DTP geralmente são de pequeno formato e não possuem softwares de calibração.

Dessa forma como cita Baltsavias (1996), a calibração de scanners DTP não é realizada nem pelos fabricantes, nem pelos vendedores e nem pelos usuários, pois para tal empreita seria necessário, além de um software de calibração, também de uma grelha de calibração, sendo que nenhum dos dois são comercializados com o scanner. Outro ponto a ressaltar é que os vendedores do equipamento não alertam aos usuários das distorções que o mesmo possa provocar.

Podemos classificar os erros provocados pelos scanners de acordo com diferentes critérios (Baltsavias, 1996):

- a) Conforme a distorção ocorrida na imagem numerizada:
 - i. **Erros geométrico**: são os erros ligados a geometria da figura imageada;
 - ii. **Erros radiométricos**: são os erros ligados a coloração da figura imageada.

Conforme a teoria dos erros:

- i. **Erros sistemáticos:** são os erros que se repetem com o mesmo sinal e a mesma gradeza e no caso de scanners são provocados basicamente pelos seguintes fatores:
 - distorções das lentes;
 - defeitos dos pixels;
 - erros de alinhamento dos sensores CCD;
 - erros de amostragem;
 - desfocagem;
 - alta velocidade de numerização.
- ii. **Erros aleatórios:** são os erros que não seguem nenhuma lei rigorosa e no caso de scanners são provocados basicamente pelos seguintes fatores:
 - posicionamento mecânico;
 - instabilidade do sistema de iluminação;
 - vibrações;
 - ruídos eletrônicos;
 - pó e/ou sujeira na placa de numerização.

Os erros aleatórios de maneira geral estão ligados principalmente aos erros radiométricos, enquanto que os erros geométricos estão mais correlacionados com erros sistemáticos. Porém, dentro dos erros aleatórios os provocados pelo posicionamento mecânico e vibrações estão especialmente ligados aos erros geométricos.

Ainda conforme Baltsavias (1996), dos erros anteriormente citados, podemos destacar as seguintes fontes de erros como as principais:

- imprecisão do posicionamento mecânico dos sensores;
- distorções provocadas pelas lentes;
- ruídos eletrônicos;
- mal balanceamento de cores.

Logicamente que a ocorrência desses erros anteriormente descritos irão variar conforme o modelo de scanner testado, inclusive dependendo da qualidade do scanner erros aleatórios podem-se tornar sistemáticos e vice-versa.

4.5. CALIBRAÇÃO DE SCANNERS

Conforme foi comentado no item anterior, a correção dos erros gerados no processo de numerização, via scanners, é realizada através de softwares e de grelhas de calibração que em conjunto “calibram” o scanner utilizado na

digitalização. Essa metodologia funciona sinteticamente na seguinte maneira:

1. digitaliza-se a grelha de calibração de coordenadas previamente conhecidas (são as coordenadas calibradas ou controle);
2. medem-se as coordenadas da grelha digitalizada;
3. aplica-se uma transformação de coordenadas entre os dois sistemas (grelha gráfica, grelha digital), obtendo-se dessa forma os parâmetros de transformação entre esses sistemas;
4. aplicam-se os parâmetros de transformação na imagem fotográfica digitalizada, corrigindo assim as distorções geradas pelo scanner.

Essa transformação de coordenadas pode ser considerada como uma "pré-orientação" interior, sendo assim, na fotogrametria digital teríamos uma etapa a mais no processo de orientação fotogramétrica.

Baltsavias (1996), utilizou em testes de calibração de scanners, uma grelha de 254x254 mm de dimensões, com linhas horizontais e verticais cruzando-se, formando um quadriculado de 10 x 10 mm; dessa forma obteve-se 25x25 pontos, totalizando 625 pontos. As linhas foram desenhadas com 190 μ m de espessura. A grelha foi plotada em filme por um Optronics 5040 scanner/plotter e copiada numa placa de vidro de alta qualidade por uma companhia especializada em ótica fina; o custo total desse processo girou em torno de US\$ 200,00. Os pontos formados pelas intersecções das cruzes foram lidos por um restituidor analítico WILD AC1 de ± 2 μ m de precisão, obtendo-se dessa maneira as coordenadas calibradas.

Kölbl (1996), cita que a grelha utilizada para análise geral da precisão do scanner, no grupo de pesquisa da OEEPE (European Organization for Experimental Photogrammetric Research) constitui também numa placa de vidro, onde são gravadas linhas pretas de espessura de 50 μ m, formando um quadriculado de 10x10 mm.

No processamento matemático para a transformação das coordenadas da grelha digital para a grelha padrão, Baltsavias (1996) utilizou três opções como pontos de controle:

- a) Todos os pontos da grelha: nesse caso todos os pontos da grelha foram computados para o cálculo dos parâmetros do modelo de transformação de coordenadas. Conforme o autor, essa opção proporciona um melhor ajuste, pois engloba toda a área da grelha. Os erros residuais máximos ocorreram nas bordas.
- b) Quatro pontos dos cantos: utilizaram-se somente os quatro pontos extremos dos cantos da grelha. Como os maiores erros ocorrem

justamente nos cantos, utilizar exatamente esses pontos para o cálculo dos parâmetros pode induzir a um erro sistemático nos mesmos.

- c) Oito pontos: nesse caso utilizaram-se os quatro pontos do canto mais quatro pontos intermediários entre os cantos nas linhas de bordas.

O processamento matemático utilizado por Baltsavias (1996), para a transformação de coordenadas entre os dois sistemas foi uma Transformação Afim com seis parâmetros. Também foi utilizada uma Transformação Afim de 7 parâmetros, onde o sétimo parâmetro x^2 em y , seria um corretor de segunda ordem para distorções tangenciais provocadas pelas lentes. No caso b e c , os pontos remanescentes foram utilizados como pontos de verificação. Como temos um número de pontos acima do mínimo necessário, os parâmetros foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados e determinados dessa forma os erros residuais.

Bethel (1995), também recomenda que seja utilizada para essa transformação de coordenadas uma Transformação Afim, porém de quatro parâmetros, tal como utilizada na orientação interna analítica.

No presente trabalho adotou-se uma Transformação Afim com seis parâmetros, utilizando-se todos os pontos da grelha de calibração para a determinação dos parâmetros. No capítulo seguinte é descrita a metodologia adotada.

5. METODOLOGIA ADOTADA PARA A CALIBRAÇÃO DE SCANNERS

5.1. INTRODUÇÃO

A idéia básica para efetuar a calibração de scanners é criar uma grelha em material estável, de coordenadas conhecidas, numerizá-la e comparar as suas coordenadas com as coordenadas da imagem numérica, conforme já descrito sinteticamente no capítulo anterior.

Para a execução desse processo de calibração, foi desenvolvido no presente trabalho um software denominado SCS - "Sistema de Calibração de Scanners", estruturado em dois módulos básicos: o primeiro para leitura automática das coordenadas da imagem digital da grelha numerizada e o outro para a obtenção dos parâmetros de transformação.

Na Fig. 5-1 encontramos um diagrama onde cada uma das etapas de calibração são ilustradas, e no transcorrer desse capítulo cada uma delas, assim como o SCS serão descritos detalhadamente.

Figura 5-1: Processo de calibração de scanners

5.2. GRELHA DE CALIBRAÇÃO GRÁFICA

5.2.1. Modelo Geométrico da Grelha de Calibração

Adotou-se uma malha regular de 240x240 mm, formada por 47 linhas e 47 colunas, espaçadas 5x5 mm. Na intersecção das linhas e colunas temos os pontos de controle, dessa forma temos um total de 2209 pontos. Essa dimensão adotada baseou-se nas dimensões de um fotograma aéreo, isto é, 230x230 mm. Porém, uma grelha nessas dimensões não se adaptaria a um scanner de formato A4 (210x297 mm), mas como cita Baltsavias (1996) ao se testar um scanner de formato inferior às dimensões de um fotograma aéreo, parte da grelha de calibração ficará fora da região de numerização.

É interessante destacar o detalhe das bordas da grelha, onde as linhas foram prolongadas de tal maneira que a configuração dos pontos das bordas ficassem iguais a dos pontos internos, para posteriormente facilitar o processamento computacional do Módulo I do SCS; esse detalhe é ilustrado na Fig. 5-2.

Figura 5-2: Configuração geométrica da borda da grelha de calibração

5.2.2. Material de Suporte e Gravação

Definida a configuração geométrica da grelha, o próximo passo foi definir o material de suporte para gravação da mesma.

Conforme as citações anteriores, o vidro tem sido o material adotado devido a sua estabilidade. Baseando-se nesse dado, os primeiros testes de gravação foram realizados em amostras de vidro, utilizando-se a técnica de gravação Riston, que é realizada através das seguintes etapas:

- a) confecção do fotolito do desenho da grelha;
- b) aplicação na placa de vidro de um material fotosensível, de coloração azul, que é denominada de película Riston (daí o nome da técnica);
- c) numa máquina especial, o fotolito é "fotografado" na placa de vidro, funcionando o mesmo como negativo. Dessa forma os brancos do fotolito ficarão no vidro com a coloração azul;
- d) revelação.

Essa técnica é utilizada no processo de fabricação de circuitos impressos e foi recomendada pelo Laboratório de Eletrônica do IFSC/USP. Os resultados alcançados nesses primeiros testes, utilizando-se a técnica Riston, não foram satisfatórios, devido:

- mal alinhamento das linhas;
- espessura da linha muito grossa, girando em torno de 300 μm ;
- linhas com muitas falhas.

De todos os aspectos acima citados, o mais grave foram as falhas das linhas, o que levou a uma descontinuidade das mesmas e após uma numeração teste da mesma, essas falhas foram ainda mais ressaltadas. Devido a esse fato, o processamento computacional preliminar do Módulo I do SCS foi inviabilizado. Para solucionar o problema da descontinuidade das linhas, aumentamos ainda mais a espessura das mesmas, agora para cerca de 500 μm . Porém, essa linha de espessura muito grossa, por sua vez, iria prejudicar a leitura das coordenadas no restituidor analítico, pois a marca-índice do mesmo é de aproximadamente 40 μm , o que levaria a perda de precisão no momento da leitura.

Aliado a todos esses fatores desfavoráveis, ainda houve dificuldade na revelação, pois após a mesma, partes da película soltavam-se da placa de vidro. Devido a todos esses fatores desfavoráveis, a gravação em vidro foi abandonada.

Em visita técnica ao CTI - Instituto de Microeletrônica em Campinas-SP, através da consulta aos pesquisadores Dra. Alaíde Pellegrini Mammana e

ao Eng. Marcos Antônio Schreiner, foi sugerido como substrato de gravação um filme de matéria plástica fabricado pela DuPont, o Filme Base 7 AGFA de alta estabilidade. Esse material, além da estabilidade possui como vantagem adicional a tecnologia de gravação, sendo que a mesma é realizada através de um fotoploter a laser de alta resolução, em condições ambientais controladas.

Dessa forma, foi confeccionada uma matriz digital na configuração geométrica anteriormente descrita, através do software AutoCad v. 12 e o arquivo foi fornecido à empresa CADService (Campinas-SP), onde foi fotoplotado no EG-2200, a um custo aproximado de US\$ 100,00 por plotagem. É interessante destacar que essa técnica de fotoplotagem é largamente utilizada para a confecção de padrões para a fabricação de microcircuitos eletrônicos, daí a elevada precisão do processo, já que esses padrões são armazenados ao longo do tempo como moldes.

A espessura do traço adotado nas linhas baseou-se no tamanho do cursor do restituidor analítico Planicomp C-120. Foram gravadas duas grelhas: uma de espessura de 25 μm (igual a aproximadamente meia marca) e a outra de 89 μm (igual a aproximadamente duas marcas).

Os valores de 25 e 89 μm escolhidos, são devidos ao sistema de regulagem do fotoploter, pois este não utiliza o sistema métrico, mas sim o sistema inglês de medidas; onde o limite mínimo de espessura de linha é de 0,5 mil" (12,7 μm) e a partir dessa espessura mínima, a sua regulagem aumenta a cada 0,5 mil", portanto, selecionou-se uma espessura de 1,0 mil" (25,4 μm) e de 3,5 mil" (88,9 μm).

5.2.3. Leitura das Coordenadas Calibradas

As coordenadas das grelhas de calibração (25 e 89 μm) foram lidas no restituidor analítico C-120 Planicomp (fabricante Carl Zeiss), cuja marca índice possui aproximadamente 40 μm e alcança $\pm 2 \mu\text{m}$ de precisão.

O equipamento acima citado foi gentilmente cedido pela ESTEIO Engenharia e Aerolevantamentos S.A. (Curitiba - PR), sendo que o mesmo ficava em sala climatizada.

Dos 2209 pontos originais da grelha de calibração gráfica, foram lidos 576 pontos, isto é, foram observados os pontos no espaçamento de 10x10 mm (24 linhas por 24 colunas). A decisão de observar um número menor de pontos foi tomada em função do processamento dos dados, pois processar 2209 pontos seria muito mais pesado do que processar 576 pontos. Cada ponto foi lido três vezes e calculada a média aritmética, obtendo-se dessa maneira as coordenadas calibradas.

5.3. GRELHA DE CALIBRAÇÃO DIGITAL

A grelha de calibração digital foi obtida através da numerização da grelha gráfica. A mesma foi numerizada em três scanners diferentes para fins de comparação. Os scanners testados foram os seguintes:

- a) **HP Design Jet - 220** (scanner "Desktop" formato A4), esse equipamento foi colocado a disposição para o trabalho experimental pelo Departamento de Ecologia da UFSCar (São Carlos - SP); tratado aqui por scanner "HP".
- b) **SHARP JX - 610** (scanner "Desktop" formato aproximado de 250x250 mm, utilizado pelo restituidor digital DVP WILD/LEICA/HELEVA), esse equipamento foi colocado a disposição para o trabalho experimental pelo IME (Rio de Janeiro - RJ); tratado aqui por scanner "SHARP".
- c) **DSW-100** (scanner formato aproximado de 250x250 mmm, de alta resolução, utilizado pelo restituidor digital DPW-100 WILD/LEICA/HELEVA), esse equipamento foi colocado a disposição para o trabalho experimental pela ESTEIO Engenharia e Aerolevantamentos S.A. (Curitiba - PR); tratado aqui por scanner "DSW".

A escolha desses três modelos de scanners foi fundamentada, no caso dos scanners DSW e SHARP, destes serem utilizados em restituidores digitais. No caso do scanner HP deste ser um scanner Desktop padrão, de baixo custo, que poderia vir a ser utilizado em algum tipo de trabalho fotogramétrico, como por exemplo na fotogrametria terrestre.

A grelha gráfica foi numerizada com uma resolução de 500 x 500 dpi para o scanner HP, com 300 x 300 dpi no scanner SHARP e com 1016 x 1016 dpi no caso do scanner DSW. Essa escolha foi condicionada a questão de armazenamento das imagens digitais e as limitações do próprio scanner.

5.4. SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DE SCANNERS - SCS

O sistema de calibração de scanners - SCS, foi desenvolvido em duas linguagens: Visual Basic Versão 3.0 e em Borland C++ v. 5.01. Essa estruturação foi montada visando aproveitar a facilidade da apresentação gráfica do Visual Basic, com os recursos de programação da linguagem C. O SCS esta apto a rodar em ambiente Windons 95.

O SCS foi estruturado em dois módulos: o primeiro módulo destina-se a leitura automatizada das coordenadas da grelha digital e o segundo módulo destina-se a transformação das coordenadas deformadas (grelha digital) no sistema de coordenadas calibradas (grelha gráfica). Nesse processamento os parâmetros de transformação dos sistemas de coordenadas são obtidos.

Os parâmetros obtidos no Módulo II são, logicamente, adaptados para o scanner no qual foi realizado o processo de numerização. Dessa forma, para cada scanner diferente, deve-se repetir todo o processo de calibração.

Na Fig. 5-3 encontramos a tela principal do SCS. Nos próximos itens os respectivos módulos serão descritos detalhadamente.

Figura 5-3: Tela principal do SCS

5.4.1. Módulo I - Leitura Automática das Coordenadas Deformadas

Conforme anteriormente citado, o Módulo I do SCS é o responsável pela leitura automática das coordenadas deformadas nas grelhas de calibração digitais. Dessa forma, esse módulo fornece como produto final um arquivo texto (formato TXT) contendo a listagem dessas coordenadas e esse mesmo arquivo será utilizado no Módulo II.

Esse módulo foi programado em Visual Basic e o formato do arquivo da grelha digital deve ser obrigatoriamente BMP. Na Fig. 5-7 encontramos um esquema geral de funcionamento do Módulo I.

Figura 5-4: Módulo I do SCS

É importante citar que, na estruturação desse módulo, o principal problema encontrado foi a variação da espessura das linhas da grelha digital; pois, dependendo do scanner e da espessura original das linhas na grelha gráfica, ocorre uma variação do número de pixels na espessura das linhas da grelha digital. Devido a esse fato, o algoritmo foi estruturado de maneira a fornecer mais de uma opção de espessura (no caso 3 e 4 pixels), permitindo dessa forma, que o mesmo pudesse ler diferentes espessuras de linhas obtidas nas grelhas digitais.

5.4.1.1. Comandos do Módulo I

1. Gerar arquivo: inicia o processo da leitura automatizada da grelha, mas antes deve-se selecionar a espessura da grelha em pixels. Temos duas opções:

- 4 pixels;
- 3 pixels.

Após selecionar o número de pixels da grelha, temos os seguintes comandos:

1.1. Opções:

1.1.1. Abre grelha: abre a grelha digital a ser processada (deve estar obrigatoriamente no formato BMP).

1.1.2. Delimita quadros: delimita através do posicionamento do cursor a área da grelha a ser processada.

1.1.3. Executar: inicia o processo de leitura das coordenadas.

1.2. Anular

1.2.1. Anular ponto: anula o último ponto definido, ao se definir um quadro.

1.2.1. Anular quadro: anula um quadro anteriormente definido.

1.3. Confirmar quadro: confirma o quadro definido.

1.4. Sair: retorna ao menu principal.

2. Visualizar arquivo: permite o acesso ao arquivo texto gerado.

5.4.1.2. *Algoritmo de Leitura*

O algoritmo de leitura funciona da seguinte maneira: primeiramente, ele pede o número de pixels x que delimitam a espessura das linhas da grelha digital, conforme já citado anteriormente, o Módulo I coloca a disposição duas opções, 3 ou 4 pixels. Posteriormente, o algoritmo define um limite superior e um limite inferior, utilizando-se as equações abaixo.

$$\begin{aligned} \limsup &= x + \frac{x}{2} \\ \liminf &= \frac{x}{2} \end{aligned}$$

Eq. 5-1

Uma vez definido o limite superior e o limite inferior, o algoritmo cria uma área (máscara horizontal de varredura) em torno do pixel que está sendo verificado com as dimensões descritas na Fig. 5-5.

Figura 5-5: Máscara Horizontal de Varredura

Dentro da área definida pela Máscara Horizontal de Varredura, o algoritmo conta o número de pixels de cor preta; caso esse número seja superior à 80% do número máximo de pixels que essa máscara pode conter (n° máx de pontos = $3x \cdot x = 3x^2$), outra área é delimitada (Fig. 5-6).

Figura 5-6: Máscara Vertical de Varredura

Dentro da área definida pela Máscara Vertical de Varredura, o algoritmo, novamente, conta o número de pixels de cor preta e soma esse número à soma anterior da Máscara Horizontal; caso esse número seja agora superior à 85% do número máximo de pixels que essas duas máscaras

podem conter (n° máx. de pixels = $2.3x^2 = 6x^2$), outra área é delimitada (Fig. 5-7).

Figura 5-7: Máscara Final de Varredura

Dentro da área definida pela Máscara Final de Varredura, cada pixel da mesma é submetido a máscara horizontal e vertical anteriormente descritas e aquele que apresentar o maior número de pixels de cor preta na região definida pelas máscaras, será o pixel do ponto de cruzamento das linhas.

Da maneira acima descrita, os pixels da imagem são verificados um a um, e as coordenadas deformadas na unidade pixel são assim obtidas e armazenadas num arquivo texto no formato TXT. Esse arquivo pode ser aberto por qualquer editor de texto e é utilizado no Módulo II para o cálculo dos parâmetros de transformação das coordenadas.

5.4.2. Módulo II - Transformação do Sistema de Coordenadas Deformadas no Sistema de Coordenadas Calibradas

Conforme já anteriormente citado, o Módulo II do SCS é o responsável pela transformação do sistema de coordenadas deformadas no sistema de coordenadas calibradas. Dessa forma, esse módulo fornece como produto final um arquivo texto (formato TXT) contendo os valores calculados, conforme a opção selecionada.

O Módulo II foi programado em Borland C++, pois essa linguagem mostrou-se mais adequada para processar o elevado número de pontos no cálculo dos parâmetros ajustados. Na Fig. 5-8 encontramos um esquema geral de funcionamento do Módulo II.

Figura 5-8: Módulo II do SCS

5.4.2.1. Comandos do Módulo II

1. Gerar Arquivo: gera o arquivo texto com os erros, precisões e parâmetros calculados da transformação do sistema de coordenadas deformadas para o sistema de coordenadas calibradas. Temos quatro opções de cálculo:
 - a) Sem transformação: não efetua a transformação de coordenadas, calculando somente os erros residuais e as precisões.
 - b) Transformação com dois parâmetros: efetua somente a translação dos sistemas de coordenadas e a inversão do eixo y das coordenadas deformadas.
 - c) Transformação com seis parâmetros: efetua a transformação dos sistemas de coordenadas através de uma Transformação Afim.
 - d) Transformação com seis parâmetros e com ajustamento: efetua a transformação dos sistemas de coordenadas através de Transformação Afim com superabundância de pontos.

Ao selecionar uma das opções acima descritas, a seguinte janela é exibida:

Entrada dos dados [?] [X]

Arquivo com dados gerados a partir da imagem scaneada:

Arquivo com dados gerados a partir da imagem calibrada:

Arquivo a ser gerado a partir dos dados calculados:

Resolução da imagem:

Procurar Scanner

Procurar Calibradas

OK

Cancel

Os comandos da janela efetuam as seguintes operações:

Arquivo com dados gerados a partir da imagem scaneada: digitar o nome do arquivo das coordenadas deformadas.

Arquivo com dados gerados a partir da imagem calibrada: digitar o nome do arquivo das coordenadas calibradas.

Arquivo a ser gerado a partir dos dados calculados: digitar o nome do arquivo a ser gerado.

Resolução da imagem: digitar a resolução da grelha digital testada.

Procura Scanner: seleciona o arquivo das coordenadas deformadas (formato TXT).

Procura Calibradas: seleciona o arquivo das coordenadas calibradas (formato TXT).

OK: efetua a transformação do sistema de coordenadas deformadas no sistema de coordenadas calibradas.

Cancel: volta ao menu anterior.

2. Visualizar arquivo gerado: permite o acesso ao arquivo texto gerado.

3. Visualizar vetor de erros: permite a visualização dos vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas.

Obs.: 1- A marca "o" numa das extremidades do vetor indica a coordenada calibrada e a outra extremidade indica a coordenada deformada.

2- Não temos a opção de exibição dos vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas quando selecionamos a opção sem transformação, pois caso fossem calculados, os vetores exibidos teriam um deslocamento muito grande, o que inviabilizaria a representação dos mesmos na tela.

4. Arquivo deformadas: define o sistema de unidades do arquivo das coordenadas deformadas. Temos duas opções:

- a) Pixel: quando o arquivo texto das coordenadas deformadas encontra-se na unidade pixels.
- b) Milímetro: quando o arquivo texto das coordenadas deformadas encontra-se na unidade milímetros.

5.4.2.2. Modelo Matemático

O modelo matemático adotado para a transformação do sistema de coordenadas deformadas (ε_i, η_i) para o sistema de coordenadas calibradas $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ baseou-se numa Transformação Afim de seis parâmetros $(\tilde{a}_i)$, descrita pelas equações abaixo.

$$\tilde{x}_i = \tilde{a}_1 + \tilde{a}_2 \cdot \varepsilon_i + \tilde{a}_3 \cdot \eta_i$$

Eq. 5-2

$$\tilde{y}_i = \tilde{a}_4 + \tilde{a}_5 \cdot \varepsilon_i + \tilde{a}_6 \cdot \eta_i$$

O significado de cada parâmetro das equações Eq. 5-2 podem ser obtidos através da matriz de rotação bidimensional, de onde extraímos as equações Eq. 5-3.

$$\begin{aligned} \tilde{x}_i &= \tilde{T}_x + (\tilde{K}_x \cdot \cos \tilde{\alpha}) \cdot \varepsilon_i + [\tilde{K}_y \cdot (\sin \tilde{\alpha} + \sin \tilde{e} \cdot \cos \tilde{\alpha})] \cdot \eta_i \\ \tilde{y}_i &= \tilde{T}_y + (-\tilde{K}_x \cdot \sin \tilde{\alpha}) \cdot \varepsilon_i + [\tilde{K}_y \cdot (-\sin \tilde{e} \cdot \sin \tilde{\alpha} + \cos \tilde{\alpha})] \cdot \eta_i \end{aligned}$$

Eq. 5-3

onde:

- $\tilde{T}_x, \tilde{T}_y$ são os valores reais dos fatores de translação;
- $\tilde{K}_x, \tilde{K}_y$ são os valores reais dos fatores de escala;
- $\tilde{e}$ é o valor real do ângulo do erro de ortogonalidade;
- $\tilde{\alpha}$ é o valor real do ângulo de rotação.

Comparando-se Eq. 5-2, com Eq. 5-3, obtemos Eq. 5-4,

$$\begin{aligned}
 \tilde{a}_1 &= \tilde{T}_x \\
 \tilde{a}_2 &= \tilde{K}_x \cdot \cos \tilde{\alpha} \\
 \tilde{a}_3 &= \tilde{K}_y \cdot (\sin \tilde{\alpha} + \sin \tilde{e} \cdot \cos \tilde{\alpha}) \\
 \tilde{a}_4 &= \tilde{T}_y \\
 \tilde{a}_5 &= -\tilde{K}_x \cdot \sin \tilde{\alpha} \\
 \tilde{a}_6 &= \tilde{K}_y \cdot (-\sin \tilde{e} \cdot \sin \tilde{\alpha} + \cos \tilde{\alpha})
 \end{aligned}$$

Eq. 5-5

Isolando os fatores de transformação de coordenadas em função dos parâmetros, obtemos Eq. 5-6.

$$\begin{aligned}
 \tilde{T}_x &= \tilde{a}_1 \\
 \tilde{T}_y &= \tilde{a}_4 \\
 \tilde{\alpha} &= \arctan \left(-\frac{\tilde{a}_5}{\tilde{a}_2} \right) \\
 \tilde{e} &= \arcsen \left[\frac{\left(\frac{\tilde{a}_3}{\tilde{a}_6} \right) \cdot \cos \tilde{\alpha} - \sin \tilde{\alpha}}{\left(\frac{\tilde{a}_3}{\tilde{a}_6} \right) \cdot \sin \tilde{\alpha} + \cos \tilde{\alpha}} \right] \\
 \tilde{K}_x &= \frac{\tilde{a}_2}{\cos \tilde{\alpha}} \\
 \tilde{K}_y &= \frac{\tilde{a}_6}{-\sin \tilde{e} \cdot \sin \tilde{\alpha} + \cos \tilde{\alpha}}
 \end{aligned}$$

Eq. 5-6

Como observamos pelas equações acima, as coordenadas calibradas foram consideradas como os valores reais. Portanto, para a obtenção dessas coordenadas através das coordenadas deformadas, os parâmetros $(\tilde{a}_i)$, devem também ser valores reais. Obviamente, a obtenção dos mesmos não é possível, o que se faz então é obter uma estimativa que mais se aproxime dos valores reais.

Na primeira opção de cálculo, sem transformação, não se efetua a transformação das coordenadas, essa opção apenas serve para uma verificação dos erros brutos sem nenhuma correção.

Na segunda opção de cálculo, transformação com dois parâmetros, efetua-se somente uma translação e uma inversão do eixo y das coordenadas calibradas (pois esse eixo encontra-se em sentido contrário ao eixo y das

coordenadas calibradas). Essa opção serve também para uma avaliação preliminar dos erros.

Finalmente na terceira opção de cálculo, transformação com seis parâmetros, efetua-se a transformação completa das coordenadas, obtendo-se os valores dos parâmetros.

Na quarta opção de cálculo realiza-se também a transformação completa, porém é utilizado um número maior de pontos do que o necessário, de maneira que torna possível a realização do ajustamento dos valores obtidos para os parâmetros.

A seguir cada uma das opções são descritas, porém antes temos que definir:

$$\begin{aligned} n &= n^{\circ} \text{ de pontos} \\ \mu &= n^{\circ} \text{ de incógnitas} = 3 \end{aligned}$$

Também, antes de efetuar a transformação de coordenadas, é necessário realizar uma transformação de unidades, isto é, quando o arquivo das coordenadas deformadas encontra-se na unidade pixels, as mesmas devem ser transformadas em milímetros. Para tanto utiliza-se a Eq. 5-7.

$$\text{Eq. 5-7} \quad mm = pixel \times \frac{25,4}{dpi}$$

Onde dpi é a resolução em que a grelha de calibração gráfica foi numerizada.

a) Cálculo sem Transformação

Essa opção não efetua a transformação de coordenadas, calcula somente os erros residuais e as precisões.

Na Fig. 5-9 encontramos um esquema dessa opção.

Figura 5-9: Opção de cálculo sem transformação

1- Cálculo dos erros residuais:

Vetores das coordenadas calibradas::

$$\tilde{x} = \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \dots \\ \tilde{x}_n \end{pmatrix}_{n \times 1}$$

$$\tilde{y} = \begin{pmatrix} \tilde{y}_1 \\ \dots \\ \tilde{y}_n \end{pmatrix}_{n \times 1}$$

Vetores das coordenadas deformadas:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}_{n \times 1}$$

$$\eta = \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \dots \\ \eta_n \end{pmatrix}_{n \times 1}$$

Cálculo dos erros:

$$v_{\varepsilon} = x - \varepsilon$$

Eq. 5-8

$$v_{\eta} = y - \eta$$

2- Cálculo da média dos erros residuais:

Vetor unitário:

$$e = \begin{pmatrix} 1 \\ \dots \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}_{n \times 1}$$

Cálculo das médias:

$$\bar{v}_{\varepsilon} = \frac{e^T \cdot v_{\varepsilon}}{e^T \cdot e}$$

Eq. 5-9

$$\bar{v}_{\eta} = \frac{e^T \cdot v_{\eta}}{e^T \cdot e}$$

3- Cálculo da precisão dos erros residuais:

Cálculo dos desvios dos erros residuais:

$$d_{\varepsilon} = \bar{v}_{\varepsilon} - v_{\varepsilon}$$

Eq. 5-10

$$d_{\eta} = \bar{v}_{\eta} - v_{\eta}$$

Cálculo das variâncias:

$$s_{\varepsilon 0}^2 = \frac{d_{\varepsilon}^T \cdot d_{\varepsilon}}{n-1}$$

Eq. 5-11

$$s_{\eta 0}^2 = \frac{d_{\eta}^T \cdot d_{\eta}}{n-1}$$

Extraindo-se a raiz da Eq. 5-11 são obtidas as precisões:

$$s_{\varepsilon 0} = \pm \sqrt{s_{\varepsilon 0}^2}$$

Eq. 5-12

$$s_{\eta 0} = \pm \sqrt{s_{\eta 0}^2}$$

4- Cálculo da precisão da média dos erros residuais:

$$\bar{s}_{\varepsilon 0} = \pm \frac{s_{\varepsilon 0}}{\sqrt{n}}$$

Eq. 5-13

$$\bar{s}_{\eta 0} = \pm \frac{s_{\eta 0}}{\sqrt{n}}$$

b) Cálculo da Transformação com dois Parâmetros

Essa opção efetua somente a translação dos sistemas de coordenadas e a inversão do eixo y das coordenadas deformadas. Nesse caso, precisamos apenas de um ponto conhecido nos dois sistemas de coordenadas; foi utilizado o ponto do canto superior direito.

Na Fig. 5-10 encontra-se um esquema dessa opção.

Figura 5-10: Opção de cálculo com transformação de dois parâmetros

1- Cálculo dos parâmetros de transformação:

Parâmetros:

$$a_1 = \tilde{x}_1 - \varepsilon_1$$

$$a_2 = 1$$

$$a_3 = 0$$

$$a_4 = \tilde{y}_1 + \eta_1$$

$$a_5 = 0$$

$$a_6 = -1$$

Dessa maneira obtêm-se os vetores dos parâmetros:

$$a_x = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}_{\mu \times 1}$$

$$a_y = \begin{pmatrix} a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{pmatrix}_{\mu \times 1}$$

2- Cálculo dos fatores de transformação:

Utilizam-se as equações Eq. 5-6.

3- Cálculo das coordenadas deformadas transladadas:

Matriz dos coeficientes:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon_1 & \eta_1 \\ \dots & & \\ \dots & & \\ 1 & \varepsilon_1 & \eta_1 \end{pmatrix}_{n \times \mu}$$

Cálculo dos vetores das coordenadas:

$$x = A \cdot a_x$$

Eq. 5-14

$$y = A \cdot a_y$$

4- Cálculo dos vetores dos erros residuais:

$$v_x = \tilde{x} - x$$

Eq. 5-15

$$v_y = \tilde{y} - y$$

5- Cálculo da média dos erros residuais:

$$\bar{v}_x = \frac{e^T \cdot v_x}{e^T \cdot e}$$

Eq. 5-16

$$\bar{v}_y = \frac{e^T \cdot v_y}{e^T \cdot e}$$

6- Cálculo da precisão dos erros residuais:*Cálculo dos vetores dos desvios dos erros residuais::*

$$d_x = \bar{v}_x - v_x$$

Eq. 5-17

$$d_y = \bar{v}_y - v_y$$

Cálculo das variâncias:

$$s_{x0}^2 = \frac{d_x^T \cdot d_x}{n-1}$$

Eq. 5-18

$$s_{y0}^2 = \frac{d_y^T \cdot d_y}{n-1}$$

Extraindo-se a raiz da Eq. 5-18 são obtidas as precisões:

$$s_{x0} = \pm \sqrt{s_{x0}^2}$$

Eq. 5-19

$$s_{y0} = \pm \sqrt{s_{y0}^2}$$

7- Cálculo da precisão da média dos erros residuais:

$$\bar{s}_{x0} = \pm \frac{s_{x0}}{\sqrt{n}}$$

Eq. 5-20

$$\bar{s}_{y0} = \pm \frac{s_{y0}}{\sqrt{n}}$$

c) Transformação com seis Parâmetros

Essa opção efetua a transformação dos sistemas de coordenadas através de uma Transformação Afim, como anteriormente citado. Dessa forma, tem-se seis incógnitas (seis parâmetros de transformação), como cada ponto nos fornece duas equações, necessitam-se para a resolução do sistema linear de três pontos de coordenadas conhecidas nos dois sistemas.

Os pontos das grelhas escolhidos para a realização dessa transformação foram os pontos do canto superior direito, superior esquerdo e inferior direito.

Na Fig. 5-11 encontra-se um esquema dessa opção.

Figura 5-11: Opção de cálculo com transformação de seis parâmetros

1- Cálculo dos parâmetros de transformação:

Matriz dos coeficientes de transformação:

$$L = \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon_1 & \eta_1 \\ 1 & \varepsilon_{21} \text{ ou } 24 & \eta_{21} \text{ ou } 24 \\ 1 & \varepsilon_{504} \text{ ou } 576 & \eta_{504} \text{ ou } 576 \end{pmatrix}_{\mu \times \mu}$$

Vetores das observações da transformação:

$$l_x = \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_{21 \text{ ou } 24} \\ \tilde{x}_{504 \text{ ou } 576} \end{pmatrix}_{\mu \times 1}$$

$$l_y = \begin{pmatrix} \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_{21 \text{ ou } 24} \\ \tilde{y}_{504 \text{ ou } 576} \end{pmatrix}_{\mu \times 1}$$

Obs.: Os índices das coordenadas acima indicam o número do ponto. No caso do ponto do canto superior direito e do canto inferior esquerdo, as duas opções de numeração ocorrem devido ao fato de que para o scanner HP as grelhas possuem 504 pontos, enquanto que para os scanners SHARP e DSW as grelhas possuem 576 pontos, daí a diferença de numeração.

Cálculo dos vetores dos parâmetros:

$$a'_x = (L^T \cdot L)^{-1} \cdot (L^T \cdot l_x)$$

Eq. 5-21

$$a'_y = (L^T \cdot L)^{-1} \cdot (L^T \cdot l_y)$$

2- Cálculo dos fatores de transformação:

Utilizam-se as equações Eq. 5-6.

3- Cálculo das coordenadas deformadas transladadas:

Cálculo dos vetores das coordenadas:

$$x' = A \cdot a'_x$$

Eq. 5-22

$$y' = A \cdot a'_y$$

4- Cálculo dos vetores dos erros residuais:

$$v_{x'} = \tilde{x} - x'$$

Eq. 5-23

$$v_{y'} = \tilde{y} - y'$$

5- Cálculo da média dos erros residuais:

$$\bar{v}_{x'} = \frac{e^T \cdot v_{x'}}{e^T \cdot e}$$

Eq. 5-24

$$\bar{v}_{y'} = \frac{e^T \cdot v_{y'}}{e^T \cdot e}$$

6- Cálculo da precisão dos erros residuais:

Cálculo dos vetores dos desvios dos erros residuais::

$$d_{x'} = \bar{v}_x - v_{x'}$$

Eq. 5-25

$$d_{y'} = \bar{v}_y - v_{y'}$$

Cálculo das variâncias:

$$s_{x'b}^2 = \frac{d_{x'}^T \cdot d_{x'}}{n-1}$$

Eq. 5-26

$$s_{y'b}^2 = \frac{d_{y'}^T \cdot d_{y'}}{n-1}$$

Extraindo-se a raiz da Eq. 5-26 são obtidas as precisões:

$$s_{x'b} = \pm \sqrt{s_{x'b}^2}$$

Eq. 5-27

$$s_{y'b} = \pm \sqrt{s_{y'b}^2}$$

7- Cálculo da precisão da média dos erros residuais:

$$\bar{s}_{xb} = \pm \frac{s_{xb}}{\sqrt{n}}$$

Eq. 5-28

$$\bar{s}_{yb} = \pm \frac{s_{yb}}{\sqrt{n}}$$

d) Transformação com seis Parâmetros e com Ajustamento

Essa opção efetua a transformação dos sistemas de coordenadas através de uma Transformação Afim com superabundância de pontos. Foram utilizados no caso todos os pontos das grelhas.

Utilizando-se todos os pontos, temos $n=576$ pontos (24 linhas x 24 colunas) para os scanners SHARP e DSW e $n=504$ pontos (24 linhas x 21 colunas) para o scanner HP, pois como esse scanner possui formato A4, as três últimas colunas não foram numerizadas. Com essa superabundância de pontos, é necessário utilizar uma metodologia de ajustamento.

Foi adotado o MMQ, utilizando-se a metodologia de ajustamento de observações indiretas ou mediatas através da obtenção das equações de erros.

Na Fig. 5-12 encontra-se um esquema dessa opção.

Figura 5-12: Opção de cálculo com transformação de seis parâmetros e com ajustamento

Primeiramente para a aplicação do MMQ, deve-se obter as equações de erros:

Para as coordenadas x:

Fórmula geral da equação de erros,

$$\text{Eq. 5-29} \quad x_i + v_{x_i} = a_1 + a_2 \cdot \varepsilon_i + a_3 \cdot \eta_i$$

Para várias repetições,

$$\begin{aligned} x_1 + v_{x_1}^- &= a_{11} + a_{12} \cdot \varepsilon_1 + a_{13} \cdot \eta_1 \\ &\dots \\ &\dots \\ x_n + v_{x_n}^- &= a_{n1} + a_{n2} \cdot \varepsilon_n + a_{n3} \cdot \eta_n \end{aligned}$$

Eq. 5-30

Ajustando os parâmetros,

$$\bar{x}_i = \bar{a}_1 + \bar{a}_2 \cdot \varepsilon_i + \bar{a}_3 \cdot \eta_i$$

Eq. 5-31

Para as coordenadas y:

Fórmula geral da equação de erros,

$$y_i + v_{y_i}^- = a_4 + a_5 \cdot \varepsilon_i + a_6 \cdot \eta_i$$

Eq. 5-32

Para várias repetições,

$$\begin{aligned} y_1 + v_{y_1}^- &= a_{14} + a_{15} \cdot \varepsilon_1 + a_{16} \cdot \eta_1 \\ &\dots \\ &\dots \\ y_n + v_{y_n}^- &= a_{n4} + a_{n5} \cdot \varepsilon_n + a_{n6} \cdot \eta_n \end{aligned}$$

Eq. 5-33

Ajustando os parâmetros,

$$\bar{y}_i = \bar{a}_4 + \bar{a}_5 \cdot \varepsilon_i + \bar{a}_6 \cdot \eta_i$$

Eq. 5-34

Formuladas as equações de erros, pode-se iniciar os cálculos.

1- Cálculo dos vetores dos parâmetros ajustados:

Temos que:

$$\bar{x} = A \cdot \bar{a}_x$$

Eq. 5-35

$$v_x^- = \tilde{x} - \bar{x}$$

Eq. 5-36

Substituindo Eq. 5-36 em Eq. 5-35, obtemos:

$$\text{Eq. 5-37} \quad v_{\tilde{x}} = \tilde{x} - A \cdot \bar{a}_x$$

Aplicando o MMQ:

$$\text{Eq. 5-38} \quad F = [v_{\tilde{x}}^T \cdot v_{\tilde{x}}]$$

Substituindo a Eq. 5-38 em Eq. 5-37, obtemos::

$$\text{Eq. 5-39} \quad F = (\tilde{x} - A \cdot \bar{a}_x)^T \cdot (\tilde{x} - A \cdot \bar{a}_x)$$

Que deve tender para o ponto de mínimo

Desenvolvendo a Eq. 5-39, derivando e igualando a zero, encontramos os vetores dos parâmetros ajustados:

$$F = \tilde{x}^T \cdot \tilde{x} - \bar{a}_x^T \cdot A^T \cdot \tilde{x} - \bar{a}_x^T \cdot A^T \cdot \tilde{x} + \bar{a}_x^T \cdot A^T \cdot A \cdot \bar{a}_x$$

$$\frac{\partial F}{\partial \bar{a}_x} = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial \bar{a}_x} = -A^T \cdot \tilde{x} - A^T \cdot \tilde{x} + 2 \cdot A^T \cdot A \cdot \bar{a}_x$$

$$-2 \cdot A^T \cdot \tilde{x} + 2 \cdot A^T \cdot A \cdot \bar{a}_x = 0$$

$$A^T \cdot A \cdot \bar{a}_x = A^T \cdot \tilde{x}$$

Desenvolvendo de maneira similar para y, obtemos as equações abaixo:

$$\bar{a}_x = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot (A^T \cdot \tilde{x})$$

Eq. 5-40

$$\bar{a}_y = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot (A^T \cdot \tilde{y})$$

2- Cálculo dos fatores de transformação:

Utilizam-se as equações Eq. 5-6.

3- Cálculo das coordenadas deformadas transformadas ajustadas:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= A \cdot \bar{a}_x \\ \bar{y} &= A \cdot \bar{a}_y\end{aligned}$$

Eq. 5-41

4- Cálculo dos vetores dos erros residuais:

$$\begin{aligned}v_x^- &= \tilde{x} - \bar{x} \\ v_y^- &= \tilde{y} - \bar{y}\end{aligned}$$

Eq. 5-42

5- Cálculo das médias dos erros residuais:

$$\bar{v}_x^- = \frac{e^T \cdot v_x^-}{e^T \cdot e}$$

Eq. 5-43

$$\bar{v}_y^- = \frac{e^T \cdot v_y^-}{e^T \cdot e}$$

6- Cálculo da precisão dos erros residuais (ou precisão a posteriori da observação padrão):

Cálculo da variância:

$$s_{x0}^2 = \frac{v_x^{-T} \cdot v_x^-}{n - \mu}$$

Eq. 5-44

$$s_{y0}^2 = \frac{v_y^{-T} \cdot v_y^-}{n - \mu}$$

Extraindo-se a raiz da Eq. 5-44 são obtidas as precisões:

$$s_{x_0}^- = \pm \sqrt{s_{x_0}^2}$$

Eq. 5-45

$$s_{y_0}^- = \pm \sqrt{s_{y_0}^2}$$

7- Cálculo da precisão da média dos erros residuais:

$$\bar{s}_{x_0}^- = \pm \frac{s_{x_0}^-}{\sqrt{n}}$$

Eq. 5-46

$$\bar{s}_{y_0}^- = \pm \frac{s_{y_0}^-}{\sqrt{n}}$$

8- Cálculo da precisão das coordenadas deformadas ajustadas:

Matriz dos cofatores dos parâmetros:

$$Q_{aa} = \begin{pmatrix} q_{a_1} & \dots & q_{a_1 a_\mu} \\ \dots & \dots & \dots \\ q_{a_1 a_\mu} & \dots & q_{a_\mu} \end{pmatrix}_{\mu \times \mu}$$

Matriz dos cofatores das observações:

$$Q_{ll} = \begin{pmatrix} q_{x_1} & \dots & q_{x_1 x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ q_{x_n x_1} & \dots & q_{x_n} \end{pmatrix}_{n \times n}$$

Matrizes das variâncias e covariâncias dos erros residuais:

$$K_{xx} = \begin{pmatrix} s_{x1}^2 & \dots & s_{x1x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ s_{x_nx_1} & \dots & s_{x_n}^2 \end{pmatrix}_{n \times n}$$

$$K_{yy} = \begin{pmatrix} s_{y1}^2 & \dots & s_{y1} s_{y_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ s_{y_n} s_{y_1} & \dots & s_{y_n}^2 \end{pmatrix}_{n \times n}$$

Cálculo da matriz dos cofatores dos parâmetros:

$$\text{Eq. 5-47} \quad Q_{aa} = (A^T \cdot A)^{-1}$$

Cálculo da matriz dos cofatores das observações:

$$\text{Eq. 5-48} \quad Q_{ll} = A \cdot Q_{aa} \cdot A^T$$

Cálculo das matrizes das variâncias e covariâncias das observações:

$$\text{Eq. 5-49} \quad K_{xx} = s_{x0}^2 \cdot Q_{ll}$$

$$K_{yy} = s_{y0}^2 \cdot Q_{ll}$$

Finalmente, extraindo-se a raiz dos valores da diagonal da Eq. 5-49 são obtidas as precisões:

$$\text{Eq. 5-50} \quad s_{x_i} = \pm \sqrt{s_{x_i}^2}$$

$$s_{y_i} = \pm \sqrt{s_{y_i}^2}$$

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos da metodologia de calibração de scanners proposta. A apresentação desses resultados obedecerá a mesma sequência metodológica descrita no capítulo anterior.

6.1. GRELHA DE CALIBRAÇÃO GRÁFICA

6.1.1. Material de Suporte e Gravação da Grelha

A qualidade de gravação do fotoploter mostrou-se satisfatória, não apresentando falhas como na gravação em vidro através da técnica Riston. Também, em comparação com a técnica de gravação em vidro, permitiu espessuras de linhas bem mais finas.

6.1.2. Leitura das Coordenadas Calibradas

Conforme descrito anteriormente, foram realizadas três leituras das coordenadas para cada grelha gráfica (25 μm e 89 μm) e a média dessas leituras foram utilizadas como as coordenadas calibradas (consideradas como valores reais).

6.2. NUMERIZAÇÃO DAS GRELHAS GRÁFICAS

Conforme mencionado no capítulo anterior, a grelha gráfica foi numerizada numa resolução de 500x500 dpi para o scanner HP, 300x300 dpi para o scanner SHARP e 1016x1016 dpi para o scanner DSW.

Obviamente, para fins experimentais seria ideal que as resoluções tivessem sido iguais nos três scanners testados, porém isso não foi possível devido aos motivos anteriormente descritos. Também, como o objetivo principal do presente trabalho era propor um modelo matemático de calibração e não propriamente avaliar scanners (que exigiriam testes bem mais completos), esse fato não tem maior relevância.

É importante destacar que a limpeza periódica da placa de numerização dos scanners é de grande importância, pois dessa maneira evitam-se possíveis ruídos nas imagens digitais obtidas; ruídos esses que prejudicariam posteriormente o funcionamento do algoritmo de leitura automática das coordenadas da grelha digital, já que o mesmo poderia confundir manchas com intersecções de linhas.

6.3. SCS - MÓDULO I

Através do Módulo I do SCS foram obtidas as coordenadas deformadas. A seguir os resultados da utilização desse módulo serão apresentados e discutidos.

Os resultados obtidos pela grelha gráfica de espessura de 25 μm não foram favoráveis, pois houve o aparecimento de muitas linhas descontínuas que impediram o perfeito funcionamento do algoritmo. Na Fig. 6-1 podemos observar em detalhe essa descontinuidade em uma das grelhas digitais obtida a partir da grelha gráfica de espessura de 25 μm .

Figura 6-1: Detalhe da grelha de calibração digital
(Scanner SHARP - Grelha de esp. de 25 μm)

No caso da grelha gráfica de espessura de 89 μm , os resultados obtidos foram mais favoráveis. Porém, conforme foi citado no capítulo anterior,

houve a necessidade de estruturar o Módulo I de maneira que o mesmo pudesse ler diferentes espessuras de linhas na grelha digital. Dessa forma, a opção de 3 pixels foi utilizada para o scanner HP (resolução de numerização de 500x500 dpi) e a opção de 4 pixels para o scanner DSW (resolução de digitalização de 1016x1016 dpi). Observando as Fig. 6-2 e 6-3, podemos verificar as espessuras de linhas nas respectivas grelhas digitais.

Figura 6-2: Detalhe da grelha de calibração digital
(Scanner HP - Grelha de esp. de 89 μm)

Figura 6-3: Detalhe da grelha de calibração digital
(Scanner DSW - Grelha de esp. de 89 μm)

Para o scanner SHARP (resolução de numerização de 300x300 dpi), provavelmente devido a sua resolução menor, ocorreu o aparecimento de linhas com apenas um pixel de espessura, além de algumas linhas também descontínuas, impedindo dessa forma o funcionamento do algoritmo. Para solucionar esse problema, foi necessário realizar manualmente as leituras das coordenadas deformadas; o software utilizado para essas leituras foi o Microsoft Paint. Na Fig. 6-4 encontramos um detalhe dessa grelha, onde podemos notar a espessura de um pixel na linha vertical.

Figura 6-4: Detalhe da grelha de calibração digital
(Scanner SHARP - Grelha de esp. de 89 μm)

Conforme observamos pelos resultados acima apresentados, houve a ocorrência de problemas de compatibilidade entre a espessura das linhas na imagem digital e o algoritmo de leitura. Para tentar evitar esse tipo de problema, surgiu ao longo da pesquisa a proposta de estimar, aproximadamente, quantos pixels de espessura uma determinada grelha gráfica geraria em sua respectiva imagem digital.

Primeiramente, calcula-se através da Eq. 6-1 o tamanho que cada pixel terá na imagem digital, conforme a sua resolução de numerização. Como geralmente essa resolução é a mesma tanto para o eixo x como para o eixo y , os pixels obtidos serão quadrados.

$$\text{Eq. 6-1} \quad \text{tam.}(\mu\text{m}) = \frac{25400}{\text{res.}(\text{dpi})}$$

Conhecendo-se o tamanho do pixel na imagem digital, podemos calcular agora, de forma aproximada, através da Eq. 6-2, quantos pixels determinada espessura de linha na grelha de calibração gráfica irá gerar em sua respectiva imagem numérica.

$$\text{Eq. 6-2} \quad \text{esp. dig. (pixels)} = \frac{\text{esp. gra. } (\mu\text{m})}{\text{tam. } (\mu\text{m})}$$

Logicamente, devido a uma série de fatores, nem sempre esse cálculo aproximado irá coincidir com os resultados experimentais. Por exemplo, na Tab. 6-1, encontramos o número de pixels para as diferentes grelhas digitais.

Tabela 6-1: Espessura das linhas em pixels nas grelhas digitais

Resolução (dpi)	Espessura da grelha gráfica (μm)	
	25	89
500 x 500 (HP)	0,5 (*)	1,8
	1 a 2 (**)	2 a 3
300 x 300 (SHARP)	0,3	1,1
	1 (com falhas)	1 a 2
1016 x 1016 (DSW)	1,0	3,6
	1 (com falhas)	3 a 4

(*) Cálculo teórico

(**) Resultado experimental

Conforme observamos na Tab. 6-1, esse cálculo fornece uma aproximação razoável dos valores encontrados experimentalmente. Nota-se que no caso do valor calculado ser inferior a um pixel, ocorre na prática o aparecimento de falhas nas linhas. Dessa forma, esse cálculo preliminar pode evitar problemas posteriores de incompatibilidade entre a espessura das linhas na grelha digital com o algoritmo de leitura.

Outro problema que também veio a ocorrer no processo de leitura das coordenadas deformadas nas grelhas digitais, foi a ocorrência de ruídos, oriundos provavelmente de sujeira ou manchas na placa de numerização. Para contornar esse problema, ao definir os quadros de leitura na grelha digital, adotou-se como procedimento padrão, limitá-los sempre à largura de uma linha, pois apesar desse procedimento gastar um maior tempo de operação, foram evitados dessa maneira possíveis erros de leituras.

Outro ponto a ser discutido é o tempo de processamento gasto para a leitura automatizada das grelhas; esse tempo, obviamente, é influenciado pela resolução da imagem. Por exemplo, o tempo gasto na leitura da imagem de 1016 dpi (scanner DSW) foi de aproximadamente 3 horas, enquanto que no caso da imagem de 500 dpi (scanner HP) tivemos um tempo aproximado de 1h20min; mesmo considerando que o número de pontos lidos para o scanner DSW fosse superior (576 pontos) em relação ao do scanner HP (504 pontos), a diferença de tempo é bem significativa. O processador utilizado nos cálculos do Módulo I e do Módulo II foi um Pentium 133 MHz.

6.4. SCS - MÓDULO II

O Módulo II do SCS realiza a transformação do sistema de coordenadas deformadas para o sistema de coordenadas calibradas. A seguir os valores obtidos para cada opção de cálculo serão apresentados e discutidos.

6.4.1. Resultados do Cálculo sem a Transformação de Coordenadas

Essa opção de cálculo objetivou simplesmente verificar a grandeza do erro bruto do processo de numerização, sem nenhum tipo de correção. Na Tab. 6-2, são encontrados os erros residuais e as respectivas precisões obtidas.

Tabela 6-2: Erros residuais e precisões em milímetros obtidas sem a transformação das coordenadas (grelha de espessura de 89 μm)

	HP	SHARP	DSW
MÁX v_{ε_i}	-115,514	-128,239	-107,534
MIN v_{ε_i}	-119,069	-131,775	-118,811
$\bar{v}_{\varepsilon}$	-117,261	-129,545	-113,170
MÁX v_{η_i}	-113,748	105,770	114,715
MIN v_{η_i}	-346,842	-356,020	-337,776
$\bar{v}_{\eta}$	-116,556	-125,234	-111,537
s_{ε_0}	$\pm 0,941$	$\pm 0,634$	$\pm 2,716$
s_{η_0}	$\pm 138,619$	$\pm 138,670$	$\pm 135,932$
$\bar{s}_{\varepsilon_0}$	$\pm 0,042$	$\pm 0,026$	$\pm 0,113$
$\bar{s}_{\eta_0}$	$\pm 6,175$	$\pm 5,778$	$\pm 5,664$

Conforme esperado, os erros residuais e as respectivas precisões são elevados. Esse fato é devido, principalmente, as diferenças de origem do sistema de coordenadas calibradas (planicomp) em relação ao sistema de coordenadas deformadas (imagem digital). O valor elevado da precisão no eixo y , indica que esse eixo nas coordenadas deformadas possui sentido inverso ao das coordenadas calibradas.

Como comentado anteriormente, nessa opção não existe a possibilidade de exibição dos vetores dos erros residuais devido a diferença de origem dos sistemas.

6.4.2. Resultados do Cálculo da Transformação com dois Parâmetros

Essa opção de cálculo possibilitou a exibição dos vetores dos erros residuais entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas, pois foi realizada uma translação das coordenadas deformadas, de maneira que esse sistema passou a ter a mesma origem das coordenadas calibradas. Os parâmetros e os fatores de transformação obtidos nesta opção encontram-se na Tab. 6-3.

Tabela 6-3: Parâmetros e fatores de transformação obtidos com a transformação das coordenadas utilizando-se dois parâmetros (grelha de espessura de 89 μm)

	HP	SHARP	DSW
a_1	-119,163	-130,729	-118,811
a_2	1	1	1
a_3	0	0	0
a_4	115,194	124,22	114,979
a_5	0	0	0
a_6	-1	-1	-1
T_x (mm)	-119,163	-130,729	-118,811
T_y (mm)	115,194	124,22	114,979
α (rad)	0	0	0
α (graus dec.)	0	0	0
α (graus sex.)	0	0	0
e (rad)	0	0	0
e (graus dec.)	0	0	0
e (graus sex.)	0	0	0
K_x	1	1	1
K_y	-1	-1	-1

Conforme observamos na Tab. 6-3, os dois fatores utilizados nessa transformação, obviamente, foram os fatores de escala. Também é observado que o parâmetro a_6 é negativo, pois dessa forma coloca o eixo y das coordenadas deformadas no mesmo sentido ao das coordenadas calibradas.

Na Tab. 6-4 encontramos os valores dos erros residuais e as respectivas precisões.

Tabela 6-4: Erros residuais e precisões em milímetros obtidas com a transformação das coordenadas utilizando-se dois parâmetros (grelha de espessura de 89 μm)

	HP	SHARP	DSW
MÁX v_{x_i}	3,649	2,490	11,277
MIN v_{x_i}	0,094	-1,046	0,000
$\bar{v}_x$	1,902	1,184	5,641
MÁX v_{y_i}	2,949	2,731	2,336
MIN v_{y_i}	0,042	-0,012	-8,505
$\bar{v}_y$	1,484	1,369	-3,086
s_{x0}	$\pm 0,941$	$\pm 0,634$	$\pm 2,716$
s_{y0}	$\pm 0,793$	$\pm 0,696$	$\pm 2,667$
$\bar{s}_{x0}$	$\pm 0,042$	$\pm 0,026$	$\pm 0,113$
$\bar{s}_{y0}$	$\pm 0,035$	$\pm 0,029$	$\pm 0,111$

É observado, na Tab. 6-4, que com a translação a média dos erros diminuíram e a precisão para o eixo y foi corrigida, através da inversão de sentido desse eixo. A precisão encontrada antes da transformação completa das coordenadas é de $\pm 0,941$ mm em x e $\pm 0,793$ mm em y para o scanner HP, $\pm 0,634$ mm em x e $\pm 0,696$ mm em y para o scanner SHARP e $\pm 2,716$ mm em x e $\pm 2,667$ mm em y para o scanner DSW.

Esses resultados preliminares não podem ser utilizados para avaliar se um scanner é mais preciso do que o outro. Pois, existe ainda o erro de rotação, ortogonalidade e de escala; portanto, essa comparação somente pode ser feita após a correção desses outros fatores de transformação.

Nas Fig. 6-5 a 6-7 são exibidos os vetores de erros residuais entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas transladadas. A extremidade com a marca "o" dos vetores é a coordenada calibrada e a outra extremidade é a coordenada deformada transladada. Esses vetores permitem verificar visualmente, a direção do deslocamento das coordenadas calibradas após a numerização pelos diferentes modelos de scanners testados.

Figura 6-5: Vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas transladadas para o scanner HP (grelha de espessura de 89 μm)

Figura 6-6: Vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas transladadas para o scanner SHARP (grelha de espessura de 89 μm)

Figura 6-7: Vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas transladas para o scanner DSW (grelha de espessura de 89 μm)

Observa-se nas figuras anteriores, que para os scanners HP e SHARP as distorções ocorrem praticamente na mesma direção, enquanto que no scanner DSW, os deslocamentos possuem também uma homogeneidade, porém apresentam duas direções diferentes.

6.4.3. Resultados do Cálculo da Transformação de Coordenadas utilizando-se seis Parâmetros sem Ajustamento

Nessa opção de cálculo todos os fatores de transformação são corrigidos, utilizando-se o número mínimo de pontos necessários. Na Tab. 6-5, encontramos os parâmetros e os fatores de transformação obtidos.

Tabela 6-5: Parâmetros e fatores de transformação obtidos com a transformação das coordenadas utilizando-se seis parâmetros (grelha de espessura de 89 μm)

	HP	SHARP	DSW
a'_1	-119,179	-130,843	-118,874
a'_2	1,0022	1,0017	1,03897
a'_3	0,0131113	0,00912601	0,0119851
a'_4	115,17	124,08	114,993
a'_5	0,01311160	0,00888201	0,0106476
a'_6	-0,998431	-0,997829	-1,03838
T'_x (mm)	-119,179	-130,843	-118,874
T'_y (mm)	115,17	124,08	114,993
α' (rad)	-0,01308207	-0,0088667	-0,01024787
α' (graus dec.)	-0,74954748	-0,50802471	-0,58715958
α' (graus sex.)	- 44' 58,4"	- 30' 28,9"	- 35' 13,8"
e' (rad)	-0,00004908	-0,00027891	-0,00129373
e' (graus dec.)	-0,00281195	-0,01598019	-0,07412552
e' (graus sex.)	- 10,1"	- 57,5"	- 4' 26,4"
K'_x	1,00228576	1,00173938	1,03902456
K'_y	-0,99851708	-0,99787069	-1,0384483

Na Tab. 6-6 são encontrados os valores dos erros residuais e as respectivas precisões.

Tabela 6-6: Erros residuais e precisões em milímetros obtidas com a transformação das coordenadas utilizando-se seis parâmetros (grelha de espessura de 89 μm)

ÍTEM	HP	SHARP	DSW
MÁX $v_{x'_i}$	0,292	0,287	0,113
MIN $v_{x'_i}$	-0,099	-2,691	-0,045
$\bar{v}_{x'}$	0,168	-0,065	0,014
MÁX $v_{y'_i}$	0,257	0,318	0,067
MIN $v_{y'_i}$	-0,079	-0,166	-0,068
$\bar{v}_{y'}$	0,004	0,100	-0,002
$s_{x'_0}$	$\pm 0,065$	$\pm 0,140$	$\pm 0,020$
$s_{y'_0}$	$\pm 0,052$	$\pm 0,086$	$\pm 0,024$
$\bar{s}_{x'b}$	$\pm 0,003$	$\pm 0,006$	$\pm 0,001$
$\bar{s}_{y'b}$	$\pm 0,002$	$\pm 0,004$	$\pm 0,001$

Conforme é observado na tabela anterior, a média dos erros diminuíram e as precisões melhoraram. O scanner que apresentou as melhores precisões após a transformação foi o scanner DSW, seguido pelo scanner HP e por último o scanner SHARP.

Nas Fig. 6-8 a Fig. 6-10, são exibidos os vetores de erros após a transformação, onde a extremidade com a marca "o" do vetor é a coordenada calibrada e a outra extremidade é a coordenada deformada transformada.

Figura 6-8: Vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas transformadas para o scanner HP (grelha de espessura de 89 μm)

Figura 6-9: Vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas transformadas para o scanner SHARP (grelha de espessura de 89 μm)

Figura 6-10: Vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas transformadas para o scanner DSW (grelha de espessura de $89\ \mu\text{m}$)

É observado nas figuras anteriores, que a homogeneidade inicial das direções dos vetores de erros não é mais mantida após a transformação das coordenadas, surgindo uma aleatoriedade na distribuição dessas direções. Porém, no caso do scanner HP, em uma grande área da grelha essa homogeneidade permanece.

6.4.4. Resultados do Cálculo da Transformação das Coordenadas utilizando-se seis Parâmetros com Ajustamento

Essa opção de cálculo realizou a transformação de coordenadas com ajustamento, isto é, utilizou um número maior de pontos do que o necessário.

Conforme já citado anteriormente, foram utilizados todos os pontos das grelhas nesse cálculo, procurando assim obter parâmetros mais próximos

dos valores reais. Outra vantagem dessa opção, além de uma melhor precisão dos erros residuais, é a obtenção da precisão dos parâmetros e das coordenadas deformadas ajustadas, permitindo dessa forma avaliar a adequação do modelo matemático de calibração adotado. Na Tab. 6-7 encontram-se os parâmetros, os fatores de transformação ajustados e as respectivas precisões.

Tabela 6-7: Parâmetros e fatores de transformação obtidos com a transformação das coordenadas utilizando-se seis parâmetros com ajustamento (grelha de espessura de 89 μm)

	HP	SHARP	DSW
$\bar{a}_1$	$-119,055 \pm 0,007$	$-130,762 \pm 0,014$	$-118,862 \pm 0,002$
$\bar{a}_2$	$1,00231 \pm 0,00005$	$1,00075 \pm 0,00007$	$1,03892 \pm 0,00001$
$\bar{a}_3$	$0,0133944 \pm 0,0000396$	$0,00892857 \pm 0,00007375$	$0,0120476 \pm 0,0000119$
$\bar{a}_4$	$115,198 \pm 0,006$	$124,042 \pm 0,007$	$115,001 \pm 0,002$
$\bar{a}_5$	$0,0129784 \pm 0,0000379$	$0,00971651 \pm 0,0000369$	$0,0107101 \pm 0,0000137$
$\bar{a}_6$	$-0,998522 \pm 0,000033$	$-0,997587 \pm 0,000037$	$-1,03853 \pm 0,00001$
$\bar{T}_x \text{ (mm)}$	$-119,055 \pm 0,007$	$-130,762 \pm 0,014$	$-118,862 \pm 0,002$
$\bar{T}_y \text{ (mm)}$	$115,198 \pm 0,006$	$124,042 \pm 0,007$	$115,001 \pm 0,002$
$\bar{\alpha} \text{ (rad)}$	$-0,01294777 \pm 0,00003781$	$-0,00970892 \pm 0,0003688$	$-0,01030851 \pm 0,00001319$
$\bar{\alpha} \text{ (graus dec.)}$	$-0,74185231 \pm 0,0016646$	$-0,55628031 \pm 0,00211279$	$-0,59063430 \pm 0,00075549$
$\bar{\alpha} \text{ (graus sex.)}$	$-44' 30,7'' \pm 8,8''$	$-33'22,6'' \pm 7,6''$	$-35' 26,3'' \pm 2,7''$
$\bar{e} \text{ (rad)}$	$-0,00046566 \pm 0,00005022$	$0,0007590 \pm 0,0000523$	$-0,00129160 \pm 0,00001633$
$\bar{e} \text{ (graus dec.)}$	$-0,02668014 \pm 0,00287728$	$0,04348724 \pm 0,00299675$	$-0,07400296 \pm 0,00093548$
$\bar{e} \text{ (graus sex.)}$	$-01' 36,0'' \pm 10,4''$	$-02' 36,6'' \pm 10,8''$	$-04' 26,4'' \pm 3,4''$
$\bar{K}_x$	$1,00239402 \pm 0,00005001$	$1,00079717 \pm 0,0000700$	$1,0389752 \pm 0,0000100$
$\bar{K}_y$	$-0,99861173 \pm 0,0053318$	$-0,99762667 \pm 0,01089892$	$-1,03859901 \pm 0,00214075$

Observa-se na tabela anterior, que os fatores de ortogonalidade e obtidos são pequenos para os três scanners.

Os fatores de escala obtidos são, em módulo, aproximadamente iguais a 1,000 para os scanners HP e SHARP; já para o scanner DSW são iguais a aproximadamente 1,039.

Como o fator de ortogonalidade é pequeno e os fatores de escala iguais a aproximadamente 1,000 para os scanners HP e SHARP, talvez uma transformação com apenas quatro parâmetros poderia ser aplicada no caso desses scanners. Esse teste fica como sugestão para trabalhos futuros.

As precisões encontradas para os parâmetros ajustados possuem valores bem pequenos, demonstrando a boa adequação do modelo de transformação adotado. Comparando as precisões dos três scanners, o scanner DSW apresentou os melhores valores, seguido pelo scanner HP e por último o scanner SHARP.

Na Tab. 6-8, encontramos os valores dos erros residuais e as respectivas precisões.

Tabela 6-8: Erros residuais e precisões em milímetros obtidas com a transformação das coordenadas utilizando-se seis parâmetros com ajustamento (grelha de espessura de 89 μm)

ÍTEM	HP	SHARP	DSW
MÁX $v_{x_i}^-$	0,125	0,275	0,090
MIN $v_{x_i}^-$	-0,283	-2,528	-0,058
$\bar{v}_x^-$	0,000	0,001	0,000
MÁX $v_{y_i}^-$	0,254	0,169	0,063
MIN $v_{y_i}^-$	-0,081	-0,195	-0,049
$\bar{v}_y^-$	0,000	0,000	0,000
$s_{x_0}^-$	$\pm 0,061$	$\pm 0,123$	$\pm 0,019$
$s_{y_0}^-$	$\pm 0,051$	$\pm 0,061$	$\pm 0,022$
$\bar{s}_{x_0}^-$	$\pm 0,003$	$\pm 0,005$	$\pm 0,001$
$\bar{s}_{y_0}^-$	$\pm 0,002$	$\pm 0,003$	$\pm 0,001$
MAIOR $s_{x_i}^-$	$\pm 0,007$	$\pm 0,009$	$\pm 0,002$
MAIOR $s_{y_i}^-$	$\pm 0,006$	$\pm 0,007$	$\pm 0,002$

Como primeira observação em relação aos resultados apresentados na Tab. 6-8, nota-se que a média dos erros é aproximadamente igual a zero, como pede o modelo matemático dos Mínimos Quadrados.

Os resultados exibidos na Tab. 6-8, mostram que o scanner que apresentou as melhores precisões após o ajustamento foi o scanner DSW, com precisão

de $\pm 19 \mu\text{m}$ em x e $\pm 22 \mu\text{m}$ em y , seguido pelo HP com precisão de $\pm 61 \mu\text{m}$ em x e $\pm 51 \mu\text{m}$ em y e por último o SHARP com precisão de $\pm 123 \mu\text{m}$ em x e $\pm 61 \mu\text{m}$ em y . Nota-se que houve uma distorção significativamente maior no eixo x em relação ao eixo y para o scanner SHARP.

Era esperado que o scanner SHARP apresentasse uma precisão ligeiramente superior ao do scanner HP, já que o mesmo é utilizado em processos fotogramétricos e o scanner HP é um scanner "DTP" comum. Talvez a resolução de numerização de 300 dpi utilizada para o scanner SHARP tenha tido influência nessa precisão inferior em relação ao scanner HP (no qual foi utilizada uma resolução de 500 dpi).

As precisões dos erros residuais melhoraram cerca de $4 \mu\text{m}$ em x e $1 \mu\text{m}$ em y para o scanner HP; $17 \mu\text{m}$ em x e $25 \mu\text{m}$ em y para o scanner SHARP; e $1 \mu\text{m}$ em x e $2 \mu\text{m}$ em y para o scanner DSW. Nota-se que para o scanner SHARP o ajustamento contribuiu sensivelmente para a melhora de sua precisão

Nas duas últimas linhas da Tab. 6-8 são exibidos os maiores valores obtidos para as coordenadas deformadas ajustadas. Para o scanner HP esse valor é de $\pm 7 \mu\text{m}$ em x e $\pm 6 \mu\text{m}$ em y , para o scanner SHARP é de $\pm 9 \mu\text{m}$ em x e $\pm 7 \mu\text{m}$ em y e para o scanner DSW é de $\pm 2 \mu\text{m}$ em x e em y . Mais uma vez o scanner DSW apresentou os melhores resultados, seguido pelo scanner HP e por último o scanner SHARP. Esses resultados concordam, obviamente, com as precisões encontradas para os parâmetros e para os erros residuais.

Nas Fig. 6-11 a Fig. 6-13, são exibidos os vetores de erros após a transformação e o ajustamento, onde a extremidade com a marca "o" do vetor é a coordenada calibrada e a outra extremidade é a coordenada deformada transformada e ajustada.

Figura 6-11: Vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas ajustadas para o scanner HP (grelha de espessura de 89 µm)

Figura 6-12: Vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas ajustadas para o scanner SHARP (grelha de espessura de 89 μm)

Figura 6-13: Vetores de erros entre as coordenadas calibradas e as coordenadas deformadas ajustadas para o scanner DSW (grelha de espessura de $89\ \mu\text{m}$)

Conforme ilustra as figuras anteriores, a aleatoriedade da distribuição das direções dos vetores de erros aumentou com o ajustamento. Eliminando, inclusive, aquela extensa região da grelha com distribuição uniforme que ocorreu para o scanner SHARP na opção de cálculo anterior.

6.4.5. Comentários Finais

A superioridade do scanner DSW, um scanner fotogramétrico de alta precisão era esperada, quando comparada a de scanners "DTPs" como o SHARP ou o HP (a precisão alcançada pelo mesmo foi cerca de três vezes melhor em relação ao HP, o segundo colocado). Também foi o único scanner que apresentou uma precisão inferior às dimensões de $40\ \mu\text{m}$ da marca-índice do restituidor analítico utilizado no processo experimental. Outro ponto de destaque em relação a esse scanner é que a precisão alcançada em x e y foram praticamente iguais.

Outro resultado fundamental é que, após a transformação e o ajustamento, a precisão foi drasticamente melhorada em todos os scanners. Por exemplo, no caso do DSW, a precisão em x melhorou de $\pm 2,716$ mm para ± 19 μ m e em y de $\pm 2,667$ mm para ± 22 μ m. Esse fato demonstra que o modelo matemático adotado mostrou-se adequado ao processo de calibração. Dessa maneira, os resultados obtidos demonstram que a transformação das coordenadas e o respectivo ajustamento, constituem numa etapa indispensável para a fotogrametria digital.

Finalizando, podemos acrescentar que o processamento de um elevado número de pontos, como no caso da transformação com ajustamento, não provocou nenhum tipo de problema no funcionamento do Módulo II do SCS.

7. CONCLUSÕES

Relembrando os objetivos propostos do presente trabalho:

1. Dar uma visão geral dos processos analíticos de orientação fotogramétrica e da Fotogrametria Digital.
2. Descrever os processos de numerização via scanners.
3. Propor uma técnica de calibração de scanners.

O item 1 da lista acima foi suprido nos Capítulos 2 e 3, onde é descrito o processo analítico de orientação fotogramétrica e a fotogrametria digital, respectivamente. Já o item 2 foi abrangido no Capítulo 4, onde os scanners e o processo de numerização são apresentados e discutidos.

Com referência ao item 3, a metodologia adotada e os resultados obtidos encontram-se nos Capítulos 5 e 6 e em relação aos mesmos, podem-se apresentar as seguintes conclusões:

- A técnica de gravação Riston em vidro não se mostrou satisfatória nas condições experimentais.
- A técnica de gravação através de fotoplotagem em filme Base 7 mostrou-se satisfatória nas condições experimentais.
- A grelha gráfica de espessura de 25 μm não é adequada ao algoritmo de leitura automática nas condições experimentais.
- A grelha gráfica de espessura de 89 μm é adequada ao algoritmo de leitura automática, nas condições experimentais.
- O algoritmo do Módulo I do SCS funciona adequadamente, desde que a espessura média das linhas da grelha digital seja igual a três ou quatro pixels.
- As grelhas gráficas, após a digitalização, sofreram deformações geométricas nos três scanners avaliados, exigindo portanto a calibração.

- O scanner que apresentou as melhores precisões após a calibração, nas condições experimentais, foi o scanner DSW, seguido pelo scanner HP e por último o scanner SHARP.
- O modelo matemático adotado para a calibração de scanners mostrou-se satisfatório nas condições experimentais.
- O fator de ortogonalidade e encontrado após o ajustamento é pequeno nos três scanners. Os fatores de escala são aproximadamente iguais a 1,0 para os scanners HP e SHARP, indicando que talvez uma transformação com apenas 4 parâmetros poderia ser aplicada no caso deles.
- A transformação de coordenadas com ajustamento é recomendável, pois minimiza os erros e conseqüentemente melhora as precisões. Também o ajustamento permite calcular as precisões dos parâmetros de transformação e das coordenadas deformadas ajustadas.

Podemos apresentar as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar o filme Base 7 quanto a sua estabilidade ao longo do tempo.
- Testar diferentes espaçamentos de reticulados na grelha de calibração gráfica.
- Desenvolver novos algoritmos de leitura automática, que possuam uma maior flexibilidade frente a diferentes espessuras de linhas na grelha de calibração digital.
- Avaliar a precisão do algoritmo de leitura automática.
- Desenvolver novos algoritmos de leitura automática que tenham uma melhor performance quanto à velocidade de processamento, por exemplo, algoritmos que identifiquem e saltem um determinado número de linhas na grelha digital, de maneira que seja percorrida somente as linhas próximas as que contenham pixels pretos.
- Testar modelos matemáticos lineares com quatro parâmetros e modelos não lineares com sete parâmetros e comparar com os resultados de um modelo linear de seis parâmetros.
- Desenvolver testes específicos de avaliação de scanners, onde sejam testadas diferentes resoluções de digitalização. Nesses testes, as grelhas gráficas poderiam ser numerizadas mais de uma vez no mesmo scanner e repetir os mesmos testes em diferentes exemplares do mesmo modelo de scanner.
- Testar outros scanners utilizados em fotogrametria digital existentes no mercado, quanto as distorções geométricas provocadas pelos mesmos.
- Testar scanners de rolo e/ou de tambor utilizados para a numerização de mapas.
- Desenvolver softwares que após a obtenção dos parâmetros de calibração, possam corrigir as deformações geométricas do processo de numerização numa imagem fotogramétrica qualquer, criando dessa forma uma "imagem digital calibrada".

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERTZ, J. & KREILING, W. 1980. *Manual fotogramétrico de bolsillo*. Ed. Herbert Wichmann Verlag Karlsruhe. Berlin y Berneck. 280 p.
- AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. 1996. *Manual of Photogrammetry*. ISPR. 1200 p.
- AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. 1980. *Manual of Photographic Interpretation..* ISPR. 850 p.
- ANDERSON, P. S. 1982. *Fundamentos para fotointerpretação* Vol. 1. Sociedade Brasileira de Cartografia. Rio de Janeiro. 136 p.
- ANDRADE, D. F. P. N. de. 1988. *Fotogrametria Básica*. Instituto Militar de Engenharia - IME. Rio de Janeiro. 218 p.
- ARAGÃO et al.. 1997. *Introdução ao MiniTab for Windows*. UFSCar / Dep. de Estatística. 45p.
- BALTSAVIAS, E. 1996. *DeskTop Publishing Scanner*. In: OEEPE - Workshop on Application of Digital Photogrammetric Workstations, Official Publication n° 3, Part 1 Scanning. p. 75-94.
- BETHEL, J. S. 1995. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Geometric alignment and calibration of a photogrammetric image scanner. 50 (2): 37-42.
- BROWN, J. & DOLD, J. 1995. *V-STARs - A System for digital industrial Photogrammetry*. In: Optical 3D Measurement Techniques Congress, Vienna 2.-4.
- CAMPOS, I. de O. 1994. *Análise de Técnicas para o estabelecimento de Modelos Digitais de Terrenos - DTM*. Dissertação de Mestrado. USP/ EESC, São Carlos. 72 p.

- CHATTERJEE, S. & PRICE, B. 1977. *Regression Analysis by Example*. Ed. John Wiley & Sons. New York. 228 p.
- CHAPUIS, A. & WALKER, S. s/d. *Nouveautés en Photogrammetrie Numerique, Description du Flux des Donnees d'un Systeme Photogrammetrique Tut Numerique*. Leica AG, Unterentfelden. 6 p.
- DIAS, W., R. 1994. *Aplicações de Videografia para a Produção Econômica de Bases Cartográficas Raster/Vector*. In: I Congresso e Feira para usuários de Geoprocessamento, Curitiba.
- COSTA NETO, P. de O.. 1977. *Estatística*. Ed. Edgrad Blücher. S. Paulo. 264 p.
- DVP GEOMATIC SYSTEMS INC. 1993. *Manuais Técnicos*. Université Laval, Québec, Canadá. s/p.
- FAGUNDES, P. M. & TAVARES, P. E. DE M. 1991. *Fotogrametria*. IME / UERJ. 379 p.
- GONZAGA, A. 1994. *Fundamentos de Digitalização de Imagens*. EESC/USP Dep. Engenharia Elétrica. Notas de aula.
- HELAVA ASSOCIATES, INC. 1992. *Digital Scanning Workstation - DSW-100D*. System Specification 3/92. 10 p.
- HELAVA ASSOCIATES, INC. 1992. *Digital Scanning Workstation - DSW-100*. System Specification 2/92. 9 p.
- HELAVA ASSOCIATES, INC. 1992. *Digital Stereo Image Workstation - HAI-500*. System Performance Specification. 8 p.
- INGESAND, H. 1993. *Wild NA 2000*. Technical Paper. Leica AG, Heerbrugg. Suíça. 17 p.
- LOCH, C. & LAPOLLI, E. M. 1985. *Elementos Básicos da Fotogrametria e sua Utilização Prática*. Ed. da UFSC. Florianópolis. 86 p.
- KRAUS, K. & WALDHÄUSL, P. 1993. *Photogrammetry*. FERD. Dümmler Verlag 4ª ed. Bonn. 397 p.
- KÖLBL, O. 1985. *Cours de Photogrammetrie I et II*. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne. Institut de Photogrammetrie.
- KÖLBL, O. & BACH, U. 1994. *Tone Reproduction of Photographic Scanners*. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne. Institut de Photogrammetrie. 17 p.
- KÖLBL, O. 1996. *Preliminary Results of the OEEPE Scanner Test*. In: OEEPE - Workshop on Application of Digital Photogrammetric Workstations, Official Publication n° 3, Part 1 Scanning. p. 43-49.

- KÖLBL, O. 1996. *An Overview on Commercial Software Products for Digital Aerial Triangulation*. In: OEEPE - Workshop on Application of Digital Photogrammetric Workstations, Official Publication n° 3, Part 2 Aerial Triangulation. p. 120-128.
- MARCHETTI, D. A. B. & GARCIA, G. J. 1980. *Princípios de Fotogrametria e Fotointerpretação*. Ed. Nobel, São Paulo. 257p.
- MELLO, H. M. C. F. & CINTRA, J. P. 1993. *Erros Associados a Digitalização de Mapas*. In: Conferência Latino-Americana sobre Sistemas de Informação Geográfica, IV Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento, São Paulo. Anais. São Paulo, EPUSP. p. 29-46.
- MÜLLER, W. & CHAPUIS, A.. 1992. *ISPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Geometric alignment and calibration of a photogrammetric image scanner. 29 (part B2): 113-119.
- PAREDES, E. A. 1986 *Introdução à Aerofotogrametria para Engenheiros*. Vol. I. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq / Conselho Estadual de Ciência e Tecnologia - CONCITEC, Brasília/Maringá. 493 p.
- PEIXOTO, R. S. S. L. 1997. *Utilização de Sistemas de Informações Geográficas para gerenciamento de cidades de pequeno porte*. Dissertação de Mestrado, EESC/USP. 173 p.
- PETRIE, G. & KENNIE, J. J. M. 1990. *Engineering Surveying Technology*. Ed. Black and Son Ltd. Glasgow.
- QUINTANILHA, J. A.. *Processamento de imagens digitais*. In: Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento. São Paulo, 1990. Geoprocessamento. São Paulo, EPUSP, 1990. p. 37-52.
- RIBEIRO, C. L. S. & CINTRA, J. P. 1991. *A Evolução da Restituição Fotogramétrica*. In: Seminário sobre Computação Gráfica em Arquitetura, Engenharia e Construções. Anais. São Paulo. COBRACOM.
- SCARIM, J. L. & TEIXEIRA, A. L. A. 1994. *Fator Gis*. Digitalização e conversão Raster/Vector de mapas. n° 6, p. 16.
- SILVA, I. 1994. *Perspectiva da Fotogrametria Digital*. In: I Congresso e Feira para usuários de Geoprocessamento, Curitiba.
- SILVA, I. 1993. *Instrumentos Topográficos Modernos - Topografia Moderna*. USP/EESC. 8 p.
- SILVA, I. 1992. *Técnicas de Tratamento de Imagens para Vetorização de Fotos Aéreas*. USP/EESC. 8 p.

SILVA, I. 1990. *Methodologie pour le Lissage et le Filtrage des Données Altimétriques Derivées de la Corrélation d'Images*. Tese de Doutorado, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suíça. 204 p.

WOLF, P. R. 1983. *Elements of Photogrammetry*. Ed. MacGraw-Hill, 2.^a ed. 627 p.