

Fotogrametria digital



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Reitor

Nival Nunes de Almeida

Vice-reitor

Ronaldo Martins Lauria



EDITORA DA UNIVERSIDADE DO
ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Conselho Editorial

Augusto José Maurício Wanderley

César Benjamin

Donaldo Bello de Souza

Evanildo Bechara

Francisco Manes Albanesi Filho

Lúcia Bastos (*presidente*)

Fotogrametria digital

Luiz Coelho
Jorge Nunes Brito



Rio de Janeiro
2007

Copyright © 2007, dos autores
Todos os direitos desta edição reservados à Editora da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. É proibida a duplicação ou reprodução deste volume, ou de parte do mesmo, sob quaisquer meios, sem autorização expressa da editora.



EdUERJ
Editora da UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
Rua São Francisco Xavier, 524 – Maracanã
CEP 20550-013 – Rio de Janeiro/RJ
Tel./Fax: (21) 2587-7788/7789
www.eduerj.uerj.br
eduerj@uerj.br

Editora Executiva
Assessoria de Comunicação
Coordenador de Publicações
Coordenadora de Produção
Coordenador de Revisão
Revisão

Projeto Gráfico/Diagramação
Capa
Apoio Administrativo

Lúcia Bastos
Sandra Galvão
Renato Casimiro
Rosania Rolins
Fábio Flora
Milena Campos Eich
Sabrina Primo
Gilvan F. Silva
Heloisa Fortes
Maria Fátima de Mattos
Rosane Lima

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/NPROTEC

B862 Brito, Jorge Luís Nunes e Silva.
Fotogrametria digital / Jorge Luís Nunes e Silva Brito, Luiz Carlos
Teixeira Coelho Filho – Rio de Janeiro: EdUERJ, 2007.
196 p.

ISBN 978-85-7511-114-7

1. Fotogrametria – Técnicas digitais. I Coelho, Luiz. I. Título

CDU 528.7:77.02

Sumário

Prefácio da primeira edição	7
Prefácio da segunda edição	9
Capítulo 1 – Introdução à fotogrametria digital	11
Capítulo 2 – Princípios básicos de fotogrametria	35
Capítulo 3 – Tópicos em processamento de imagens aplicados à fotogrametria	71
Capítulo 4 – Orientação interior	91
Capítulo 5 – Orientação exterior	107
Capítulo 6 – Fototriangulação analítica	123
Capítulo 7 – Retificação e normalização de imagens	143
Capítulo 8 – Geração de modelos numéricos de elevações	157
Capítulo 9 – Geração de ortoimagens	165
Capítulo 10 – Restituição fotogramétrica digital	175
Referências bibliográficas	191
Sobre os autores	195



Prefácio da primeira edição

Esta obra traduz o esforço e a motivação de um jovem engenheiro e promissor pesquisador, recém-graduado em Engenharia Cartográfica, cujo interesse pela fotogrametria digital transcendeu as atividades acadêmicas da disciplina homônima, que lhe foi ministrada no currículo de graduação do Instituto Militar de Engenharia (IME), em 2001.

Tendo partido de um conjunto de notas de aula preparadas, em 1999, pela equipe de professores da disciplina Fotogrametria Digital, no IME, a qual tive o privilégio de liderar, seu autor estendeu e consolidou os ensinamentos teórico-práticos recebidos em um projeto de fim de curso. Esse projeto teve, entre seus objetivos, a disponibilização do material didático que ora se apresenta, julgado de grande importância para o campo do conhecimento da engenharia cartográfica.

A obra está organizada em dez capítulos: “Introdução à fotogrametria digital”; “Princípios básicos de fotogrametria”; “Tópicos em processamento de imagens aplicados à fotogrametria”; “Orientação interior”; “Orientação exterior”; “Fototriangulação analítica”; “Retificação e normalização de imagens”; “Geração de modelos numéricos de elevações”; “Geração de ortoimagens”; e “Restituição fotogramétrica digital”.

Esses capítulos compõem o núcleo básico de assuntos relacionados à fotogrametria digital. Em sua elaboração, o autor procurou explicitar não apenas os princípios teóricos mas também a montagem das equações e algoritmos, além de realizar comparações entre métodos e resultados. Como resultados da estratégia empregada pelo autor, espera-se que a auto-aprendizagem possa ser obtida sem exigir do leitor qualquer conhecimento prévio sobre fotogrametria. Espera-se que o leitor que possua conhecimentos básicos sobre as ciências cartográficas possa, pelo texto, compreender a fotogrametria como um todo: seus princípios, conceitos e utilização atual.

Sem ter qualquer dúvida sobre a utilidade do presente material, não só pelo seu conteúdo mas, sobretudo, pela concatenação lógica dos conceitos apresentados e pela clareza da redação, expresso meu desejo de que os

conceitos nele contidos possam ser entendidos, avaliados e aprimorados pela maior quantidade possível de interessados.

Na oportunidade, agradeço ao autor a deferência do convite para a co-autoria da obra, o qual declinei, apesar de endossar-lhe o conteúdo, por não considerar justa a repartição do mérito pelo esforço e êxito alcançados por este jovem engenheiro. Satisfaço-me intelectualmente pelo privilégio de tê-lo orientado e por sua motivação para o estudo da fotogrametria.

Como última idéia, gostaria de apontar o autor como um exemplo a ser seguido pelas atuais e futuras gerações de engenheiros cartógrafos, certo de que muito terá a contribuir para o engrandecimento das ciências cartográficas em nosso país, haja vista o potencial até aqui demonstrado.

Jorge Luís Nunes e Silva Brito

Prefácio da segunda edição

Inicialmente, cabe um esclarecimento quanto à aparente inconsistência lógica entre o prefácio da primeira edição e a autoria da obra.

A intenção inicial era creditar a autoria exclusivamente ao engenheiro Luiz Coelho, o que se pode depreender pela leitura do prefácio da primeira edição. Contudo, o próprio Luiz Coelho não considerou justa a exclusão do nome de seu mentor da autoria da obra, que foi gerada a partir de um conjunto de notas de aula preparadas para a disciplina Fotogrametria Digital. Assim, revendo o prefácio da primeira edição, decidimos que os créditos de autoria seriam compartilhados entre o mestre e o discípulo. Desse modo, na capa da primeira edição, consta o nome dos dois autores, embora o prefácio faça menção apenas à autoria do engenheiro Luiz Coelho.

O presente texto, em sua atual versão, aperfeiçoou-se como parte de um projeto de pesquisa financiado pelo Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). O projeto de pesquisa ora em questão se denomina “Projeto e-foto: uma estação fotogramétrica digital”. O projeto e-foto prevê a implementação de uma solução de uma estação fotogramétrica digital para fins educacionais, de forma livre, habilitando o acesso a tal informação a quaisquer pessoas que o queiram.

Nesse contexto, fazia-se necessária a adoção de uma obra voltada à parte digital da fotogrametria, e a idéia de um *e-book* sobre o assunto, que acompanhasse os programas, começou a amadurecer.

Hoje, o subprojeto cresceu e englobou o projeto original, dada a popularidade que atingiu junto à comunidade fotogramétrica, por estar disponível gratuitamente no sítio do projeto – <http://www.efoto.eng.uerj.br>. Esta segunda edição apresenta algumas mudanças, que, na visão dos autores, eram necessárias para o aprimoramento do texto final.

A edição inicial foi toda feita em processador de texto comum, o que demandava um esforço maior para a execução do trabalho estético. Agora, esse trabalho é minimizado, concentrando maiores esforços na revisão, correção e elaboração de adendos à versão original. As ilustrações também

foram drasticamente alteradas. Quis-se padronizar as fontes e os estilos de traço, além de minimizar o uso da cor, visando à impressão da obra em oficina gráfica.

Grande parte das explicações foi revisada, e os já conhecidos apêndices foram incluídos como novos capítulos, seguramente incrementando esta nova versão.

Houve também uma maior preocupação com exemplos práticos e amostras em pseudocódigo de possíveis implementações das rotinas apresentadas. Não é segredo que os autores crêem que tecnologia fotogramétrica de qualidade pode ser gerada pela comunidade lusófona e entendem que muito mais importante é ensinar o que realmente se passa por trás das ferramentas comerciais, habilitando os estudantes a deixarem de ser meros utilizadores para se tornarem desenvolvedores (ou ao menos terem senso crítico na escolha de um ou outro *software* fotogramétrico).

Nesse escopo, esta obra passa a fazer parte de um conjunto de publicações que se direciona à teoria, modelagem matemática e implementação dos temas apresentados. O público-alvo para sua leitura é composto por engenheiros, matemáticos, cientistas da computação e demais profissionais das áreas de tecnologia e ciências exatas aplicadas. Outros profissionais, obviamente, podem usá-la; porém, na confecção dos textos, imaginou-se que o leitor já tivesse conhecimento prévio de disciplinas como Álgebra Linear, Probabilidade e Estatística, Introdução à Ciência da Computação, Matemática Computacional e Cálculo Numérico.

Ainda sobre o texto, convém citar que grande parte do capítulo 2 (que cobria o básico de sistemas sensores e processamento de imagens) da primeira edição foi suprimida, por questões de encadeamento lógico, sendo suas informações disseminadas nos demais capítulos.

Antes de finalizar, ficam aqui os agradecimentos à comunidade fotogramétrica lusófona pelo apoio e suporte para seguirmos adiante. Infelizmente, as idiossincrasias luso-brasileiras ainda nos impedem de ter um texto único para a utilização dos dois grupos.

*Jorge Luís Nunes e Silva Brito
Luiz Carlos Teixeira Coelho Filho*

Capítulo 1

Introdução à fotogrametria digital

1.1. Fotogrametria: conceito inicial

Para um leigo no assunto, fica difícil expressar com segurança o que vem a ser fotogrametria. Etimologicamente, a palavra fotogrametria (cujos radicais vêm do grego: *photon* [luz], *graphos* [escrita] e *metron* [medições]) significa medições executadas através de fotografias. Muitas abordagens e discussões sobre o tema foram desenvolvidas ao longo do último século, tornando o assunto confuso para aqueles que estão iniciando nesse campo. Entretanto, o consenso geral define tal termo, grosso modo, como a *ciência* e *tecnologia* de se obter *informação confiável* por meio de *imagens* adquiridas por *sensores*:

- *ciência*: utiliza-se de métodos científicos para o estudo do funcionamento dos processos de captação da energia eletromagnética e análise dos registros advindos dos mesmos;
- *tecnologia*: lança mão do estado-da-arte da tecnologia para tornar tais processos mais rápidos e eficazes para os usuários;
- *informação confiável*: seja ela sob a forma de um mapa, lista de coordenadas, modelo tridimensional ou qualquer outro modo de representação geometricamente classificado dentro de tolerâncias de precisão e acurácia¹ (ou exatidão) desejáveis. Esses requintes variam de aplicação para aplicação, como, por exemplo, a identificação do desvio de uma viga de sustentação em uma usina nuclear (que tolera erros de ordem de milímetros ou menos) ou a confecção de uma carta em escala 1:250.000, na qual são tolerados erros da ordem de metros;

¹ Um bom livro de estatística poderá dar uma explicação mais aprofundada sobre precisão e acurácia (ou acuracidade). Grosso modo, a precisão está relacionada à dispersão dos dados, enquanto a acurácia (aportuguesamento da palavra inglesa *accuracy*) volta-se para a proximidade da média do conjunto de dados ao valor real ou verdadeiro de uma grandeza.

- *imagens ópticas*: podem ser definidas como a reprodução aparente de um objeto, formado por um sistema de lentes ou espelhos, a partir de ondas luminosas refletidas, refratadas ou difratadas (*Encyclopædia britannica*, 2001). Tal conceito pôde, durante anos, dar conta da definição para a imagem utilizada pela fotogrametria, pois os processos fotogramétricos concentravam-se somente nas imagens fotográficas, cobrindo a faixa do espectro visível (ou seja, ondas eletromagnéticas de 0,4 a 0,7 μm). Hoje, no entanto, diversos sensores são capazes de imagear as inúmeras regiões do espectro eletromagnético, gerando uma profusão de informação jamais imaginada. Assim, podemos definir como imagens utilizadas pela fotogrametria as representações das interações eletromagnéticas entre um ou mais objetos detectadas e registradas por um dado sensor, em um dado momento;
- *sensores remotos*: são quaisquer equipamentos capazes de transformar alguma forma de energia em um sinal passível de ser convertido em informação sobre o ambiente, sem contato físico entre esses sensores e os alvos de interesse – definição adaptada de Novo (1992). Como citado anteriormente, a energia utilizada nesse caso é a eletromagnética. Um exemplo simples de sensor comumente utilizado é a câmara² fotográfica, que usa a sensibilização química no filme para gerar suas imagens. Diversos tipos de câmaras digitais e sensores de varredura (utilizando *Charge Coupled Devices* – CCDs, detectores que convertem energia eletromagnética em corrente elétrica) também se encaixam nessa categoria.

Basicamente, essa definição tem um alto grau de correlação com inúmeras outras encontradas em livros e textos científicos sobre o tema. Entretanto, ela não se extingue nesse ponto, uma vez que o texto ainda é muito vago, deixando a um leitor inexperiente a nítida impressão de nada ter acrescentado a seus conhecimentos. Por isso, surgiram várias interpretações, melhor discutidas no tópico seguinte.

² No texto, procurou-se adotar a língua padrão. Por isso, a adoção do termo *câmara* (de *câmara escura*) em vez do empréstimo lingüístico *câmera*. Para fins práticos, ambos têm o mesmo significado.

1.2. Contradições e divergências quanto ao conceito de fotogrametria

Como já citado anteriormente, a fotogrametria sofreu um grande impacto com a possibilidade de obtenção de imagens multiespectrais (cobrindo diversas bandas do espectro eletromagnético), em geral, através de sensores digitais (como câmaras digitais e varredores), implicando uma total reestruturação do pessoal e dos aparatos empregados para processá-los.³ Paralelamente a essa revolução, novas plataformas passaram a portar tais tipos de sensores,⁴ havendo, notoriamente, a introdução de sensores orbitais (satélites e outros veículos espaciais). Essa nova ciência, então em ascensão, passou a ser chamada de *sensoriamento remoto*.

Inicialmente, as imagens tinham baixa resolução geométrica, ou seja, havia dificuldade em distinguir os inúmeros objetos imageados, ou, em termos leigos, falta de nitidez. Isso era causado pelo aumento ainda insuficiente dos sistemas de lentes e pela grande distância entre os satélites e a superfície, o que levava à impossibilidade de adaptação de tais imagens à estrutura já montada para processamento fotogramétrico, uma vez que os aparelhos eram projetados apenas para imagens tomadas de aviões segundo determinado padrão. Os sistemas computacionais de processamento de imagens digitais ainda eram rudimentares para solucionar as pesadas rotinas fotogramétricas, e não era possível a visualização estereoscópica das imagens. A fotogrametria, então, seguiu o curso anteriormente estabelecido, primando pela restituição de cartas ou mapas do terreno fotografado; deixou o estudo de tais imagens a cargo de um grupo de especialistas (geólogos, pedólogos, geógrafos, oceanógrafos, estatísticos etc.), que viu nelas a oportunidade de extração de informações para eles consideradas fundamentais.

Assim, a princípio, houve informalmente uma dicotomia entre fotogrametria e sensoriamento remoto (figura 1). Curiosamente, as associações que congregavam os profissionais de fotogrametria não seguiram essa divergência, abraçando também o estudo das imagens de sensores remotos. Um caso notório foi a troca do nome de American Society for Photogrammetry (ASP) para American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). Com a International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), acontecimento similar também ocorreu.

³ Uma descrição mais detalhada das gerações da fotogrametria e das diferenças entre elas pode ser encontrada no tópico 1.4, p. 19.

⁴ Há uma discussão sobre tais plataformas no tópico 1.3, p. 15.

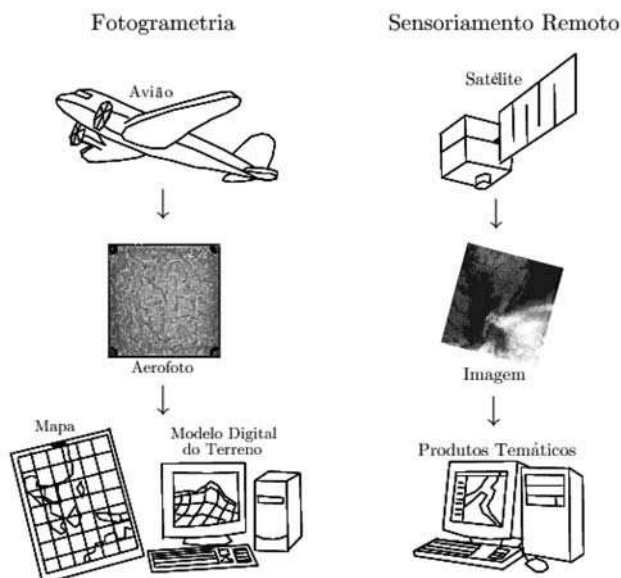


Figura 1: Dissensão inicial e errônea entre fotogrametria (plataformas aéreas, fotografias e produtos cartográficos) e sensoriamento remoto (plataformas orbitais, imagens digitais e vários tipos de produtos temáticos, como mapas geológicos ou florestais).

É óbvio que tais decisões não foram tomadas de maneira impensada. Os especialistas verificaram que não era coerente a divisão informal que vinha ocorrendo, uma vez que o que estava sendo chamado informalmente de sensoriamento remoto (imagens sensoriais adquiridas em nível orbital e formato digital) era uma ciência irmã do que se chamava (informalmente) de fotogrametria (imagens fotográficas adquiridas em nível de aeronave).

Como cabe a uma sociedade desse escopo, definições foram estabelecidas a fim de orientar os profissionais, estudantes e leigos quanto à abrangência e às funções de cada uma. Daí surgiram algumas interessantes contradições.

Um dos presidentes que a ASPRS teve, Thomas Lillesand, no livro do qual é co-autor, define sensoriamento remoto como a “ciência e arte de se obter informação sobre um objeto, área ou fenômeno através da análise dos dados adquiridos por um aparelho que não está em contato com o objeto, área ou fenômeno sob investigação” (Lillesand e Kiefer, 2000). Já a fotogrametria, o mesmo livro a define como a “ciência e tecnologia de se obterem medições e outros produtos geometricamente confiáveis a partir de fotografias”. A ISPRS, por sua vez, enuncia que

fotogrametria e sensoriamento remoto *é* a arte, ciência e tecnologia de se obter informação confiável de imagens de sensores imageadores e outros, sobre a Terra e seu meio ambiente, e outros objetos físicos e processos através de gravação, medição, análise e representação [convém ressaltar o *é*, no singular, que destaca a idéia de junção de ambos em um só conceito].

Uma leitura aprofundada das definições deixa muitas dúvidas no ar. Primeiramente, nenhuma delas coincide completamente com as outras, embora haja o reforço de que a fotogrametria tem um enfoque na obtenção de informação confiável. Uma conclusão precipitada poderia levar à idéia de que a fotogrametria é o “sensoriamento remoto confiável”. Mas o que é confiável? Remontando ao exemplo do tópico 1.1, no caso da usina nuclear, confiável implica precisão e acurácia de milímetros; no caso da carta 1:250.000, confiável implica precisão e acurácia de metros. Outro exemplo seria o de uma carta geológica, elaborada a partir de imagens de satélite. É confiável? Obviamente será, caso venha a ser realizada por pessoal especializado. Logo, é fotogrametria. Ou não?

A última das definições (ISPRS) é mais abrangente, não realizando uma separação de conceitos e, conseqüentemente, fugindo da discussão sobre confiabilidade das informações obtidas. Além disso, a definição dá uma idéia de que ambas as ciências estão fortemente relacionadas, como se fossem uma só.

Na verdade, nenhuma das definições está incorreta. Cada uma reflete uma visão diferente sobre o tema, que expressa diferentes perfis e diferentes épocas. A tendência hoje – sobretudo com o desenvolvimento da fotogrametria digital e de sensores orbitais compatíveis com a atividade fotogramétrica – é que a fotogrametria esteja inserida no contexto global do sensoriamento remoto, grosso modo definido como *ciência e tecnologia de aquisição de informação sobre um objeto sem contato direto entre este e o sensor*.

Mesmo assim, isso não define onde a fotogrametria atua dentro desse contexto ou, ainda, quais seriam seus objetivos. Estes serão objeto de estudo no próximo tópico.

1.3. Objetivo e classificações da fotogrametria

Poderíamos enumerar vários objetivos da fotogrametria: reduzir o trabalho de campo no levantamento de coordenadas de um ou vários objetos e

o tempo de obtenção de tais dados. Entretanto, o objetivo principal da fotogrametria pode ser enunciado como *a reconstrução de um espaço tridimensional, chamado de espaço-objeto, a partir de um conjunto não-vazio de imagens bidimensionais, chamado de espaço-imagem.*

Trata-se, então, de uma transformação entre sistemas: um *sistema bidimensional*, chamado sistema fotográfico, e um *sistema tridimensional*, que representa o próprio espaço-objeto. Normalmente, utiliza-se um sistema bidimensional próprio de cada câmara, com origem aproximadamente no centro de seu quadro, e de coordenadas determinadas por calibração da câmara em laboratório, antes de sua utilização. O sistema tridimensional, no caso mais comum, representa o sistema de coordenadas do terreno sobre o qual as imagens são obtidas, terreno que pode estar sendo representado em coordenadas geodésicas (latitude: λ , longitude: φ e altura: H ou altitude: $5h$), planialtimétricas do tipo transversa de Mercator (leste: E , norte N e altura: H ou altitude: h) ou cartesianas (X , Y e Z). Para outros tipos de alvo, como monumentos ou objetos pequenos, pode-se criar um sistema de referência próprio, de origem arbitrária.

Para que a transformação seja implementada, também é necessário um conjunto de *pontos de controle* (ou de campo), que são expressos no espaço-objeto. Uma vez locados no espaço-imagem, temos os parâmetros de entrada para a dedução da função que mapeia um sistema no outro. Quanto maior o número de pontos de controle, melhores são os resultados finais; porém, convém verificar até onde é economicamente viável a obtenção de tantos pontos de controle. Devido a isso, alguns processos (fototriangulação, por exemplo) foram desenvolvidos, de modo que, a partir de apenas alguns pontos de controle, possa ser gerada uma infinidade de outros, com precisões aceitáveis para que sejam utilizados como se de controle fossem.

Em resumo, crê-se na possibilidade de se estabelecer uma área de abrangência da fotogrametria, respondendo às perguntas propostas no tópico anterior da seguinte maneira (figura 2): *fotogrametria é a ciência e tecnologia de se reconstruir o espaço tridimensional, ou parte do mesmo (espaço-objeto), a partir de imagens bidimensionais, advindas da gravação de padrões de ondas eletromagnéticas (espaço-imagem), sem contato físico direto entre o sensor e o objeto ou alvo de interesse.*

⁵ A diferença entre altura e altitude reside no fato de a primeira estar referenciada a uma figura geométrica (elipsóide de revolução) e a última, a uma figura geofísica (geóide). A separação entre as duas chama-se desnível geoidal e pode ser calculada por métodos gravimétricos.

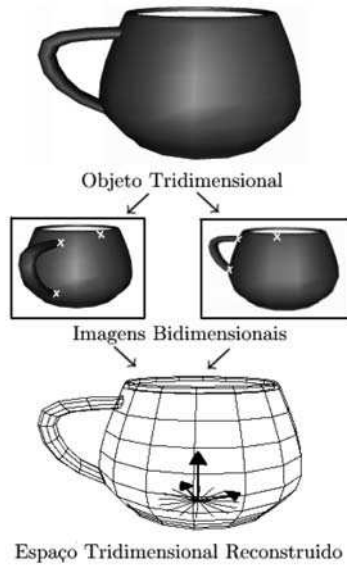


Figura 2: Representação esquemática da fotogrametria (os pontos de controle nas imagens estão marcados como cruzetas brancas).

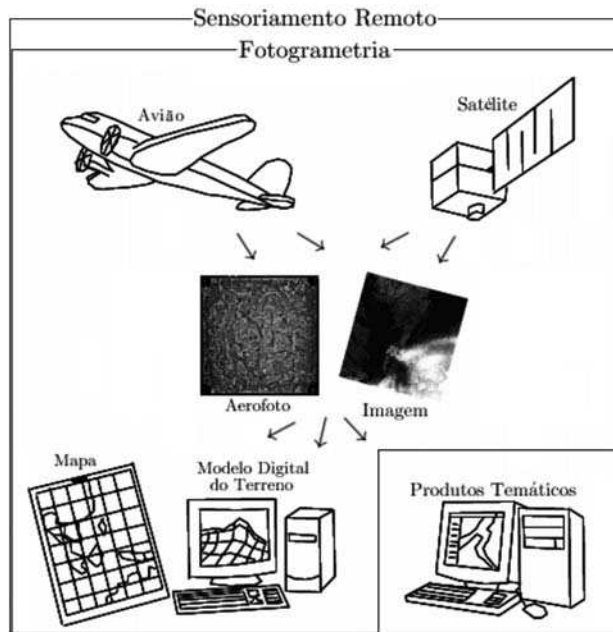


Figura 3: Visão atual de fotogrametria (imagens advindas de diversos sensores, em meio analógico ou digital, gerando produtos que representem o espaço-objeto). O sensoriamento remoto é mais abrangente, considerando a geração de outros tipos de produto, como mapas temáticos, imagens classificadas etc.

Por *espaço-objeto*, entende-se *qualquer objeto (ou conjunto deles) tridimensional a ser imageado*. Desse modo, o sensor pode estar localizado em qualquer plataforma (figura 3). Convencionou-se usar a classificação de *fotogrametria terrestre*, *fotogrametria aérea* (ou aerofotogrametria) e *fotogrametria orbital* para, grosso modo, expressar esses diferentes modos de posicionar o sensor. A fotogrametria terrestre tem uma gama de aplicações, como arquitetura, controle industrial, engenharia civil e artes plásticas. Já a aerofotogrametria é, tradicionalmente, a mais envolvida com a geomática. Por fim, a fotogrametria orbital é uma tendência para o futuro, já sendo empregada nos dias de hoje em escala crescente.

O número de imagens envolvidas é variável. É desejável que sejam ao menos duas (tomadas de ângulos diferentes), com área de superposição, a fim de viabilizar a visão estereoscópica (tridimensional), que possibilita maiores acurácias e precisões na restituição tridimensional do espaço-objeto (figura 4).

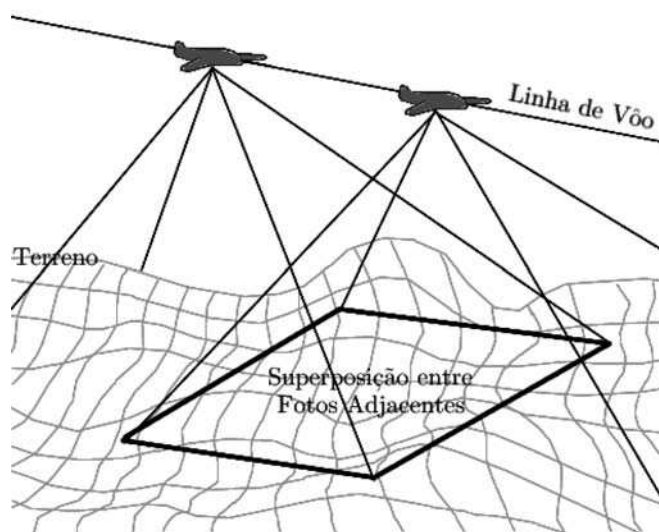


Figura 4: Tomada de imagens com região de adjacência a partir de fotos aéreas.

Outras classificações ainda poderiam ser propostas, como fotogrametria a curtas distâncias e a longas distâncias, ou aerofotogrametria com imagens verticais e com imagens oblíquas. Este, porém, não é o objetivo deste texto. A classificação histórica, por ser considerada de suma importância, será apresentada no tópico a seguir.

1.4. Breve histórico da fotogrametria

1.4.1. Fotogrametria pioneira (1840-1900)

Poucos anos após a descoberta da fotografia (graças aos trabalhos pioneiros de Nicéphore Niépce, em 1826, e Louis-Jacques Daguerre, em 1839), surgiram propostas, como a do francês Arago, em 1840, com o objetivo de aproveitá-la para os dispendiosos levantamentos topográficos. Infelizmente, mais alguns anos se passaram sem nada de concreto sobre o tema.

Em 1851, Aimé Laussedat desenvolveu os primeiros princípios e técnicas fotogramétricas, sendo seguido por trabalhos importantes de documentação de edifícios históricos, como os de Meydenbauer e Ernst Mach. A então nascente ciência recebeu seu primeiro livro teórico em 1889, o *Manual de fotogrametria*, de autoria do alemão C. Koppe.

Algumas fotografias aéreas foram até mesmo tiradas, sendo as mais notórias a de Nadar, ou Gaspard Félix Tournachon, sobre a cidade de Bièvre, na França, em 1858 (infelizmente, a imagem foi perdida), e a de James Wallace Black, sobre a cidade de Boston, nos Estados Unidos, em 1860. No entanto, somente com a invenção do avião tal situação viria a mudar sensivelmente.

1.4.2. Fotogrametria analógica (1901-1950)

A invenção do aparelho estereocomparador, por Pullfrich, marcou a primeira revolução da fotogrametria, por meio da qual foi possível facilitar surpreendentemente o trabalho dos usuários, graças à substituição dos inúmeros cálculos matemáticos por aparelhos óptico-mecânicos.

Em 1911, o austríaco Theodore Scheimpflug criou um método bem-sucedido de retificação de fotografias aéreas, iniciando um processo de utilização de tais fotografias para mapeamento de extensas superfícies. Os retificadores analógicos passaram a ser utilizados largamente, sendo posteriormente substituídos pelos famosos restituidores analógicos, que permitiam visão estereoscópica através do uso de um par estereoscópico – ou seja, um par de fotografias com área de superposição. Vários aparelhos, sobretudo os suíços e alemães, como os restituidores Wild (figura 5), Zeiss e Kern, possibilitavam a obtenção de cartas topográficas a precisões surpreendentes. Obviamente, essa função passou a ser altamente específica, tornando fundamental o trabalho do técnico em fotogrametria, uma vez que tais aparelhos necessitavam de treinamento específico e aprofundado.



Figura 5: Restituídor analógico Wild B-8 (fonte: UERJ).

O trabalho de campo também foi enormemente facilitado, com a introdução do processo da fototriangulação analógica, que permitia o adensamento em laboratório dos pontos de campo.

Paralelamente a esses desenvolvimentos, surgiram câmaras cada vez mais específicas para essa tarefa, chamadas de *câmaras métricas*, que dispunham de mecanismos para imprimir nas fotos informações relevantes quanto ao sistema de coordenadas de imagem, aumentando ainda mais a precisão das medições efetuadas. Um exemplo são as marcas fiduciais, que estão em todas as fotos e cujas coordenadas no sistema fotográfico são determinadas em laboratório.

Convém ressaltar que são desse período a criação e o fortalecimento de várias associações e entidades, congregando todos os interessados na área. A International Society for Photogrammetry (ISP), atual International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), foi fundada em 1910 por E. Dolezal, na Áustria.

1.4.3. Fotogrametria analítica (1951-1990)

A invenção do computador, nos anos 40, deu início a uma transformação nos processos fotogramétricos de então. A grande quantidade de cálculos necessários, que havia sido substituída pelos aparelhos mecânicos, passou a poder ser executada computacionalmente. O primeiro estudo nessa área foi desenvolvido em 1953, pelo Dr. Helmut Schmidt, do Laboratório de Pesquisa Balística, em Aberdeen, Maryland, Estados Unidos. Nesse estudo, foram estabelecidas as bases da fotogrametria analítica, incluindo-se o tratamento

matricial, as soluções por mínimos quadrados (um tipo de método estatístico), a solução simultânea utilizando múltiplas imagens e uma análise completa de propagação de erros.

Em 1957, o finlandês Uki Helava desenvolveu o conceito de restituidor analítico, utilizando servomecanismos para medir as coordenadas das marcas fiduciais de pontos homólogos nas imagens. Computadores realizavam todos os demais cálculos, simplificando bastante o processo final. Os primeiros restituidores analíticos foram apresentados no congresso da ISP (atual ISPRS) em 1976. A partir daí, tais aparelhos revolucionaram o conceito de fotogrametria, permitindo a fototriangulação de blocos (conjuntos de fotos) cada vez maiores e a utilização de câmaras comuns (não-métricas).

1.4.4. Fotogrametria digital (1990-hoje)

A fotogrametria digital surgiu nos anos 80, tendo como grande inovação a utilização de imagens digitais como fonte primária de dados. A imagem digital pode ser adquirida diretamente de uma câmara digital, ou mesmo através da digitalização matricial de uma imagem analógica, submetendo-a a um *scanner*. Nos anos 90, esse ramo da fotogrametria realmente pôde ser usado de maneira extensiva, graças ao desenvolvimento de computadores com capacidade suficiente para o processamento interativo de imagens digitais, gerando elevados volumes de dados.

O restante do processamento se dá de maneira semelhante à fotogrametria analítica, sendo possível, hoje em dia, a elaboração de produtos digitais (além das cartas digitais) que necessitam de processamento computacional extremamente elaborado, como as ortoimagens ou imagens ortorretificadas (imagens em perspectiva ortogonal) e os mosaicos digitais, que consistem na junção de várias imagens. Esses mosaicos são considerados não-controlados, se não houver tratamento sobre as imagens, ou controlados, caso as imagens já houverem sido ortorretificadas.

Os aparelhos atualmente empregados também mudaram, sendo chamados de estações fotogramétricas digitais (ou seja, estações de trabalho inteiramente voltadas para a fotogrametria). Computadores comuns também podem ser aproveitados para esse fim, sendo chamados de computadores repotencializados por receberem *hardware* e *software* específicos.

Um comentário que se faz necessário neste ponto é quanto à diferença entre *fotogrametria digital* e *fotogrametria apoiada por computador* (ou, simplesmente, fotogrametria com uso de computadores). Com o objetivo de não perder a experiência de anos de trabalho de operadores habilidosos

e de aumentar a expectativa de vida dos ainda eficazes aviógrafos ou restituidores analógicos e analíticos, computadores foram ligados aos mesmos, possibilitando uma saída de dados digital, ou seja, em arquivos de computador, em geral em formato compatível com os variados programas de *Computer Aided Design* (CAD) existentes. Apesar disso, esses aparelhos não podem ser relacionados à fotogrametria digital, uma vez que a entrada de dados ainda se dá de modo analógico (fotografias impressas em filme). Mesmo o restituidor analítico, que realiza todo o restante do processamento de forma computacional, ainda as considera dados de entrada. Somente na fotogrametria digital tem-se uma análise computacional completa de todo o processo.

Esse assunto ainda pode causar muitas dúvidas. Para lançar alguma luz sobre ele, apresenta-se a tabela a seguir:

Tabela 1: Histórico da fotogrametria (adaptada de Augusto, 1999)

Fotogrametria	Entrada	Processamento	Saída
Analógica	Fotografia analógica (em filme)	Analógico (óptico-mecânico)	Analógica (<i>scribes</i> ou fotolitos) no passado ou digital (CAD, por exemplo) no presente
Analítica	Fotografia analógica (em filme)	Analítico (computacional)	Analógica (<i>scribes</i> ou fotolitos) no passado ou digital (CAD, por exemplo) no presente
Digital	Imagem digital (obtida de câmara digital, por exemplo) ou digitalizada (foto analógica submetida a um <i>scanner</i>)	Analítico (computacional)	Digital

1.5. Objetivo da fotogrametria digital

A fotogrametria digital tem como objetivo principal a reconstrução *automática* do espaço tridimensional (espaço-objeto), a partir de imagens bidimensionais (espaço-imagem).

Uma observação mais atenta ao parágrafo acima permite uma simples conclusão: a fotogrametria digital preocupa-se em automatizar a fotogrametria, sobretudo levando-se em conta que os equipamentos de informática hoje em dia possibilitam o rápido processamento da avalanche de dados que surge em consequência desses processos (figura 6). Ter-se-ia como ideal a criação de uma máquina de mapeamento automático, capaz de reconhecer automaticamente as feições do terreno (como prédios, pontes e outras construções) e extrair as formas do relevo da região a ser mapeada. O problema proposto, porém, não é tão simples assim, uma vez que não há um espaço tridimensional tão bem comportado. Pelo contrário, o relevo da superfície terrestre apresenta-se com inúmeras discontinuidades, o que torna praticamente impossível seu mapeamento automático. Surgem, então, diversas condições de contorno para sua solução, exigindo a interação do homem em vários processos. Atualmente, pode-se dizer que o estado-da-arte em fotogrametria digital é o mapeamento semi-automático, ou seja, os processos implementados tentam ser automáticos, mas ainda exigem a supervisão e eventual intervenção humana nos mesmos.

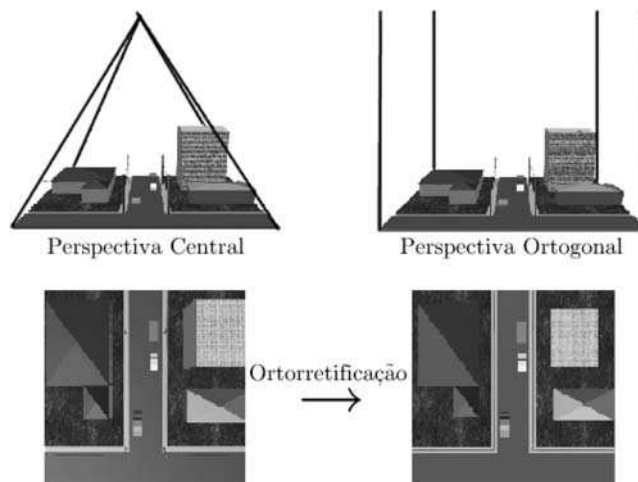


Figura 6: Processo da ortorretificação, que transforma uma imagem em perspectiva central em outra em perspectiva ortogonal. Graças à fotogrametria digital, processos matematicamente complexos como esse puderam ser implementados e popularizados. Hoje, ortoimagens têm alcançado níveis de popularidade próximos aos das cartas convencionais, e essa situação tende a perdurar.

1.6. A estação fotogramétrica digital

Como já mencionado anteriormente, o estado-da-arte da fotogrametria encontra-se no desenvolvimento de estações fotogramétricas digitais. Um sistema como este, em geral, é composto de:

- monitor(es) de vídeo;
- dispositivo de visão estereoscópica;
- óculos, monitores especiais etc.;
- CPU gráfica ou placa de vídeo especial;
- CPU geral;
- periféricos de entrada/saída: teclado, *mouse*, *scanner*, mesa digitalizadora, *plotter* e/ou impressora;
- dispositivo de medição estereoscópica: *trackball*, *topo-mouse* etc.;
- módulos de *software* dedicado às operações fotogramétricas, tais como: orientação interior, orientação relativa e orientação absoluta, ou orientação exterior (relativa e absoluta, simultaneamente), fototriangulação (medição e cálculo), restituição, retificação e reamostragem de imagens, extração de modelos digitais do terreno, geração de ortoimagens, integração com sistemas de informação geográfica etc.

O padrão atual de monitores de vídeo para esse tipo de aplicação encontra-se entre 19 e 21 polegadas. Algumas estações apresentam monitores de vídeo próprios, de dimensões diferentes das usuais, a fim de maximizar a visualização estereoscópica.

Quanto às máquinas utilizadas, há modelos de vários fabricantes. Estações Unix e Silicon Graphics já foram utilizadas amplamente. A tendência hoje é que sejam usados PCs com o sistema operacional Windows.

Os sistemas de visão estereoscópica apresentam soluções ainda mais variadas. Há quatro tipos principais:

- *separação espacial*: a tela do monitor exibe o par lado a lado e utiliza-se um estereoscópio de espelhos para visualizar as imagens estereoscopicamente;
- *anaglifo*: ambas as imagens são exibidas uma sobre a outra, mas em cores diferentes, necessitando de um óculos especial com uma lente de cada cor;
- *separação radiométrica*: semelhantes aos de anaglifo, apresentam polarizações da luz diferentes;

- *separação temporal*: exibem alternadamente as imagens do modelo a altas frequências.

Os sistemas comerciais mais modernos utilizam uma combinação do princípio da polarização (passiva, se a tela de polarização é montada no monitor, e ativa, se a tela de polarização é montada nos óculos) e da separação temporal.

Entre os fatos positivos do advento das estações fotogramétricas digitais e dos programas de fotogrametria digital, pode-se descrever a possibilidade de, mesmo sem o aparato completo descrito acima, serem executadas várias operações, embora de maneira não-otimizada. Outra vantagem é a concentração de todas as rotinas em um só computador, poupando espaço e ganhando versatilidade e tempo de operação. No passado, ao contrário, para cada uma das etapas que levavam à restituição do terreno, as fotos passavam de aparelho a aparelho, de especialista a especialista, em diferentes seções (e até em diferentes empresas). A entrada de dados também é muito mais facilitada, já que, como se utilizam rotinas genéricas, os *softwares* aceitam imagens de quaisquer formatos, inclusive de câmaras não-fotogramétricas (ou seja, cujas fotos não têm um sistema de coordenadas a elas atrelado). Os aparelhos restituidores anteriores só aceitavam fotos de determinado padrão, providas de câmaras de distâncias focais de valores constantes.

1.7. Exemplos de estações fotogramétricas digitais e *software* de fotogrametria digital

1.7.1. Z/I Imaging

A Z/I Imaging é uma companhia derivada da fusão entre a tradicional Carl Zeiss (Alemanha) e a Intergraph (Estados Unidos). Enquanto a primeira se consagrou no desenvolvimento de câmaras, restituidores analógicos, analíticos e estações fotogramétricas digitais ao longo do último século, a outra foi destaque no desenvolvimento das famosas estações ImageStation, muitíssimo aceitas e populares, apesar de seu elevado custo de aquisição e manutenção.

Com a criação do *jointventure* entre as duas, a linha de estações fotogramétricas digitais da Zeiss foi descontinuada, deixando espaço para a concentração de todos os esforços na área para a linha ImageStation.

O modelo mais recente de ImageStation é um computador extremamente sofisticado, com várias soluções únicas desenvolvidas pela Z/I. Compõe-se ao todo de:

- *mesa especial*, com altura da área de digitalização e área de suporte dos monitores controlados eletricamente;
- *controle hand-held*, para digitalização à mão livre e seleção de menus na ponta dos dedos;
- *gabinete* (localizado na parte inferior), onde fica localizado o computador e um espaço livre para que o usuário coloque seu material;
- *placa de vídeo* com acelerador gráfico;
- um ou dois *monitores* de 21 ou 24 polegadas;
- *dispositivo de visão estereoscópica* combinando polarização ativa e temporal nos óculos.

Uma solução mais modesta oferecida pela Z/I chama-se *Stereo Softcopy Kit – SSK* (figura 7). É formado pelo *hardware* e *software* necessários à emulação de uma estação ImageStation: óculos de visualização estereoscópica, *mouse* de precisão, placa de vídeo e programas fotogramétricos.

A título de curiosidade, a Z/I também vende uma versão do restituidor analítico Zeiss Planicomp, o Z/I Planicomp P3 (ou P33); figura 7. Justifica-se a fabricação desse aparelho devido à sua grande popularidade. O fato de tais máquinas estarem sendo fabricadas serve como prova cabal da aplicação, ainda hoje, de restituidores analíticos e analógicos repotencializados.



Figura 7: Da esquerda para a direita: estação fotogramétrica digital ImageStation, *kit* SSK e restituidor analítico Planicomp (fonte: <http://www.ziimaging.com>).

1.7.2. LH-Systems

LH-Systems é a divisão da Leica Geosystems (empresa suíça advinda da tradicionalíssima Wild Heerbrugg), especializada em fotogrametria. Ela apresenta uma solução em fotogrametria digital chamada SocetSet (figura 8), que se constitui de um conjunto de programas que executam obtenção de

atributos, triangulação e ortomosaicagem. Orima é o nome do pacote específico para fototriangulação, enquanto Pro-600 oferece restituição, com integração do sistema ao programa MicroStation, da empresa Bentley, muito conhecido pelos profissionais de cartografia.

Além disso, vêm junto aos *softwares* o chamado *topo-mouse* (um dispositivo de precisão para restituição) e óculos para visualização estereoscópica. O pacote SocetSet pode ser instalado em computadores sob Windows NT ou Unix.

A LH-Systems ainda mantém uma linha de restituidores analíticos, os SD2000/3000 (figura 8), e kits de repotencialização de restituidores analógicos.



Figura 8: Da esquerda para a direita: pacote SocetSet em uma estação Solaris e restituidor analítico SD 2000/3000 (fonte: <http://www.leica.com>).

1.7.3. ISM

A ISM é uma empresa canadense pioneira no segmento de fotogrametria digital. Seu produto principal nos dias de hoje é o conjunto de programas (*Digital image Analytical Plotter* – DiAP; figura 9), composto de um núcleo, chamado também de DiAP – responsável pelas orientações interior, relativa e absoluta e a restituição, com integração ao MicroStation –, e vários módulos adicionais, a saber:

- *DiAP ATM*: executa fototriangulação analítica por ajustamento de feixes;
- *DiAP AIM*: permite a automação de várias rotinas, como orientações e fototriangulação;

- *SysImage*: dá todo o suporte necessário para a realização de ortoimagens e ortomosaicos;
- *TIN/CIP*: geração de modelos digitais do terreno na estrutura *Triangular Irregular Network* [rede de triangulação irregular] (TIN) e quadrangulares (*grids*). O módulo TIN/CIP pode ser totalmente integrado com o SysImage;
- *Production Works*: edição vetorial (CAD)⁶ dos dados obtidos por DiAP. Também encontra-se em total integração com MicroStation;
- *DiAP Viewer*: permite a visualização estereoscópica dos modelos, após a orientação relativa, e a superposição de um arquivo CAD no formato MicroStation (DGN).⁷

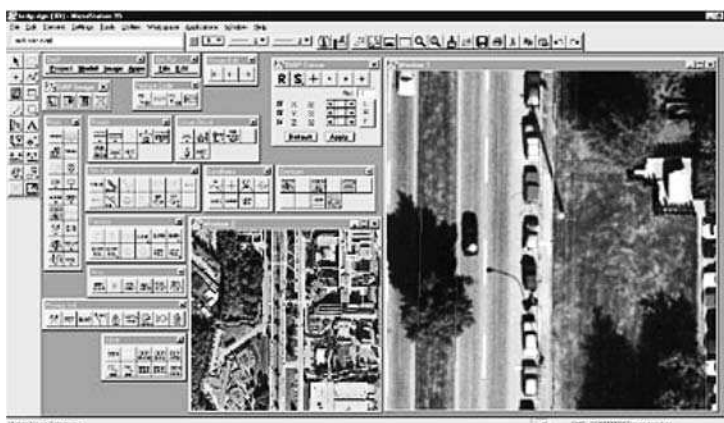


Figura 9: Captura de tela DiAP (fonte: <http://www.askism.com>).

1.7.4. KLT

A KLT é uma companhia norte-americana, de Massachusetts, que produz a linha fotogramétrica ATLAS (figura 10) para extração de informação do terreno.

A estação ATLAS Digital Stereoplotter é composta de um computador pessoal, manivelas para as mãos e pedal rotatório para os pés (de modo que imite a movimentação da marca flutuante nos antigos restituidores analógicos),

⁶ Como visto anteriormente, sigla para *Computer Aided Design*. Atualmente, as ferramentas de tipo CAD são bastante utilizadas em desenho para construção civil, mecânica e arquitetura, além da cartografia em si.

⁷ DGN: sigla para *MicroStation Design File*.

teclado e *mouse* especiais para a produção fotogramétrica. Como de hábito, executa as orientações interior e exterior estereoscópica (relativa e absoluta) e a fototriangulação analítica.

O pacote ATLAS provê a obtenção e a edição de mapas digitais a partir dos dados da ATLAS DSP. ATLAS TIN e Ortho são, por sua vez, responsáveis pela extração de modelos digitais do terreno e ortorretificação. Ainda há outros programas complementares executando correções do arquivo digital gerado, como polígonos abertos, linhas cruzadas e atributos indevidamente posicionados. Há também a opção de interpretação de vários formatos de arquivos digitais para assimilação ao sistema. Outras soluções para plotagem e digitalização manual estão disponíveis.

Um aspecto notável dessa estação é a sua existência ainda sob ambiente DOS. Tentando reverter essa situação, a KLT lançou uma versão para Windows do ATLAS, o WinATLAS, que, segundo o fabricante, permite o correto funcionamento do sistema ATLAS, mesmo os módulos ainda em DOS, sob Windows de 32 *bits*.

1.7.5. DAT/EM

Sediada no Alasca, Estados Unidos, a DAT/EM possui dois produtos principais na área de fotogrametria digital: Summit Evolution e Summit PC.

Summit Evolution é um conjunto de ferramentas e programas para execução de todas as tarefas fotogramétricas. O *kit* vendido pela DAT/EM contém os seguintes componentes:

- todos os programas do pacote Summit Evolution;
- programa Capture NT para MicroStation ou AutoCAD;
- automatização da edição vetorial dos mapas gerados pela estação;
- programas para permitir a visualização estereoscópica;
- placa de vídeo 3-D Labs Oxygen GVX 420;
- controle de mão para a movimentação da marca flutuante ou manivelas e pedal para a execução da mesma tarefa; Z-Screen (tela estereográfica) com três óculos passivos ou emissor Crystal Eyes com dois óculos ativos;
- teclado especial.

A DAT/EM recomenda um computador Pentium III dual com 512 MB de memória RAM e disco rígido de 32 GB, sob Windows NT 4.0, para executar essas tarefas com maior precisão.

A estação Summit PC (figura 10) é uma versão mais modesta e anterior à Summit Evolution. As funções básicas são as mesmas, mas esta tem a propriedade de medição *subpixel*, além do gerenciamento de projeto, não existente na outra versão. Obviamente, tais diferenças refletem no preço final, tornando uma mais barata do que a outra.



Figura 10: Da esquerda para a direita: estações ATLAS DSP, Summit Evolution e VinGeo Delta (fontes: <http://www.kltassoc.com>, <http://www.datem.com> e <http://www.vinnitsa.com/geo>).

1.7.6. VinGeo

A companhia ucraniana VinGeo (setor da Vinnitsa) produz a estação fotogramétrica Delta (figura 10), que prima por sua praticidade e simplicidade. Seu sistema de visualização utiliza estereoscópio de espelhos, e a marca flutuante pode ser movida apenas com o *mouse*, embora as tradicionais manivelas e pedais possam ser utilizados.

O *software* empregado permite a operação com estereomodelos ou imagens isoladas (utilizando um modelo digital do terreno) e concentra-se na restituição, extração de MDTs e suporte para integração com os programas de CAD existentes. Há outras soluções para fototriangulação e ortorretificação/ortomosaicagem.

1.7.7. DVP

A estação *Digital Video Plotter* – DVP (figura 11), da empresa de mesmo nome, é produto de um bem-sucedido projeto de pesquisa realizado na Universidade Laval, em Quebec, Canadá. Atualmente, é uma das estações mais baratas e versáteis. Sua versão completa é composta de orientação monoscópica ou estereoscópica, fototriangulação, vetorização (restituição) e geração de ortoimagens.

Sua versatilidade se manifesta de fato nas inúmeras configurações de *hardware* possíveis. Para visualização, duas opções: estereoscópio de espelhos e um monitor ou monitor com polarização ativa e óculos passivos, além de outro monitor de controle. Para controle da marca estereoscópica, pode-se usar o *mouse* comum, um *mouse* 3-D ou as tradicionais manivelas e pedais. O sistema propõe-se a calibrar qualquer tipo de *scanner*, desde os mais simples, de escritório, até os legítimos *scanners* fotogramétricos. Para executar essas tarefas, são exigidos no mínimo uma CPU Pentium 166, 64 MB de memória RAM e uma placa de vídeo de 4 MB. O sistema operacional pode ser qualquer Windows de 32 *bits*, sem a obrigatoriedade de que seja NT.

Como a faculdade de Engenharia Geomática da Universidade Laval insere-se no contexto do Departamento de Engenharia Florestal, estudos muito úteis foram desenvolvidos nessa área, provendo o DVP com ferramentas específicas para o planejamento ambiental/florestal e emprestando um atrativo a mais aos interessados em aplicações de tais campos do conhecimento.

Seguindo a tendência de utilização de imagens de satélite em fotogrametria, a estação DVP oferece ainda um conjunto de ferramentas para o processamento fotogramétrico de imagens Spot.



Figura 11: Diferentes configurações para o DVP (fonte: <http://www.dvp.ca>).

1.7.8. TopoL

A estação tcheca PhoTopoL, fabricada pela empresa TopoL, oferece módulos semelhantes aos das outras: orientações, ortorretificação, edição vetorial e visualização estereoscópica. Dentre as diferenças, destacamos a possibilidade de se executar a orientação exterior durante o ajustamento por feixes perspectivos e as diversas opções de visualização e movimentação da marca flutuante, também disponíveis no DVP.

1.7.9. VirtuoZo

A Supersoft, empresa chinesa baseada em atividades relacionadas à geomática, apresenta a estação fotogramétrica digital VirtuoZo NT. Também vinda de um projeto acadêmico, iniciado em 1978 pelo professor Zhi Zhuo Wang, hoje em dia é uma das estações mais complexas em desenvolvimento. É composta de mais de uma dezena de módulos e processa inúmeros tipos de imagem (Spot, aéreas e terrestres, coloridas ou não).

1.7.10. Autometric/Boeing

A Autometric foi uma das primeiras empresas a investir no mercado de fotogrametria digital. Atualmente, sua linha de desenvolvimento baseia-se em dois produtos: o *Kork Digital StereoPlotter* (KDSP), uma estação completa *hardware* e *software*, e o *SoftPlotter*, que se constitui apenas de programas para fotogrametria digital. Em termos de plataformas suportadas, esta é uma das versões mais completas, cobrindo cinco ao todo.

Mais informações sobre os produtos mencionados podem ser encontradas nas referências bibliográficas.

1.7.11. E-foto

A idéia do projeto e-foto é oferecer um conjunto simples de programas que possam ajudar os estudantes a compreender os princípios da fotogrametria. O projeto é baseado em dois pilares: liberdade e auto-aprendizado.

Seu objetivo final é levar os estudantes a entender por completo os princípios da fotogrametria – lendo o *e-book*, usando os programas, observando seu código fonte e até mesmo modificando-o ou desenvolvendo novos módulos sobre ele.

Esta obra faz parte do projeto e-foto como material didático adicional para o auto-aprendizado e o aprendizado assistido dos alunos. Para maiores

informações sobre o projeto, é interessante acessar sua página na *web*, em <http://www.efoto.eng.uerj.br>.

1.7.12. Programas diversos em fotogrametria

Há atualmente inúmeros programas que executam operações fotogramétricas, especialmente ortorretificação e reconstrução de modelos 3-D para fotogrametria à curta distância. Dentre os primeiros, destacam-se o Erdas Imagine e o PCI OrthoEngine, que admite realizar operações fotogramétricas com imagens de satélites de altíssima resolução, mesmo não possuindo parâmetros precisos da órbita deles. Para fotogrametria a curtas distâncias, destaca-se o PhotoModeler, muito utilizado em aplicações arquiteturais, industriais e artísticas.

1.8. Considerações finais

Após uma leitura detalhada deste capítulo, esperamos que algumas perguntas estejam devidamente respondidas e sedimentadas:

- o que é fotogrametria? Resposta: item 1.3;
- qual é o objetivo da fotogrametria? Resposta: item 1.3;
- onde a fotogrametria se insere no contexto de sensoriamento remoto? Resposta: item 1.3, em especial a figura 3;
- a fotogrametria trata apenas de imagens aéreas ou engloba outras plataformas (satélites, câmaras terrestres etc.)? Resposta: item 1.3, em especial a figura 3;
- quais são as divisões históricas da fotogrametria? Resposta: item 1.4;
- o que torna a fotogrametria digital diferente das outras? Seria o formato da imagem? Resposta: item 1.4;
- qual é o objetivo da fotogrametria digital? Resposta: item 1.5;
- de que é composta uma estação fotogramétrica digital? Resposta: item 1.6;
- o que torna a estação fotogramétrica digital e os programas de fotogrametria digital mais práticos e versáteis do que os restituidores analógicos ou analíticos? Resposta: item 1.6.

Outras perguntas talvez tenham surgido ou estejam sem explicação, instigando dúvidas e questionamentos. Elas serão respondidas posteriormente, à medida que novos conceitos forem introduzidos.

O capítulo 2 trata de conceitos básicos da fotogrametria e da obtenção de imagens fotogramétricas analógicas e digitais. Já o capítulo 3 trata de todas as medidas necessárias para que as mesmas possam ser utilizadas nas operações posteriores, bem como dos métodos estatísticos de correlação de imagens, que serão úteis em vários procedimentos fotogramétricos. Concentra todos os conceitos de processamento digital de imagens necessários para uma compreensão global da fotogrametria dos nossos dias.

O capítulo 4 discute a orientação interior, que tem como objetivo referenciar a imagem a um sistema métrico, relativo à câmara, reconstituindo o caminho dos feixes perspectivos (feixes de luz que entram pelo sistema de lentes da câmara e sensibilizam o filme ou matrizes de detectores CCD). O capítulo 5, por sua vez, apresenta a orientação exterior, que referencia as imagens advindas da orientação interior ao terreno nelas representado ou imageado.

O capítulo 6 aborda a fototriangulação por métodos analíticos, de fundamental importância para o adensamento de pontos de controle de campo a partir de alguns existentes. Já o capítulo 7 trata dos processos de retificação e normalização de imagens, com reamostragem por geometria epipolar, o que as torna mais adequadas para a extração de um modelo numérico de elevações – tema do capítulo 8.

O capítulo 9 debate a geração de ortoimagens, cada vez mais populares no meio fotogramétrico. O capítulo 10, por seu turno, traz uma breve introdução das técnicas de restituição em ambiente digital e da informação espacial contida nas imagens fotogramétricas digitais. Por fim, o capítulo 11 apresenta conceitos não-essenciais, mas igualmente pertinentes nos dias atuais.

Capítulo 2

Princípios básicos de fotogrametria

2.1. A radiação eletromagnética

A maioria dos sensores imageadores detecta e registra radiação eletromagnética. Essa radiação caracteriza-se por viajar à velocidade da luz (2997924 m/s – aproximadamente $3 \times 10^8 \text{ m/s}$) e possuir dois campos a ela associados: um campo elétrico e outro magnético (figura 1), os quais são perpendiculares entre si e variam senoidalmente. Vale dizer que, embora possa ser encarada como onda, também pode ser considerada pacotes de energia (partículas ou *quanta*) chamados fótons, caracterizando-se a dualidade onda-partícula.

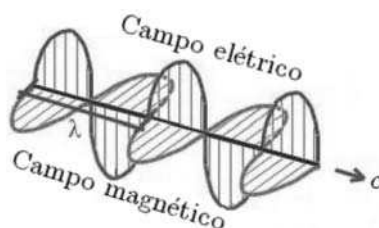


Figura 1: Onda eletromagnética.

A radiação eletromagnética, vista como uma onda, possui um espectro de comprimentos de onda e, conseqüentemente, de frequência distintos. Como exemplos, encontram-se a luz visível, a região do infravermelho e do ultravioleta e as ondas de rádio, além dos raios X, gama e outros de menor importância. Considerando a clássica fórmula de propagação de ondas:

$$v = \lambda f \quad (2.1),$$

onde:

v é a velocidade da onda – neste caso, $v = c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$;

λ é o comprimento da onda;

f é a frequência (número de ciclos por segundo passando por dado ponto) com a qual a onda se apresenta.

Obviamente, a frequência é inversamente proporcional ao comprimento de onda. As diferentes variedades de ondas eletromagnéticas podem ser, então, escalonadas da seguinte forma:

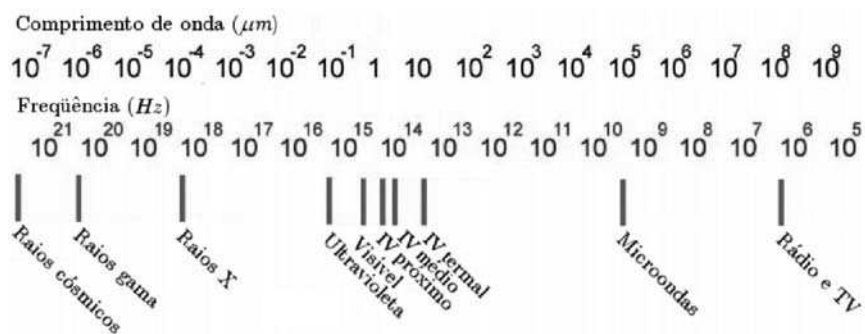


Figura 2: Espectro eletromagnético.

Voltando-se à natureza quântica da radiação eletromagnética, uma consideração importante pode ser feita a partir da equação de Planck para um pacote de energia. Sabe-se que essa fórmula equivale a:

$$Q = hf \quad (2.2),$$

onde:

Q é a energia do pacote;

h é a constante de Planck;

f é a frequência da radiação.

Combinando-se as equações 2.1 e 2.2:

$$Q = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.3),$$

onde se deduz que, à medida que é maior a frequência, menor é o comprimento de onda e maior é a energia transportada. Ou seja, é mais fácil de se detectar a radiação, pelo menos teoricamente, já que a quantidade de energia disponível é maior.

Nesse ponto, uma pergunta pode surgir: como é originada essa energia? Ou ainda: como os corpos interagem com essa energia?

Primeiramente, pode-se dizer que todos os corpos (na verdade, os corpos a mais de $0K$) emitem energia. A lei de Stefan-Boltzmann expressa

a quantidade de energia emitida por um corpo, em função de sua temperatura:

$$M = \sigma T^4 \quad (2.4),$$

onde:

M é o fluxo de energia em Wm^{-2} ;

σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,6697 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$);

T é a temperatura do corpo em K .

Mesmo sabendo que essa fórmula só se aplica numa situação ideal (absorção total da energia incidente e emissão total da energia que possui corpo negro), percebe-se que a quantidade de energia emitida aumenta consideravelmente à medida que sobe a temperatura do corpo. A fórmula de Wien relaciona a temperatura do corpo com o comprimento de onda da radiação dominante, ou seja, a radiação que será a mais emitida.

$$\lambda_d = \frac{A}{T} \quad (2.5),$$

onde:

λ_d , como já foi dito, é a radiação dominante em μm ;

A é uma constante e equivale a $2.898 \mu m K$;

T é a temperatura do corpo em K .

Para a temperatura do sol (aproximadamente $6.000 K$), a radiação mais emitida está na faixa do espectro visível. O espectro de luz chamado visível recebe essa denominação em especial e é a única região do espectro eletromagnético que sensibiliza os olhos do ser humano. O olho humano, de acordo com certas teorias mais recentes, é sensível à luz em três colorações básicas: vermelho, verde e azul. Essas cores são chamadas primárias. A partir de combinações luminosas das três, pode-se gerar qualquer uma das outras.

De fato, o sistema denominado RGB (*Red, Green, Blue*; vermelho, verde e azul) é utilizado nos televisores e monitores de computador. As cores complementares são o amarelo, o magenta e o ciano, formadas pela subtração das cores primárias da cor branca. Nos sistemas de impressão, as cores complementares são tomadas como básicas, ocorrendo fato inverso: as cores primárias passam a ser formadas pela combinação das complementa-

res, isto é, o sistema denominado CMYK (*Cyan, Magenta, Yellow, black*); nesse caso, exclui-se a cor preta, que é a subtração das três. Logo, atenção especial deve ser tomada, a fim de manter-se, em uma impressão, a fidedignidade das cores exibidas.

O espaço RGB também pode ser visto como um espaço vetorial de cores (cubo RGB), onde cada tonalidade pode ser obtida a partir de uma combinação das cores primárias.

Para um corpo com uma temperatura de 300 K (temperatura da maior parte dos corpos na superfície terrestre), o comprimento de onda da radiação emitida situa-se na região do infravermelho termal, nome que decorre justamente do relacionamento direto com a temperatura dos corpos que se encontram ao nosso redor.

A figura abaixo mostra as curvas de emissão eletromagnética para corpos negros de 6.000 K e 300 K, respectivamente:

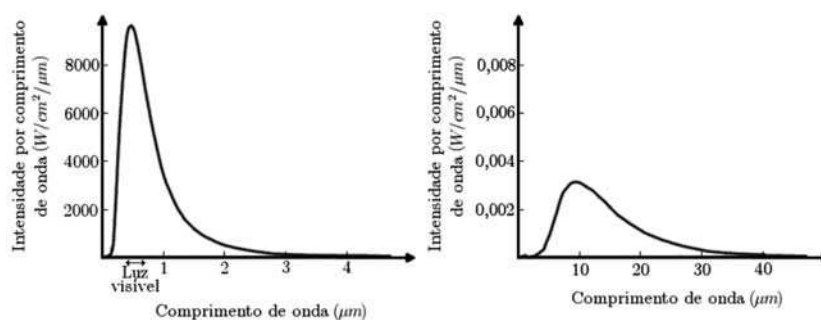


Figura 3: Curvas de emissão eletromagnética para um corpo negro a 6.000 K e um corpo negro a 300 K.

2.1.1. Interação entre diferentes corpos e a energia eletromagnética

Os corpos respondem à energia eletromagnética que incide sobre eles de três maneiras: absorvendo-a, transmitindo-a ou refletindo-a; além, é claro, da emissão, que é natural de todos os corpos. Para o sensoriamento remoto, interessam principalmente a reflexão e a emissão, pois é a partir do somatório de energia refletida e emitida pelas feições da superfície terrestre que os filmes ou dispositivos CCDs¹ das câmaras são sensibilizados, ou melhor, detectam e registram radiação eletromagnética.

¹ CCDs (*Charge Coupled Devices*): espécie de diodos fotossensíveis (detectores) usados em fotografia digital.

A reflexão da radiação eletromagnética se dá de duas formas: especular e difusa. Na reflexão especular, parte da luz incidente (que não é absorvida nem transmitida) é refletida com um ângulo igual ao de incidência, equivalendo-se a um espelho. Um exemplo é mostrado na figura a seguir:

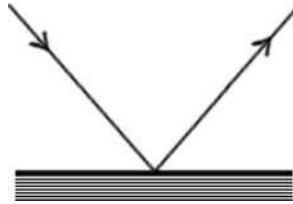


Figura 4: Reflexão especular.

A reflexão difusa ou lambertiana é a de maior interesse à aquisição de imagens (figura 5), pois, nesse tipo, parte da luz incidente, que não é absorvida nem transmitida, é refletida em diversos ângulos e intensidades. Ora, cada corpo reage de maneira diferente à mesma radiação, graças às peculiaridades que naturalmente cada um deles possui. Assim, para diferentes corpos e radiações e, conseqüentemente, para diferentes comprimentos de onda, há diferentes intensidades refletidas e/ou emitidas. Graças a essa propriedade, pode-se chegar ao conceito de cores. Assim, vê-se um corpo como verde porque, em verdade, este reflete e/ou emite (de forma difusa) radiação na faixa do verde. Sabendo-se como determinado corpo reage aos mais diversos tipos de radiação eletromagnética, pode-se traçar um padrão de resposta espectral (ou assinatura espectral) para esse corpo.

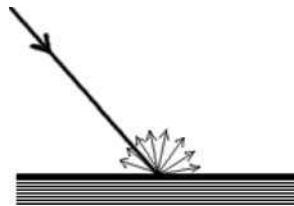


Figura 5: Reflexão difusa.

Um caso interessante de diferentes respostas espectrais ocorreu durante a Segunda Grande Guerra, quando os aliados passaram a usar filmes que detectavam radiação na faixa do infravermelho. Embora no visível a camuflagem de folhagem artificial tenha a mesma coloração que a vegetação natural, no infravermelho a vegetação viva reflete muito melhor, graças à clorofila e à estrutura interna das folhas. Em conseqüência disso, tornou-se fácil a identificação de abrigos e casamatas inimigas camufladas.

Outro aspecto importante a ser considerado é a reação da atmosfera à radiação que passa por ela. É notório o fato de que os raios ultravioleta são filtrados na atmosfera graças à camada de ozônio – que, por sinal, está em processo de contínua destruição. Esses tipos de mecanismo se aplicam na atmosfera, até porque servem como uma proteção que possibilita a existência de vida na superfície terrestre, uma vez que muitas das radiações eletromagnéticas são nocivas aos seres vivos.

Desse modo, diz-se que há janelas atmosféricas, ou seja, zonas do espectro em que a atmosfera permite a passagem de energia. As principais são o visível, o infravermelho e as microondas (radar). Podem-se captar as duas primeiras diretamente a partir da energia gerada e refletida pelos corpos, por intermédio de sensores passivos. Para captar energia na faixa das microondas, deve-se gerá-la no próprio sensor (sensores ativos), visto que a quantidade de energia naturalmente disponível nessa faixa é muito baixa.

Além disso, a atmosfera é responsável pelo fenômeno do espalhamento, que, como o nome diz, espalha de modo disperso determinada radiação. O *espalhamento de Rayleigh* (o mais famoso) decorre da interação de partículas muito menores do que o comprimento de onda da radiação. Graças a ele, vemos o céu azul, pois a radiação na faixa do azul (a de menor comprimento de onda entre as do visível) é a mais espalhada por esse tipo de partículas.

O *espalhamento de Mie* ocorre para partículas da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda e afeta, sobretudo, os comprimentos de onda maiores.

O *espalhamento não-seletivo* acontece em virtude de partículas muito maiores que os comprimentos de onda (poeira em suspensão), as quais espalham igualmente radiação de todos os comprimentos de onda. Por isso, a neblina e as nuvens se apresentam na cor branca.

O espalhamento pode empobrecer a imagem adquirida sobre determinada área onde esse efeito se faz notável. Filtros podem ser colocados nas câmaras para atenuar esses problemas. Técnicas de processamento digital também podem ser executadas. Ambos os casos serão estudados posteriormente.

2.1.2. A câmara fotográfica

O processo chamado fotografia foi desenvolvido a partir de 1839, graças aos esforços dos pioneiros Nicéphore Niépce, William Talbot e Louis Daguerre. O princípio da câmara escura é de tal simplicidade e eficácia que

até os dias de hoje é utilizado em sua essência. Tal princípio está descrito esquematicamente na figura 6. Temos um objeto a ser fotografado e uma câmara, que se constitui em um recipiente oco (com um pequeno furo por onde passa a luz), com as paredes internas escuras, exceto uma, onde se encontra um dispositivo que pode ser sensibilizado pela luz (um filme ou matriz de CCDs como exemplos). A imagem é formada de maneira invertida, em uma distância que depende da distância do objeto ao furo.

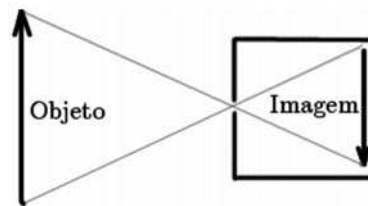


Figura 6: Princípio da câmara escura.

O aparato não se mostrou prático, pois eram necessárias horas de exposição para sensibilizar suficientemente o filme. Para contornar esse problema, instalou-se um sistema de lentes na frente da câmara, o que diminuiu bastante o tempo de exposição, como exibido na figura abaixo:

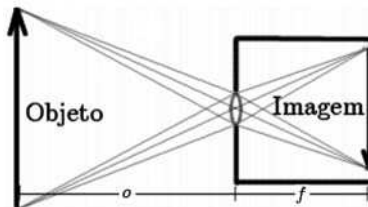


Figura 7: Princípio da câmara fotográfica.

Quando o arranjo está devidamente posicionado, pode-se relacionar a distância focal (f), a distância-imagem (i) e a distância-objeto (o) do seguinte modo (lei de Gauss):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{i} \quad (2.6).$$

Embora a fórmula especifique rigidamente uma determinada distância-imagem e uma determinada distância-objeto, necessárias para que o sistema esteja absolutamente focado, há um intervalo de tolerância dentro do qual mudanças de posição do objeto não acarretam perda de nitidez da imagem. Tal conceito é chamado profundidade de campo.

No caso de fotografias aéreas (ou terrestres visando a longas distâncias), a distância-objeto assume valores muito grandes, reduzindo a equação 2.6 a $\frac{1}{f} = \frac{1}{i}$, donde se conclui que, nesses casos, $f = i$.

Outro conceito importante para as câmaras fotográficas é a exposição em qualquer ponto do plano focal. De acordo com Lillesand e Kiefer (2000), ela é expressa pela fórmula:

$$Exp = \frac{sd^2tf^2}{4} \quad (2.7),$$

onde:

Exp é a exposição em si, expressa em Jmm^{-2} ;

s expressa o brilho da cena em $Jmm^{-2}s^{-1}$;

d é o diâmetro da abertura da lente em mm ;

t é o tempo de exposição em s ;

f é a distância focal da câmara em mm .

Outro conceito igualmente importante é o de velocidade das lentes, ou $f - stop$. Ele é dado pela relação entre a distância focal da câmara e o diâmetro da lente:

$$f - stop = \frac{f}{d} \quad (2.8).$$

Com isso, pode-se reescrever a equação 2.7 da seguinte forma:

$$Exp = \frac{st}{4(f - stop)^2} \quad (2.9).$$

Verifica-se que, à medida que o $f - stop$ aumenta, a exposição diminui. Em geral, o $f - stop$ é representado em potências de 2. Convenciona-se, para um valor x de $f - stop$, representá-lo como $\frac{f}{x}$. Assim, alguns valores comuns seriam: $\frac{f}{4}$, $\frac{f}{2}$, $\frac{f}{1,4}$ e assim por diante. Como, na verdade, a velocidade das lentes é representada por uma relação, quanto maior a abertura das lentes (pequenos $f - stop$), mais luz chegará ao filme, o que possibilita a diminuição da exposição. Pequenas aberturas de lentes obrigam maiores tempos de exposição, mas aumentam a profundidade de campo. É interessante ressaltar que não existe uma relação ideal, cabendo ao profissional envolvido escolher o melhor filme e as melhores condições para cada situação prática que se apresente.

As câmaras fotográficas podem ser classificadas, quanto à fabricação, em analógicas (sensibilizam um filme que, se revelado, leva a uma imagem analógica) ou digitais (obtêm a imagem diretamente em formato digital).

Outra chave de classificação das câmaras fotográficas permite dividi-las em dois grandes grupos: as câmaras métricas e não-métricas, ou de fotógrafo amador. As métricas distinguem-se das não-métricas pelo fato de possuírem características especiais, descritas no tópico a seguir.

2.2. A câmara fotogramétrica

Convencionou-se chamar de *câmara fotogramétrica* a câmara que possui certas características especiais. No caso, o que determina a dissensão entre essas definições é o maior rigor métrico na definição dos parâmetros que regem a câmara. Assim, pode-se extrair informação métrica e precisa das imagens adquiridas por tal tipo de câmara.

As câmaras fotogramétricas em geral são aéreas, mas podem ser terrestres (para uso em fotogrametria arquitetônica ou mesmo na aquisição de imagens oblíquas de feições muito irregulares). Deve-se, porém, considerar que, para câmaras terrestres, a distância focal não é constante e os valores de profundidade de campo devem ser respeitados. No decorrer deste texto, entretanto, dar-se-á uma importância maior para as câmaras aéreas, pois são, de longe, as mais utilizadas em mapeamento fotogramétrico (aerolevantamentos).

As partes principais de que se compõe uma câmara fotogramétrica são o cone e o magazine:

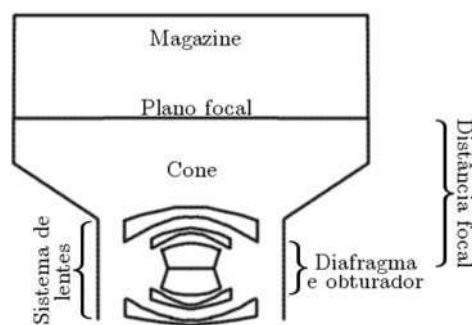


Figura 8: Representação esquemática de uma câmara fotogramétrica.

No *cone*, localizam-se o sistema de lentes da objetiva, o diafragma, o obturador, o suporte de filtros e a esquadria de registros.

O sistema da *objetiva* é um conjunto de lentes que deve direcionar os raios luminosos vindos do exterior para a imagem a ser formada no plano focal.

O *obturador* é responsável pela abertura necessária do diafragma (um conjunto de cortinas circulares concêntricas), a fim de se obter uma exposição desejada.

Os *filtros* podem ser usados caso se queira aplicar determinados efeitos às imagens. Convém ressaltar que a existência de filtros, caracterizados por sua transmitância – isto é, a percentagem de energia luminosa que estes deixam passar de tudo o que chega até eles –, obriga maiores tempos de exposição dos filmes. Logo, devem ser utilizados apenas em casos indispensáveis.

A *esquadria de registros* comporta várias informações marginais, que virão a ser impressas em cada uma das fotografias. As mais importantes, de longe, são as *marcas fiduciais* (figura 9), que definem um sistema rígido de coordenadas da imagem. Outros dados que podem ser impressos são o número da foto, a empresa contratante, o vôo etc.

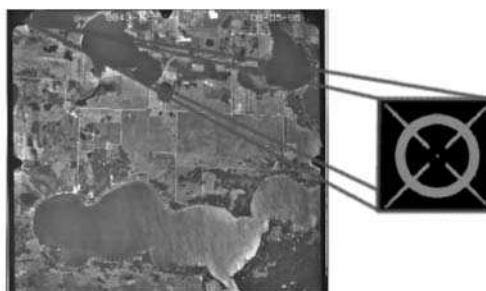


Figura 9: Marca fiducial.

O *plano focal* é onde se forma a imagem ($f \simeq i$ para câmaras aéreas) e se posiciona o filme. Nas câmaras digitais, há uma matriz de detectores nessa região da câmara, isto é, no lugar do filme.

No *magazine*, localiza-se o sistema de aderência a vácuo e de troca de filmes (apenas câmaras analógicas).

Toda câmara fotogramétrica vem acompanhada de um *certificado de calibração*, ou seja, um documento que atesta os valores precisos de determinados parâmetros fundamentais da câmara, que serão devidamente utilizados nos processos fotogramétricos posteriores. Um exemplo de certificado encontra-se na figura 10.

Os parâmetros principais da câmara são:

- *tipo de câmara e de lentes*: informações sobre o nome do fabricante e o modelo da câmara, bem como das lentes utilizadas;
- *distância focal*: vem da lei de Gauss, exemplificada na equação 2.6. No caso de uma imagem tomada a grandes distâncias, o valor de f é constante e igual à distância-imagem. Em geral, f assume valores nominais de 88 mm, 150 mm ou 300 mm;
- *ângulo de abertura*: esse parâmetro está exemplificado graficamente na figura 11. Em geral, pode assumir três valores principais: ângulo normal, grande angular e supergrande angular. A tabela 1 (v. p. 47) apresenta as principais características de cada tipo.



Figura 10: Exemplo de certificado de calibração (cortesia da 1ª Divisão de Levantamento do Exército Brasileiro – Porto Alegre, Brasil).

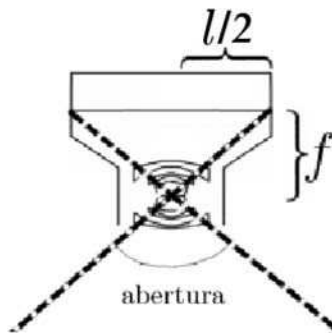


Figura 11: Ângulo de abertura.

A seguir, serão listados pontos notáveis para o estudo das câmaras:

- *ponto nodal anterior*: ponto de entrada de um raio de luz no sistema de lentes da câmara;
- *ponto nodal posterior*: ponto de saída de um raio de luz do sistema de lentes;
- *ponto principal de autocolimação*: ponto, no plano do filme, aonde chega um raio de luz que entra perpendicularmente ao sistema de lentes da câmara;
- *ponto principal de simetria*: ponto situado no plano focal, onde as distorções são praticamente simétricas. A distância focal referente a esse ponto é chamada de distância focal calibrada;
- *eixo óptico*: eixo que contém os centros de curvatura de determinada lente. O sistema de lentes da câmara possui para si um eixo óptico comum, a não ser que haja um desalinhamento dos eixos dos diversos componentes do mesmo, o que na prática sempre acontece. A distância focal efetiva nas proximidades do eixo óptico é chamada de distância focal equivalente (Andrade, 1997).

Alguns elementos anteriormente descritos encontram-se destacados abaixo, a fim de facilitar o seu entendimento:

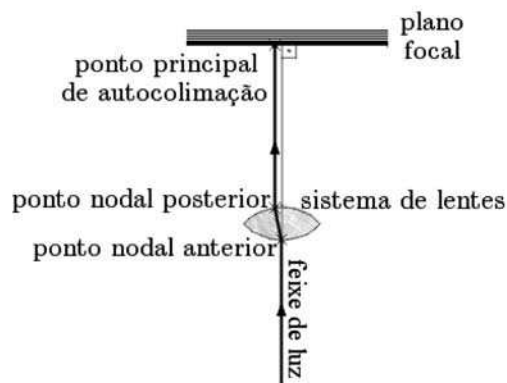


Figura 12: Pontos notáveis de uma câmara fotogramétrica.

Em geral, constam dos certificados de calibração as seguintes informações: coordenadas do ponto principal, distância focal calibrada, coordenadas das marcas fiduciais e coeficientes para a correção das distorções (a serem estudadas posteriormente), acompanhados dos respectivos desvios-padrão. Os métodos utilizados para a calibração de câmaras fogem um

pouco do escopo desta obra, sendo aconselhável aos mais interessados a leitura de Andrade (1998).

Tabela 1: Características dos diferentes tipos de câmaras fotogramétricas.

Tipo de câmara	Ângulo de abertura	Distância focal	Características (recomendação de uso)
Ângulo normal	75°	300 mm	Diminui bastante a distorção radial (neste momento, basta saber que esta é uma distorção que se manifesta aproximadamente de modo uniforme de acordo com a distância a partir do centro da imagem), permite maior altura de vôo, mas é desaconselhável para trabalhos estereoscópicos.
Grande angular	150°	150 mm	Geralmente utilizada para a confecção de cartas topográficas em escalas médias e grandes. Apresenta um bom rendimento.
Supergrande angular	300°	88 mm	Aumenta bastante a cobertura, principalmente em baixas alturas de vôo. Entretanto, as distorções radiais tornam-se realmente incômodas em alguns casos. É mais utilizada para vôos em escalas pequenas.

2.2.1. Aquisição de imagens fotogramétricas analógicas

Para a aquisição de imagens fotogramétricas analógicas, usam-se as consagradas câmaras fotogramétricas a filme, ou seja, câmaras em que há um filme no plano focal que é sensibilizado pela luz que chega até ele. Em geral, sobre o filme situa-se um sistema de aderência a vácuo que possui sistemas de enrolamento e descompressão, permitindo o avanço automático de uma fotografia para outra, sem provocar-lhe dobras ou amassos.

Variam de filme para filme os aspectos referentes à absorção de luz e sensibilização da emulsão; porém, em geral, o filme fotográfico pancromático

padrão é composto por diversos grãos de haleto de prata. A cada parte do filme chegará luz em comprimentos de onda e intensidades diferentes – uma vez que cada objeto reflete e/ou emite energia de formas diferentes –, acarretando distintas exposições. A redução dos grãos, após a revelação, produz um depósito de prata no filme. À medida que essa prata é depositada, mais escura fica a região onde se dá o acúmulo, ou seja, objetos mais claros terão suas imagens mais escuras; a isso se chama negativo fotográfico.

Caso se queira gerar uma imagem em filme correspondente à coloração dos objetos, deve-se sensibilizar um filme com um negativo à frente. Esse filme, quando revelado, passa a se chamar diapositivo. Os diapositivos são muito empregados em fotogrametria devido à sua translucidez característica, que permite melhor visualização contra projetores de luz e *scanners*.

Obviamente, as fotografias em papel, opacas, são também geradas do mesmo modo. Sua utilização é igualmente irrestrita, servindo para a confecção de mosaicos analógicos e de apoio ao pessoal de campo, quando da medição dos pontos de controle e coleta dos topônimos.

A medida chamada *transmitância* (T) expressa a razão entre a quantidade de luz que pode passar pelo diapositivo (ou pelo negativo) e o total de luz que incide sobre o filme. A *opacidade* (O) é igual ao inverso da transmitância. Assim, quanto mais escura for a imagem, menores serão a quantidade de luz que por ela passa e a transmitância; maiores serão a opacidade e a *densidade* (D), que é o logaritmo decimal da opacidade. O uso de unidades logarítmicas advém do fato de o olho humano responder aos estímulos visuais de modo aproximadamente logarítmico.

Colocando-se em um gráfico a densidade (D) pelo logaritmo da *exposição* ($\log(E)$), obtém-se uma curva denominada curva característica do filme. Em geral, ela é representada para o filme em negativo, mas curvas para diapositivos também podem ser encontradas. A figura abaixo expressa o formato aproximado de tais curvas:

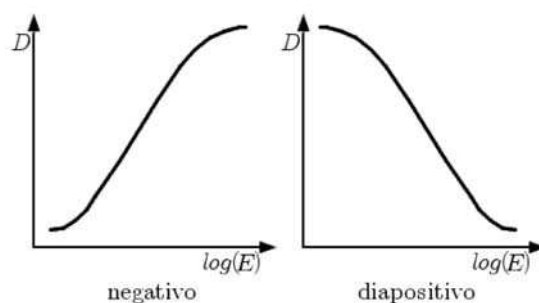


Figura 13: Perfil de curvas características para um negativo e um diapositivo.

Percebe-se que a curva característica possui uma parte central que se assemelha a uma reta. É esta a área de utilização do filme. Se a exposição for curta demais, a densidade será baixa e a curva característica cairá numa região não-linear (início da curva). Se a exposição for longa demais, fato semelhante ocorrerá (final da curva).

A tangente do ângulo α , representado na figura 14, é chamada γ (gama). O γ varia de filme para filme, mas está relacionado com o conceito de contraste. Assim, quanto maior é o γ , maior é o contraste (e vice-versa), ou seja, para menores diferenças na exposição do filme, há maiores diferenças na densidade de grãos sensibilizados. Na prática, isso quer dizer que, para pequenas diferenças de iluminação, há maiores diferenças de coloração (ou tonalidade) no negativo.

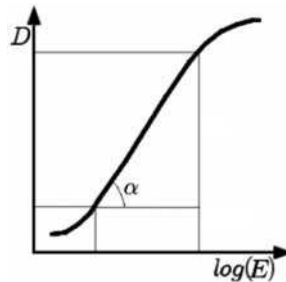


Figura 14: Representação da parte reta de uma curva característica.

Cada filme possui sua própria curva característica. Isso determinará, de acordo com os objetivos do aerolevanteamento, a escolha da emulsão mais propícia. Para ajudar nessa decisão, vários parâmetros foram estabelecidos. Os mais importantes, chamados resoluções, são demonstrados no tópico a seguir.

2.2.1.1. Resoluções das imagens fotogramétricas analógicas

Toda imagem tem quatro resoluções básicas, ou seja, quatro parâmetros básicos de avaliação de suas capacidades de aquisição de dados. Essas resoluções são denominadas: *espacial*, *radiométrica*, *espectral* e *temporal*.

A *resolução espacial* está diretamente relacionada com a capacidade de “enxergar” objetos tão pequenos quanto o filme permita. Uma resolução, por exemplo, de $1m$ indica que os menores objetos passíveis de serem distinguidos na imagem fotográfica terão $1m$ de dimensões. Objetos menores não serão visualizados. Essa resolução é determinada pelo tamanho dos grãos de haleto de prata da emulsão. Grãos maiores implicam resolução

espacial mais grosseira, mas se sensibilizam mais rapidamente. Em especial para câmaras aéreas, o tempo de exposição deve ser o menor possível, a fim de evitar os efeitos danosos que a movimentação da aeronave pode acarretar (seção 2.3.4; p. 64). Isso causa ao responsável pelo trabalho fotogramétrico um considerável problema: balancear resolução espacial e velocidade do filme.

Para medir a resolução espacial em laboratório, tiram-se fotos contra um alvo composto de inúmeras linhas brancas sobrepostas a um fundo preto (figura 16).

A resolução espacial é determinada pela quantidade de linhas que podem ser identificadas em um milímetro (l/mm). Também é comum a expressão “pares de linhas por milímetro” (lp/mm); considera-se que os espaços em preto entre as linhas em branco são equivalentes a “linhas pretas” (daí a expressão “pares de linhas”). Essa identificação pode ser visual (processo mais rudimentar) ou realizada por aparelhos denominados *densitômetros* (figura 15), cuja tarefa é identificar até que ponto a imagem obtida mantém os padrões regulares de transição “branco para preto”.

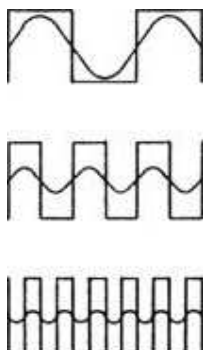


Figura 15: Padrões ideais de transição “branco para preto” (ondas quadradas) e padrões obtidos através de um densitômetro (senóides)
– fonte: United States Air Force.

A tarefa desse aparelho é identificar até que ponto há um verdadeiro contraste entre as linhas claras e escuras, uma vez que, à medida que as senóides se atenuam, a imagem perde sua nitidez nas bordas.

Convém ressaltar que esses valores (resolução espacial estática), obtidos em laboratório, não correspondem à realidade das condições operacionais de aquisição de imagens aéreas, visto que um vôo incorre em inúmeros outros problemas que afetam a resolução espacial final. Para se obter uma medida mais realista, pode-se realizar um vôo contra um grande alvo com os padrões semelhantes aos da figura 16. A resolução obtida por

esse método seria chamada resolução espacial dinâmica; no entanto, raramente esses testes são realizados.

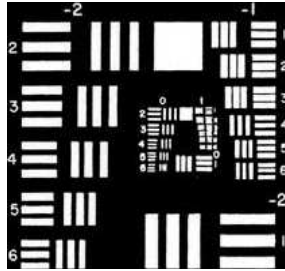


Figura 16: Alvo para determinação de resolução espacial de uma câmara (fonte: United States Air Force).

Os filmes geralmente utilizados em aerofotogrametria possuem uma resolução espacial em torno de $40l/mm$ (ou $40lp/mm$). Para um vôo na escala de $1 : 25000$, a resolução espacial no terreno seria igual a $1 : 25000$ (denominador da escala) $\div 40 = 625m = 0,625m$.

A *resolução radiométrica* é um fator que está relacionado com a capacidade de se detectarem as menores variações possíveis de incidência de energia sobre o filme. Por exemplo, um filme capaz de registrar apenas dois tons (preto e branco) tem uma resolução radiométrica menor do que um filme capaz de registrar várias nuances de cinza dentro da mesma faixa de exposição. Esse exemplo vale muito mais para imagens digitais, embora também se aplique a imagens analógicas.

A resolução radiométrica pode ser melhor verificada através de um gráfico comparativo entre duas emulsões, como atesta a figura 17. Obviamente, há um intervalo mínimo de variação de densidade que acarreta uma diferença de tonalidade na imagem final. Se, para esse intervalo mínimo de variação, corresponder uma menor diferença de exposição, logo, a resolução radiométrica é maior. Imagens com alta resolução radiométrica apresentam alto γ .

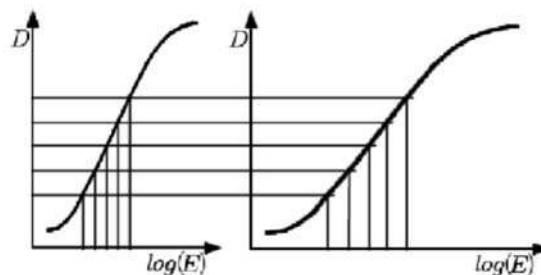


Figura 17: Duas amostras de curvas características de filmes.

Notamos a maior resolução radiométrica da amostra da esquerda, uma vez que, dentro da mesma faixa de exposição, podemos perceber nuances diferentes de cinza relacionadas com as variações mínimas de densidade necessárias para acarretar uma mudança de tonalidade na imagem final. Na imagem da direita, há menos variações de tons de cinza no mesmo intervalo de exposição e as mesmas variações de densidade.

A *resolução espectral* envolve o número de bandas e a espessura de cada banda que o filme é capaz de cobrir. Um filme pancromático cobre a faixa do visível, por exemplo. Um filme colorido cobre a mesma faixa, mas em três bandas diferentes: vermelho, azul e verde. Como ele tem três bandas e cada banda é mais estreita do que o pancromático (pois este equivale às três juntas), pode-se dizer que o filme colorido tem maior resolução espectral do que o pancromático.

Existem apenas quatro variedades de filme: pancromático (todo o visível, foto em tons de cinza), pancromático incluindo a faixa do infravermelho, colorido e falsa-cor (que associa a coloração vermelha da foto à radiação infravermelha, a coloração verde à radiação vermelha e a coloração azul à radiação verde). O uso da cor se justifica pela maior facilidade do olho humano para discernir entre cores diferentes, em vez de tons de cinza. Entretanto, os filmes coloridos geralmente são mais pobres em termos de rapidez de exposição e resolução espacial, além de serem menos estáveis; ou seja, o fato de se degradarem com maior velocidade do que os pancromáticos. Isso limita seu uso apenas a casos em que são estritamente necessários.

O filme colorido funciona de modo semelhante ao pancromático, mas envolve três emulsões diferentes, que possuem curvas características semelhantes. Vale lembrar que, assim como no caso do negativo preto-e-branco – cuja emulsão corresponde, em coloração, contrariamente à radiação que o sensibiliza (um objeto branco, no negativo, é representado com coloração preta) –, as emulsões sensíveis a determinada cor são representadas, no negativo do filme colorido, pela coloração contrária à da radiação. Se um objeto azul é fotografado, sairá com a coloração amarela no negativo. Basta ver no diagrama de cores primárias, ou complementares, qual é a cor que se acha exatamente do lado oposto da cor desejada.

As emulsões do filme colorido são as seguintes: emulsão sensível à luz azul (que tingem o negativo de amarelo); emulsão sensível às luzes verde e azul; e emulsão sensível às luzes vermelha e azul. Como as duas últimas emulsões também são sensíveis ao azul, convencionou-se colocar um filtro azul bastante fino entre a primeira camada de emulsão e as outras duas. Com isso, chegam às duas últimas apenas a luz vermelha e a verde. Desse modo, elas se tornam emulsão sensível à luz verde (que tingem o negativo de

magenta) e emulsão sensível à luz vermelha (que tingem o negativo de ciano). Como qualquer radiação no visível é uma composição de vermelho, verde e azul, pode-se representá-las através da fotografia colorida.

Para os filmes falsa-cor, o princípio é o mesmo, apenas variando as radiações que os sensibilizam. Encontramos maiores detalhes sobre a composição cromática do filme em Lillesand e Kiefer (2000).

A última das resoluções de uma imagem é a *resolução temporal*, que se relaciona com o tempo de revisita da plataforma na qual a câmara está montada. Um satélite que, por exemplo, adquira imagens de uma mesma região de 17 em 17 dias terá uma resolução temporal maior do que uma série de vôos para atualização cartográfica que cobre a mesma área, imageando-a apenas uma vez a cada ano. É um conceito que interessa muito a aplicações temáticas, tais como: movimentação de bacias, crescimento populacional, poluição urbana, estudos ambientais etc. Como, em geral, para vôos fotogramétricos, a área é coberta apenas uma vez, este é um conceito um pouco fora de uso.

2.2.2. Aquisição de imagens fotogramétricas digitais

Para a fotogrametria digital, interessa bastante este tópico, já que as imagens digitais são a fonte para a aquisição dos dados tridimensionais das feições nela contidas.

Há, basicamente, dois tipos de imagem digital: *vetorial* e *matricial*. A imagem vetorial é caracterizada pela delimitação de objetos pelos pontos que os determinam. Ela será mais bem analisada posteriormente, na parte destinada à restituição digital.

A imagem digital é uma matriz composta por células quadradas, chamadas *pixels* (*picture elements*). Em cada *pixel*, há somente uma coloração sólida, definida por um número digital. Por ora, basta saber que cada número digital tem uma determinada cor associada a ele. Podemos observar melhor os *pixels* se a imagem for sucessivamente ampliada:

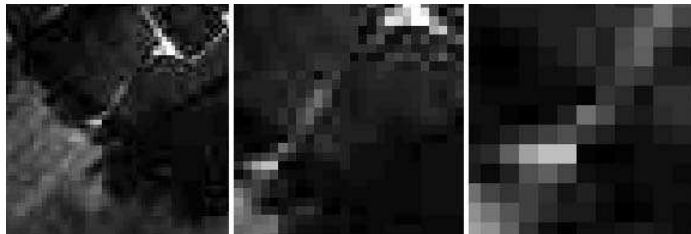


Figura 18: Note a estrutura de *pixels* existente na imagem ampliada sucessivamente.

Pode-se, assim, definir qualquer imagem digital por uma matriz, tendo por valor de cada um dos elementos o número digital equivalente. Isso fica mais bem explicitado na figura:

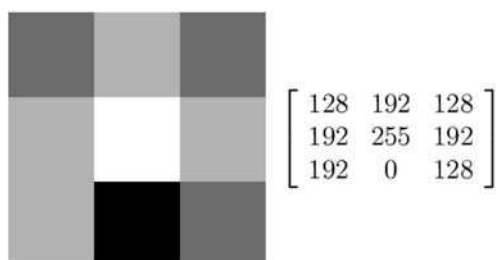


Figura 19: Distribuição matricial (à direita) equivalente a um conjunto de *pixels* (à esquerda).

2.2.2.1. Resoluções das imagens fotogramétricas digitais

As quatro resoluções já delineadas para a imagem fotogramétrica analógica também se aplicam à imagem fotogramétrica digital. Entretanto, os conceitos variam razoavelmente entre elas, dada a natureza distinta que possuem.

Na imagem digital, a *resolução espacial* está diretamente relacionada ao “tamanho do *pixel*”. Essa terminologia exprime quanto vale um *pixel* na imagem. Um exemplo do cálculo desse valor: determinada imagem, de 32 x 32 *pixels*, equivale, no terreno, a uma área de 32 x 32 metros. Assim, cada *pixel* equivale a um quadrado de 1 x 1 metro no terreno. Como dentro de um *pixel* só pode haver uma coloração, diz-se, grosso modo, que esta equivale a uma composição das tonalidades dos diferentes objetos existentes naquela área. O tamanho do *pixel*, portanto, está diretamente relacionado à capacidade de se discernir objetos no terreno. Obviamente, quanto menor o tamanho do *pixel*, maior é a resolução espacial da imagem digital. Hoje em dia, já há sensores por satélite com a capacidade de adquirir imagens de *pixels* iguais ou menores que 1 x 1 metro. Imagens digitalizadas a partir de fotografias analógicas ou adquiridas por câmaras aéreas digitais apresentam resoluções ainda melhores, habilitando a utilização da fotogrametria digital em escalas cada vez maiores.

Convém ainda citar que, no momento em que se arranja uma área física da Terra em uma matriz de *pixels* de dimensões definidas, executa-se um processo chamado discretização. O espaço contínuo e de unidades de medida infinitamente complexas é reduzido a um conjunto discreto de

elementos arrumados em uma matriz. Se houver mais *pixels* cobrindo uma mesma área (figura 20), a discretização dar-se-á de modo mais realista, mas isso aumenta proporcionalmente o tamanho do arquivo final. Por exemplo, um trecho de 20 x 20 *pixels* é quatro vezes menor do que um de 40 x 40 *pixels*.

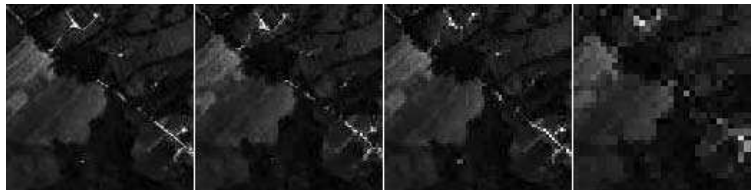


Figura 20: Imagens da mesma região em resoluções geométricas diferentes (cortesia da 1ª Divisão de Levantamento do Exército Brasileiro – Porto Alegre, Brasil).

A resolução radiométrica, como exposto anteriormente, está ligada à capacidade de discernir quantidades cada vez maiores de tons dentro de uma determinada banda do espectro eletromagnético. Para as imagens digitais, esse fator é mais facilmente quantificável, visto que, por definição, a imagem digital deve possuir uma quantidade certa de tons.

Uma vez que o sistema utilizado em informática é o binário, a quantidade de tons de uma imagem digital está relacionada a uma potência de 2. Como exemplo, citemos uma imagem de 256 tons de cinza: $256 = 2^8$, ou seja, 8 *bits* (*binary digits*; dígitos binários) por *pixel*. Na prática, isso significa que o número digital relacionado a cada *pixel* deve ser expresso por oito dígitos binários, a fim de permitir 256 variações numéricas diferentes, podendo, assim, exprimir a multiplicidade de tonalidades desejada. Uma imagem de 1 *bit* por *pixel*, ou seja, que só pode expressar $2^1 = 2$ variações de tonalidade, é chamada imagem binária e só possuirá dois tons: preto e branco. Intuitivamente, ela terá uma menor resolução radiométrica do que a imagem de 256 tons de cinza, podendo-se formular que, “quanto maior a quantidade de tonalidades em uma determinada banda, maior será a resolução radiométrica”. O tamanho do arquivo da imagem também é influenciado por essa resolução. Uma imagem que tenha, por exemplo, 20 *pixels* ao todo, se for expressa em formato tipo “mapa de *bits*” (*bitmap*), sem compressão ou compactação, possuirá o tamanho de 20 x 8 *bits* (1 *byte*) = 160 *bits* ou 20 *bytes* (se tiver 256 tons). Se tiver apenas dois, possuirá o tamanho de 20 x 1 *bit* = 20 *bits*.

Quando uma imagem é adquirida ou convertida para a forma digital (tópico a seguir), faz-se necessário realizar um processo chamado quantificação. Isso equivale a inserir todas as respostas espectrais do terreno imageado, na banda desejada, no número de tonalidades predeterminado.

Um exemplo ilustrativo seria uma imagem que expressasse, em 16 tons de cinza ($2^4 =$ imagem de 4 *bits/pixels*), as variações de quantidade de energia que chega ao sensor na faixa de 0 a 16 unidades de energia (u.e.). A distribuição final equivaleria a:

- de 0 a 1 u.e. – número digital igual a zero (preto);
- de 1 a 2 u.e. – número digital igual a 1 (cinza);²
- de 2 a 3 u.e. – número digital igual a 2 (cinza);
- de 3 a 4 u.e. – número digital igual a 3 (cinza);
- de 4 a 5 u.e. – número digital igual a 4 (cinza);
- de 5 a 6 u.e. – número digital igual a 5 (cinza);
- de 6 a 7 u.e. – número digital igual a 6 (cinza);
- de 7 a 8 u.e. – número digital igual a 7 (cinza);
- de 8 a 9 u.e. – número digital igual a 8 (cinza);
- de 9 a 10 u.e. – número digital igual a 9 (cinza);
- de 10 a 11 u.e. – número digital igual a 10 (cinza);
- de 11 a 12 u.e. – número digital igual a 11 (cinza);
- de 12 a 13 u.e. – número digital igual a 12 (cinza);
- de 13 a 14 u.e. – número digital igual a 13 (cinza);
- de 14 a 15 u.e. – número digital igual a 14 (cinza);
- de 15 a 16 u.e. – número digital igual a 15 (branco).

As tonalidades mais claras sempre terão números maiores, pois correspondem a uma quantidade maior de energia chegando ao sensor. Para um número de tons igual a 2^k , o tom mais escuro será igual a 0 e o mais claro, igual a $2^k - 1$.

É importante ressaltar que, embora emissões de 13,1 u.e. e 13,9 u.e. sejam diferentes, durante a quantificação elas serão representadas do mesmo modo, tornando-se indistinguíveis. Aumentar o número de tons diminui esse tipo de problema, mas aumenta o tamanho do arquivo (figura 21). Uma discussão mais aprofundada sobre esse tema será apresentada no tópico seguinte.

² Esses tons de cinza variam gradativamente, desde o mais escuro (número digital igual a 2) até o mais claro (número digital igual a 14).

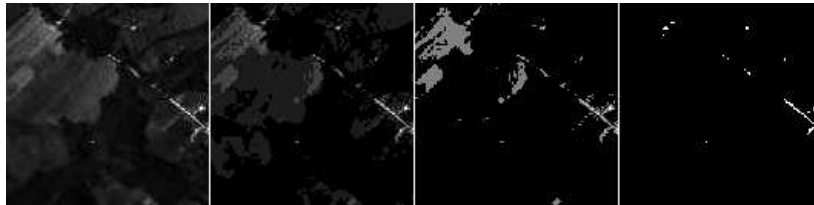


Figura 21: Imagens da mesma região em resoluções radiométricas diferentes; imagens da esquerda para a direita de: 8 bits, 4 bits, 2 bits e 1 bit (cortesia da 1ª Divisão de Levantamento do Exército Brasileiro – Porto Alegre, Brasil).

As outras duas resoluções (*spectral* e *temporal*) funcionam de modo semelhante ao das imagens analógicas. Cabe aqui falar um pouco sobre as imagens digitais coloridas. Elas são compostas por três imagens separadas, que serão representadas visualmente por vermelho, verde e azul, mas podem equivaler a quaisquer combinações de bandas do espectro. Uma imagem colorida que é exibida na tela de um computador é, na verdade, uma combinação de três imagens separadas. Grosso modo, pode-se compará-la a três diapositivos em tons de cinza que expressam três bandas do espectro e são projetados sobre uma mesma superfície através dos filtros vermelho, azul e verde (um filtro para cada imagem). Assim, uma imagem colorida de 16 milhões de cores (16.777.216 cores, para ser mais preciso) é uma combinação de três imagens de 256 cada ou, ainda, de uma imagem de 8 bits por banda, exibindo três bandas. Embora ela tenha mais tons do que uma imagem pancromática comum de 256 tons de cinza, diz-se que sua resolução radiométrica é igual, pois, para cada banda, a quantidade de tons é a mesma que a da imagem pancromática. Outro erro comum é dizer que essa imagem colorida é de 24 bits. Na prática, é o que acontece, mas, formalmente, ela continuará sendo uma imagem de 8 bits, embora com três bandas. Em cada banda, a capacidade de perceber variações de energia é a mesma, daí a injustiça de classificá-la como de resolução radiométrica maior. Ela terá, aí sim, uma resolução espectral maior, pois cobre bandas menores e em maior quantidade.

2.2.2.2. Métodos de aquisição de imagens fotogramétricas digitais

Para se obter uma imagem fotogramétrica digital, há basicamente dois modos: o primeiro é a digitalização matricial de fotografias ou outro tipo de imagem analógica, por intermédio de aparelhos chamados *scanners*; o segundo é a aquisição direta no formato digital, a partir de câmaras fotogramétricas digitais.

A digitalização matricial envolve vários tipos de *scanner*. O mais conhecido do usuário comum de informática é o *scanner* de mesa. A utilização desse equipamento envolve a colocação da imagem analógica sobre a mesa de vidro. Em seguida, a matriz de CCD percorrerá a imagem para a frente e para trás, gravando os valores dos números digitais dos *pixels* que comporão o arquivo digital.

O CCD é, na verdade, um conjunto de pequenos diodos sensíveis à determinada radiação (nesse caso, à luz) que convertem fótons em elétrons, gerando uma pequena corrente em cada um dos detectores. Quanto maior a quantidade de energia que chega a um detector, maior é a corrente gerada nele.

Os *scanners* usados em fotogrametria digital são geralmente dotados de dispositivos de vácuo, a fim de assegurar a não-ocorrência de distorções na imagem fotográfica digitalizada. Essas distorções podem ser causadas pela camada de ar entre a base do fotograma a ser digitalizado e o seu respectivo suporte no *scanner*.

Quanto ao tipo, os *scanners* podem ser classificados em *scanners* de tambor, ou *drum scanners* (figura 22), e *scanners* de mesa, ou *flatbed scanners*. Em qualquer caso, utilizam a tecnologia PMT (*Photo Multiplier Tube*). O documento a ser digitalizado é posicionado em um cilindro de vidro (caso dos *drum scanners*) ou colado a vácuo em uma superfície lisa (caso dos *scanners* de mesa). No centro do sistema, há um sensor que separa em três raios a luz refletida pelo documento. Cada raio é enviado a um filtro colorido em que a luz é transformada em um sinal elétrico correspondente, sendo este sinal amostrado e discretizado numa escala de tons de cinza.

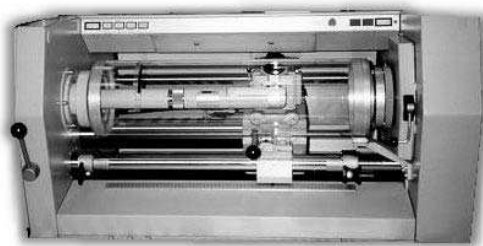


Figura 22: Digitalizador (ou *scanner*) de tambor (*drum scanner*)
– fonte: *Printing Systems*.

Os *scanners* geralmente são fornecidos com um programa de configuração, no qual serão definidos os parâmetros radiométricos: digitalização em tons de cinza ou colorida, quantidade de *bits* por *pixel* e outros. A

gradação dos diferentes tons da imagem será feita do seguinte modo: o tom mais claro equivalerá à corrente mais alta; o tom mais escuro, à corrente mais baixa gerada para a imagem. Nesse intervalo, divide-se a variação entre a corrente mais alta e a mais baixa pelo número de tons envolvidos.

Um fato importante que deve sempre ser ressaltado é a perda de informação decorrente do processo de digitalização. Essa perda é inevitável, uma vez que ainda não há dispositivos capazes de registrar em sua integridade toda a complexidade radiométrica da imagem original. A perda de resolução geométrica pode ser evitada, como será visto a seguir, mas freqüentemente alguma perda é desejável, assim como na radiometria, para diminuir o tamanho dos arquivos finais. O papel do profissional envolvido na área de fotogrametria é fundamental no estabelecimento dos limites de discretização e quantificação, a fim de permitir o tratamento preciso dos dados, preservando o conteúdo e a informação das imagens originais. Um erro nessa fase pode acarretar dados obtidos sem precisão ou imagens tão grandes que se tornam difíceis – ou mesmo impraticáveis – de manipular.

Em geral, para a resolução radiométrica, os valores mais utilizados são os de 256 níveis de cinza (8 *bits*) ou 16 milhões de cores (8 *bits* em 3 bandas). Para a resolução geométrica (ou espacial), importantes considerações são apresentadas a seguir.

Já foi dito que a imagem analógica possui certa resolução espacial, expressa em *l/mm* (ou *lp/mm*). O chamado *teorema da amostragem* define que a *resolução da imagem digital (RID)* deve ser o dobro da *resolução da imagem analógica (RIA)*, ou seja:

$$RID = \frac{RIA}{2} \quad (2.10).$$

O valor de *RIA* é determinado calculando-se quanto, em unidades métricas, ele equivale a uma linha. Por exemplo, 40 *l/mm* equivalem à *RIA* de 0,025 *mm/linha*, ou 25 $\mu\text{m/linha}$. Analogicamente, os valores de *RID* devem ser expressos em unidades métricas/*pixel*.

Outro parâmetro definido empiricamente é o fator Kell, que considera a possibilidade de desalinhamento da imagem analógica. Pelo fator Kell:

$$RID = \frac{RIA}{2\sqrt{2}} \quad (2.11).$$

Por fim, tendo as equações 2.10 e 2.11, pode-se estabelecer a seguinte relação:

$$\frac{RIA}{2\sqrt{2}} \leq RID \leq \frac{RIA}{2} \quad (2.12).$$

Para um caso de $RIA = 40\mu m$, a resolução ótima da imagem digital deve estar entre 14 e 20 $\mu m/pixel$. Tomando-se uma média, pode-se fixar o valor para 17 $\mu m/pixel$. Caso se deseje expressar a resolução em *dpi* (*dots per inch*; pontos por polegada), o equivalente seria 1.500 *dpi*. E mais: se a escala da foto é de, por exemplo, 1:20.000, o valor do lado do *pixel*, no terreno, será de $17\mu m/pixel \times 20000 = 0,34 m/pixel$, que será o elemento de resolução no terreno (ERT).

Atualmente, há *scanners* capazes de digitalizar *pixels* do tamanho de $3,5\mu m/pixel$, a 16 *bits* por banda, com acurácia geométrica de menos de 2 μm em cada eixo de digitalização.

O segundo método de aquisição de imagens digitais (câmaras fotogramétricas digitais) ainda não está tão difundido para levantamentos aéreos em virtude, sobretudo, dos altos preços das câmaras fotogramétricas digitais. Estas possuem um funcionamento semelhante ao de uma câmara a filme, mas, em vez de terem um filme no plano focal, há uma matriz de CCDs. É vital perceber a diferença conceitual entre esse tipo de câmara e as câmaras digitais de satélites de sensoriamento remoto. Graças à maior distância entre estes e o terreno a ser imageado, é mais fácil utilizar arranjos mais econômicos de CCDs, como os de varredura (dois tipos: eletrônica e mecânica).

A figura 23 mostra os três principais sistemas de obtenção de imagens a partir de câmaras aéreas (e orbitais): o primeiro envolve uma matriz de *pixels* completa (sistema de quadro ou *frame*), que adquire imagens sobre

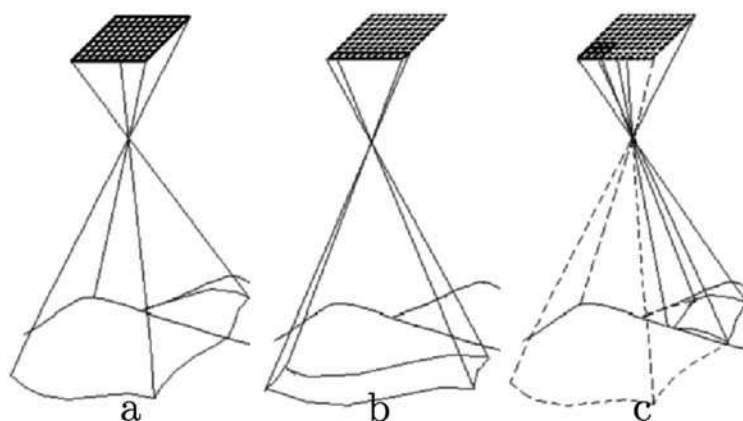


Figura 23: Diferentes modos de funcionamento de câmaras digitais.

todo um trecho do terreno (23a); o segundo (23b) é o sistema por varredura eletrônica (*pushbroom*): há somente uma linha de *pixels*, que adquire uma linha imediatamente abaixo dela (a imagem final é montada a partir da união das imagens parciais adquiridas); o terceiro (23c) é o sistema por varredura mecânica (*whiskbroom*): um conjunto de detectores é rotacionado até percorrer a área desejada (é o método que envolve o maior esforço computacional para corrigir as distorções).

2.3. Principais problemas que afetam a aquisição de imagens

2.3.1. Aberrações geométricas

Essas aberrações ocorrem graças ao formato das lentes que compõem o sistema da câmara. São as seguintes:

- *aberração de esfericidade*: ocorre devido à curvatura da superfície da lente e afeta as imagens de objetos situados no eixo óptico. Como consequência, há uma falta de clareza e nitidez, reduzindo o contraste da imagem e piorando a observação de detalhes. Para corrigi-la, utilizam-se combinações de lentes no próprio sistema de lentes da câmara;
- *coma*: ocorre devido à forma da lente e afeta as imagens de objetos situados fora do eixo óptico (raios oblíquos). É eliminada através da alteração da superfície dos elementos componentes do sistema óptico e limita-se à abertura do diafragma;
- *astigmatismo*: produz, a partir de um ponto-objeto, imagens definidas por linhas retas perpendiculares entre si, diminuindo a qualidade da imagem. É reduzido quando o plano focal é colocado no círculo de confusão mínima, onde o astigmatismo é minimizado;
- *curvatura de campo*: objetos situados em um mesmo plano a ser imageado não possuem seus círculos de confusão mínima situados no mesmo plano, o que faz com que o plano-objeto não seja estritamente plano, mas sim um parabolóide. É bastante controlado quando se diminui a abertura do diafragma;
- *distorção*: é a única que afeta a posição dos objetos imageados, e não a qualidade da imagem. Há dois tipos de distorção: radial simétrica e descentrada. A distorção radial simétrica ocorre devido à refração sofrida por um raio de luz ao atravessar uma lente e atinge regularmente os pontos da imagem, a partir do ponto principal de

simetria. Já a distorção descentrada é causada pelo não-alinhamento dos eixos ópticos dos componentes da objetiva de uma câmara. Ambas são modeladas por equações matemáticas, cujos coeficientes são obtidos através do certificado de calibração de câmara.

Para a distorção radial simétrica, as equações são do tipo polinomial (Schenk, 1999):

$$\delta x = (k_0 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) x'' \quad (2.13);$$

$$\delta y = (k_0 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) y'' \quad (2.14);$$

$$x' = x - \delta x \quad (2.15);$$

$$y' = y - \delta y \quad (2.16);$$

onde:

δx e δy são as componentes da distorção radial simétrica;

r é o raio a partir do ponto principal de simetria;

k_0, k_1, k_2, k_3 são os coeficientes que constam do certificado de calibração de câmara;

x'' e y'' são as coordenadas do ponto sem correção, referidas ao ponto principal de simetria;

x' e y' são as coordenadas corrigidas da distorção radial simétrica.

Para a distorção descentrada, o seguinte modelo foi estabelecido (id., ibid.):

$$\delta x' = p_1 (r^2 + 2x''^2) + 2p_2 x'' y'' \quad (2.17);$$

$$\delta y' = p_2 (r^2 + 2y''^2) + 2p_1 x'' y'' \quad (2.18);$$

$$x = x' - \delta x' \quad (2.19);$$

$$y = y' - \delta y' \quad (2.20);$$

onde:

$\delta x'$ e $\delta y'$ são as componentes da distorção radial simétrica;
 r é o raio a partir do ponto principal de simetria;
 p_1 e p_2 são os coeficientes que constam do certificado de calibração de câmara;
 x'' e y'' são as coordenadas do ponto sem correção, referidas ao ponto principal de simetria;
 x' e y' são as coordenadas corrigidas da distorção radial simétrica;
 x e y são as coordenadas corrigidas das duas distorções.

No passado, utilizavam-se princípios óptico-mecânicos para corrigir as distorções. Atualmente, os métodos numéricos mostram-se muito mais práticos. Uma descrição mais detalhada do uso deles será efetuada no capítulo referente à orientação interior.

2.3.2. Aberração cromática

Esse tipo de efeito advém do fato de a luz se decompor em diversos comprimentos de onda ao passar por um sistema de lentes, de modo semelhante a um prisma. A distribuição dessa aberração independe da abertura do diafragma e é razoavelmente constante para todas as áreas do plano-imagem. A correção para esse problema se dá com a combinação de duas lentes de convergências opostas e índices de refração diferentes (Andrade, 1997).

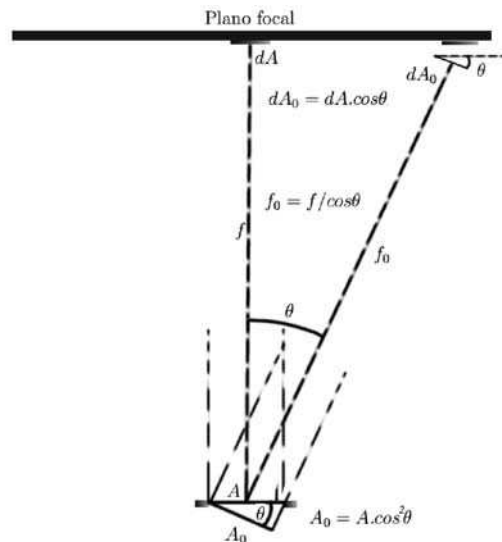


Figura 24: Princípio do escurecimento dos cantos da imagem (adaptado de Lillesand e Kiefer, 2000).

2.3.3. Distribuição de luz no plano focal

A luz que chega ao plano focal para um ponto situado na periferia desse mesmo plano tem uma intensidade proporcional ao fator $E_0 \cos^4 \theta$ (figura 24), onde E_0 é a intensidade em um plano no eixo focal. A principal consequência é o escurecimento dos cantos da imagem. Hoje, através de filtros especiais, esse efeito é quase completamente eliminado.

2.3.4. Arrastamento da imagem

Durante o tempo de exposição, o movimento da plataforma (sensor) pode provocar esse efeito, que se caracteriza por uma perda de nitidez na imagem final. Ele é modelado pela equação a seguir:

$$a = VtE \quad (2.21),$$

onde:

a é o valor do arrastamento;

V é a velocidade da plataforma em m/s ;

t é o tempo de exposição em s ;

E é a escala da foto.

O arrastamento pode ser corrigido com o uso de mecanismos de compensação de movimento (*forward motion compensation*), que movem o filme durante a exposição, mantendo-o na mesma posição relativa ao terreno. As melhores câmaras fotogramétricas aéreas hoje em dia possuem sistemas desse tipo.

2.3.5. Efeitos atmosféricos

Variam dia a dia. Alguns casos clássicos são:

- *dias ensolarados*: causam sombras muito compridas em determinados horários. A solução é realizar vôos quando o sol está alto. Valores para ângulo de elevação do sol em função da época do ano e da altitude média do lugar são encontrados em Albertz e Kreiling (1989);
- *umidade*: acentua a reflexão da luz solar nas camadas atmosféricas (nas regiões tropicais principalmente). Causa o efeito chamado *hot-*

spot, que diminui o contraste da imagem final. Deve-se programar o vôo para que a distância zenital do sol esteja superior à metade do campo de abertura da objetiva da câmara usada;

- *névoa atmosférica*: as partículas da névoa tendem a refletir o azul (espalhamento de Rayleigh), deixando a imagem fotogramétrica azulada. Para diminuir esse efeito, usa-se um filtro amarelo (chamado de *minus blue*) com boa transmitância para as demais cores;
- *variação do índice de refração nas camadas atmosféricas*: em função dos diferentes índices de refração, os raios ópticos não são exatamente retos, sofrendo curvaturas que levam, na imagem, ao deslocamento dos pontos de sua verdadeira posição. Schenk (1999) indica uma fórmula para a correção desse efeito:

$$dr = K \left(r + \frac{r^3}{f^2} \right) \quad (2.22);$$

$$K = \left[\frac{2410H}{H^2 - 6H + 250} - \frac{2410h^2}{(h^2 - 6h + 250)H} \right] 10^{-6} \quad (2.23);$$

onde:

r é a distância do ponto principal (centro da foto) a um determinado ponto na imagem;

dr é a variação entre a posição verdadeira do ponto e a posição registrada na foto (a distância eivada de refração é sempre maior; logo, dr deve ser subtraído de r original);

f é a distância focal da câmara;

H é a altura de vôo;

h é a altitude do plano médio do terreno.

2.4. Características de obtenção das imagens

Como já citado no capítulo 1, as imagens devem possuir áreas de superposição de 50% no mínimo, a fim de terem seu potencial fotogramétrico plenamente aproveitado. Alia-se a isso a necessidade de fixação de parâmetros rígidos de obtenção das imagens, o que levará a uma melhor manipulação destas a partir dos modelos matemáticos desenvolvidos para a fotogrametria digital. Esses procedimentos serão explicitados para os três casos mais frequentes de obtenção de imagens fotogramétricas: terrestre, aéreo e orbital.

No método *terrestre*, a aquisição de imagens fotogramétricas se dá através de fototeodolitos ou de câmaras não-métricas montadas em tripés bem fixados. A utilização da câmara métrica, nesse caso, visa a uma maior rigidez nas coordenadas de câmara, além de contar com parâmetros já definidos em um certificado de calibração. Entretanto, dado o fato de, em quase todos os casos, os levantamentos terrestres serem realizados a partir de estações estáticas (em relação à Terra), os efeitos danosos do deslocamento da plataforma onde se instala a câmara são completamente eliminados. Assim, a utilização de câmaras não-métricas passou a ganhar grande importância, uma vez que estas são muito mais baratas e práticas. Inúmeras pesquisas foram estabelecidas nessa área, levando a procedimentos seguros de calibração. Esse procedimento costuma ser realizado fotografando-se um determinado alvo. Maiores detalhes sobre o assunto são fornecidos por Ferreira (2001).

Para a restituição e geração de produtos fotogramétricos, o objeto deve ser imageado a partir de, pelo menos, dois pontos de vista diferentes – obtendo-se, assim, um par estereoscópico da cena. Outros pontos de vista colaboram como injunções a mais nos cálculos. Esse método encontra especial importância na restituição de monumentos e acidentes naturais de difícil acesso. O referencial usado é local e, em geral, definido para cada projeto em separado. Os pontos de controle podem ser pré-sinalizados (marcados no objeto) ou determinados posteriormente, embora a primeira opção seja a mais utilizada nesse caso. Os modelos matemáticos que se aplicam em um levantamento fotogramétrico terrestre de curta distância são razoavelmente genéricos e aplicáveis em todos os casos, desde que guardadas as analogias quanto ao sistema de coordenadas global e aos pontos de controle.

A figura 25 mostra um caso de levantamento terrestre, no Castelo Garcia d'Ávila (Bahia, Brasil), desde sua obtenção até os produtos finais gerados. O castelo foi construído em meados do século XVI pelos portugueses e é um dos poucos edifícios das Américas de estilo medieval, apresentando elementos característicos do estilo português da época: o manuelino. Por meio de uma fundação criada especificamente para tal fim, tem sido restaurado intensivamente desde o início da década de 1990. Para tanto, foi fundamental o trabalho de reconstituição fotogramétrica da fachada, que, aliado a outras atividades de pesquisa histórica e arqueológica, já possibilitou a restauração da capela, que faz parte do setor mais antigo da edificação. Mais informações sobre o assunto podem ser encontradas em Pires Jr. et al. (1994).

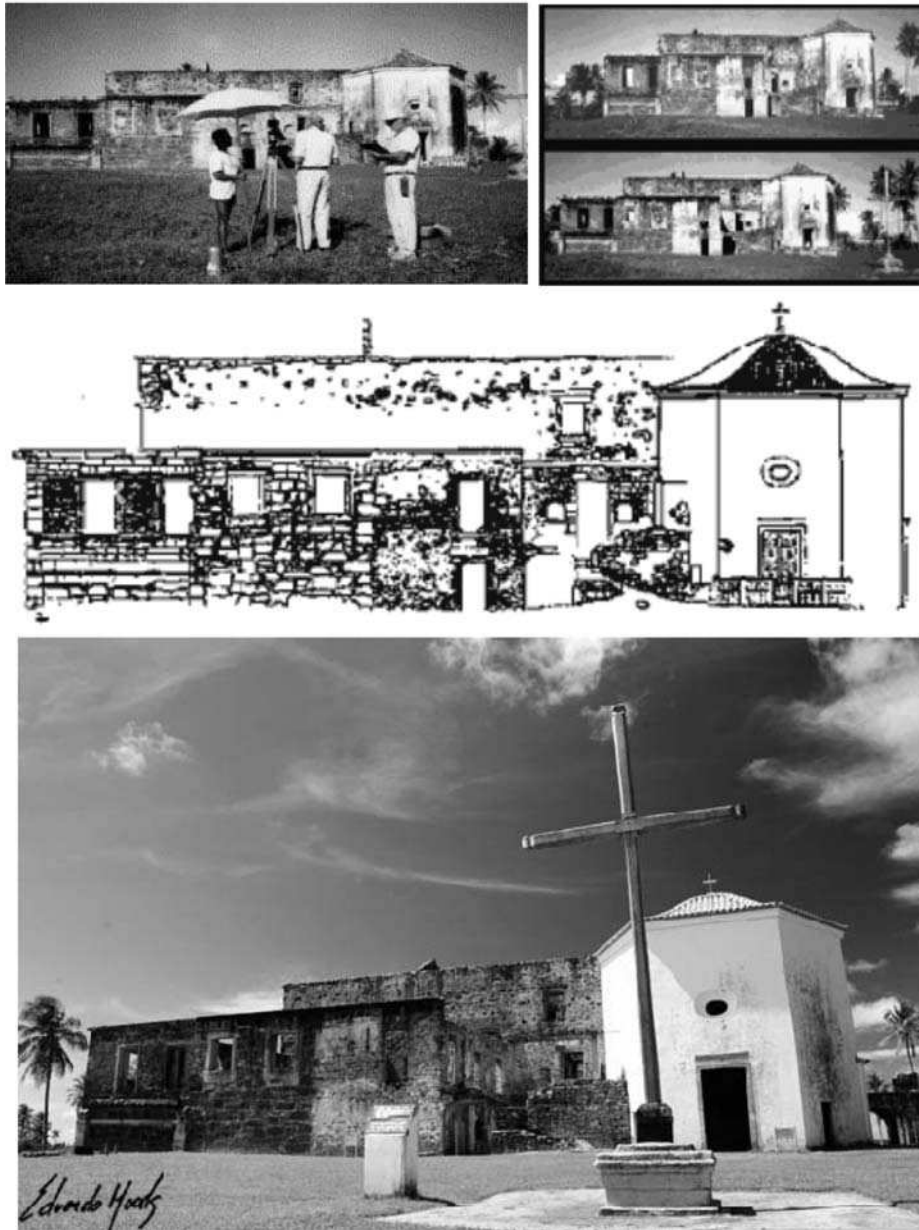


Figura 25: Castelo Garcia d'Ávila – vista do levantamento fotogramétrico terrestre, par estereoscópico, planta da fachada e fotografia artística da construção com a capela semi-restaurada (fonte: Fundação Garcia d'Ávila).

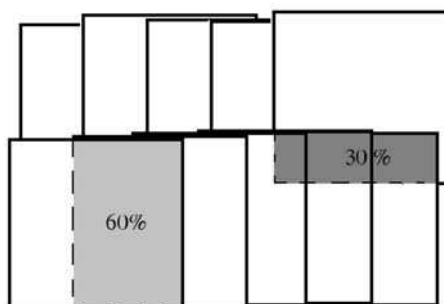


Figura 26: Recobrimentos lateral e longitudinal em uma imagem fotogramétrica.

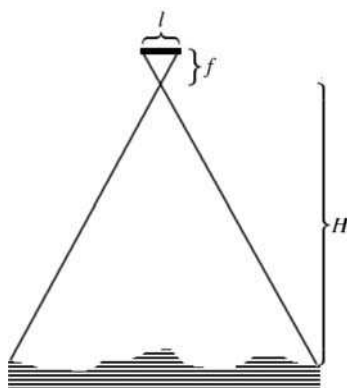


Figura 27: Parâmetros de um vôo fotogramétrico.

O método *aéreo* foi, de longe, o mais empregado na obtenção de dados cartográficos do terreno. Portanto, foi o que mais gozou dos benefícios de uma organização padronizada de métodos e procedimentos. Como resultado, foi possível, desde o início do século passado, a criação de aparelhos capazes de executar operações fotogramétricas a partir de imagens aéreas tomadas sob determinadas condições – e que, até hoje, já na era digital, são mantidas. São elas:

- *distância focal e abertura da câmara*: como já foi dito, obedecem a três padrões (normal, grande angular e supergrande angular);
- *recobrimento lateral e longitudinal*: duas imagens adjacentes devem ter um recobrimento (área de superposição) nominal de 60%. Duas faixas de vôo devem possuir recobrimento de 30%. Isso garante maior operacionalidade às imagens obtidas, em detrimento do maior número necessário sobre determinada região. Essa condição é apresentada na figura 26. Há de se observar, contudo, que os

valores numéricos apresentados podem variar em função da finalidade da cobertura aerofotogramétrica;

- *escala de vôo*: para imagens aéreas, a câmara está focalizada para o infinito, devido à grande distância até o terreno. Isso possibilita que relações simples de razão e proporção sejam estabelecidas, a fim de que sejam determinadas variáveis dependentes da escala em um vôo fotogramétrico. Veja a figura 27, na página anterior, que exhibe melhor esses parâmetros.

A escala da foto é definida pela relação entre uma distância na imagem e sua homóloga no terreno:

$$E = \frac{d}{D} \quad (2.24).$$

Tomando como base a figura 27, outras relações também podem ser descritas:

$$E = \frac{f}{H} \quad (2.25);$$

$$E = \frac{f}{h_m - h} \quad (2.26);$$

onde:

h é a altitude da câmara;

h_m é a altitude média do terreno.

A escala da equação 2.25 é aproximada e constante para toda a foto. Os métodos orbitais são mais recentes, já que a fraca resolução espacial dos primeiros satélites impedia seu uso para a elaboração de documentos cartográficos de precisão. Somente a partir do satélite SPOT (*Système Pour l'Observation de la Terre*), majoritariamente francês, a possibilidade de aplicação em restituição fotogramétrica tornou-se viável (a própria França alega ter realizado diversas folhas de seu mapeamento sistemático na escala 1:50.000 utilizando tal satélite). Esse sistema possibilitou o uso da estereoscopia, pois a câmara poderia ser rotacionada, permitindo o imageamento da mesma região em outra órbita (figura 28). Ele também é utilizado pelos satélites CBERS I e II (*China-Brazil Earth Resources Satellite*, ou Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres) e IKONOS-II. Este último, por ter resolução espacial de 1 m, é considerado o primeiro satélite de sensoriamento remoto realmente

voltado para a cartografia precisa. Não é um sistema ideal, pois entre uma órbita e outra o terreno pode mudar drasticamente, dificultando a estereoscopia e o reconhecimento automático de pontos homólogos por correlação.

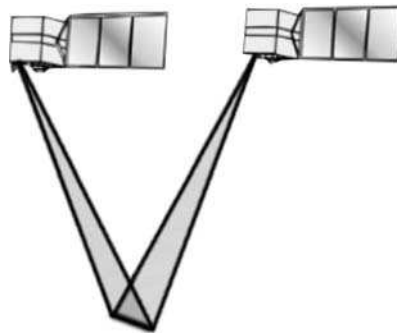


Figura 28: Estereoscopia a partir do satélite CBERS (fonte: INPE).

Os satélites ALOS-2 (Japão) e Terra (sensor Aster) (EUA) possuem sistemas sensores equipados com mais de uma câmara do mesmo tipo posicionadas em inclinações diferentes, a fim de adquirir imagens com recobrimento em um mesmo instante.

As imagens de satélites fotogramétricos – devido às estruturas diferentes de cada câmara e cada sistema – exigem análise diferenciada e criação de modelos matemáticos adequados a cada satélite, o que acaba dificultando sua popularização. Nesse sentido, passam a ser necessários módulos adicionais para permitir o processamento fotogramétrico, estimulando o uso das imagens apenas em retificações (comumente chamadas de “georreferenciamentos”). Espera-se que, para o futuro, essa total falta de padronização possa ser contornada de forma satisfatória.

2.5. Considerações finais

Este capítulo teve por objetivo explicar alguns tópicos relevantes quanto à aquisição de imagens para a fotogrametria digital. Embora o texto das últimas páginas não tenha nem de longe esgotado a literatura de referência sobre o assunto, apresenta um olhar introdutório sobre como as imagens digitais chegam até o usuário.

No próximo capítulo, estudar-se-ão formas de melhorar a extração de dados de tais imagens – ou algoritmos de processamento digital de imagens. Com esse texto, finda a parte introdutória sobre fotogrametria digital. Podemos, enfim, apresentar os algoritmos e a teoria das técnicas fotogramétricas.

Capítulo 3

Tópicos em processamento de imagens aplicados à fotogrametria

O tema processamento digital de imagens (PDI) compreende o conjunto de técnicas que tem por finalidade a extração de informações de imagens digitais. Nessa área, podem ser enquadrados os métodos de aquisição, realce (ou pré-processamento), segmentação, pós-processamento, extração de atributos e classificação. Embora este capítulo possa a princípio parecer fora do propósito original da obra, é importante ao menos fornecer uma idéia geral a respeito do assunto, já que ferramentas de fotogrametria digital costumam se valer do PDI. Além disso, algumas das mais importantes referências da área de fotogrametria digital dedicam espaço a esse tema.

As seções a seguir apresentam brevemente cada um dos tópicos listados anteriormente, sem a pretensão de esgotar o assunto, e trazem exemplos práticos de utilidade para a fotogrametria digital. Leitores interessados em expandir seus conhecimentos nesse campo podem consultar as seguintes referências: Castleman (1979), Gonzalez e Woods (1993) e Gomes e Velho (1994).

3.1. Principais métodos de melhoramento de imagens

Após a aquisição de imagens, processo abordado nas seções 2.2.1 e 2.2.2 (v. pp. 47 e 53, respectivamente), pode ser necessário processá-las tornando-as mais adequadas a uma finalidade específica. Em geral, deseja-se recuperar, ao menos parcialmente, características obscurecidas durante a etapa de obtenção. Antes de prosseguir, é preciso deixar claro que tais técnicas são, quase sempre, dedicadas a um problema em particular. Além disso, freqüentemente, é mais eficiente dedicar-se à etapa de aquisição, para que esta produza imagens adequadas à aplicação em questão até onde for possível, evitando-se a perda de informação ou a excessiva complexidade na etapa de realce de imagens.

No presente capítulo, os métodos de realce de imagens são divididos de acordo com a natureza dos algoritmos empregados. Dentro dessa pers-

pectiva, as seções a seguir apresentam brevemente algumas categorias de métodos de realce de imagens digitais e mencionam exemplos práticos aplicados à fotogrametria digital, sensoriamento remoto e áreas afins.

3.1.1. Operações pontuais

Operações pontuais são métodos que produzem imagens de saída em que os valores de intensidade de cada um de seus *pixels* são exclusivamente função da intensidade do *pixel* de mesma posição na imagem de entrada. Essa transformação pode ser formulada pela seguinte equação:

$$s = T(r) \quad (3.1),$$

onde r e s representam, respectivamente, as intensidades nas imagens de entrada e saída do *pixel* situado na posição. Aplicando-se a transformação a todos os *pixels*, é obtida a imagem de saída.

A função T , que mapeia a intensidade na imagem de entrada e na imagem de saída, pode ser tanto linear quanto não-linear. Uma forma prática de implementação se dá através de uma tabela de conversão (*look-up table*). Se o número de intensidades distintas na entrada e saída da tabela diferir, a operação não poderá ser revertida.

Diversas operações pontuais são apresentadas na literatura; entre as quais: negativos de imagem; aumento de contraste; redução de contraste; equalização e especificação de histograma; e, até mesmo, aplicação de um limiar para produzir uma imagem binária.

Como exemplo de operação pontual aplicada à fotogrametria digital, apresenta-se o aumento de contraste. Essa operação é potencialmente útil quando a imagem adquirida está demasiadamente clara ou escura. Nesses casos, pode ser especificada para aumentar o contraste dos *pixels* claros e/ou escuros.

Outro problema da aquisição de imagens de sensores remotos, que pode ser compensado por procedimento similar a uma operação pontual, é o efeito *striping*. Esse efeito sistemático é originado por erro na calibração dos diversos sensores usados na aquisição da imagem, os quais, dessa forma, respondem diferentemente. O *destriping*, procedimento de compensação desse efeito, pode ser realizado da seguinte forma: compara-se o histograma de cada sensor individualmente; em seguida, são calculados os parâmetros das operações de contraste necessárias à uniformização da resposta de cada sensor. Mais detalhes podem ser encontrados em Lillesand e Kiefer (2000).

3.1.2. Operações de vizinhança

Nas operações de vizinhança, diferentemente das operações pontuais, a intensidade do *pixel* (x, y) na imagem de saída é função dos valores de diversos *pixels* na imagem de entrada. Esse conjunto de *pixels*, comumente referido pelo termo vizinhança, é em geral centrado em (x, y) . As dimensões da vizinhança são normalmente quadrangulares ímpares (3 x 3, 5 x 5 etc.) e as mesmas das de uma máscara. Por sua vez, a máscara define a função de transferência a ser aplicada aos números digitais dos *pixels* da vizinhança.

Neste momento, devemos lembrar que muitos autores utilizam o termo *kernel* para se referir ao que na presente obra se define como máscara. Além disso, é preciso chamar a atenção do leitor, pois, na literatura, nem sempre a distinção dos conceitos de vizinhança e máscara fica clara.

A função de transferência pode ser linear ou não-linear. No caso linear, contém o peso associado a cada posição da vizinhança. Nesse contexto, o valor da intensidade na saída é igual ao somatório dos produtos das intensidades dos *pixels* da vizinhança na imagem de entrada pelos respectivos pesos da máscara.

No caso não-linear, as operações de vizinhança podem ser compreendidas, matematicamente, como a convolução da imagem com a máscara, mais precisamente da função-imagem com a função-máscara. Por conseguinte, existe equivalência entre as operações de vizinhança que empregam operações lineares (filtros de convolução ou filtros espaciais) e os filtros no domínio da frequência. Alguns tipos de filtro importantes são:

- *filtros “passa-baixa”*: recebem essa denominação os filtros que deixam passar apenas as baixas frequências, ou seja, eliminam grandes contrastes, como, por exemplo, bordas bem definidas. São chamados de filtros de suavização devido ao efeito que causam na imagem original, depois de sua aplicação;
- *filtros “passa-alta”*: ao contrário do que ocorre no caso do filtro anterior, esses preservam sobretudo as altas frequências. São chamados de filtros de realce de bordas, pois ressaltam mudanças bruscas nos níveis de cinza, que caracterizam as bordas;
- *filtros direcionais*: são filtros “passa-alta” que preservam as altas frequências numa determinada direção;
- *filtros de mediana*: são filtros não-lineares; sua máscara retorna à mediana dos *pixels* da janela. Esse filtro proporciona a redução de

ruído sem, contudo, borrar a imagem de forma tão intensa quanto o filtro “passa-baixa”. É especialmente efetivo na extração de ruído não-sistemático de impulso, também chamado ruído *salt-and-pepper* (sal e pimenta), que tem este nome por se apresentar como pontos brancos e pretos aleatoriamente superpostos à imagem digital (Gonzalez e Woods, 1993);

- *filtros de correção de line dropping*: sensores mal calibrados ou perda de dados podem fornecer imagens com *pixels* situados em uma mesma linha com números digitais sistematicamente alterados ou ausentes. O efeito da alteração é chamado *striping*. Por outro lado, a perda de linhas é chamada *line drop*. Isso pode ser corrigido com um filtro de *destriping*, filtro especial que pode substituir os números digitais ausentes ou espúrios.

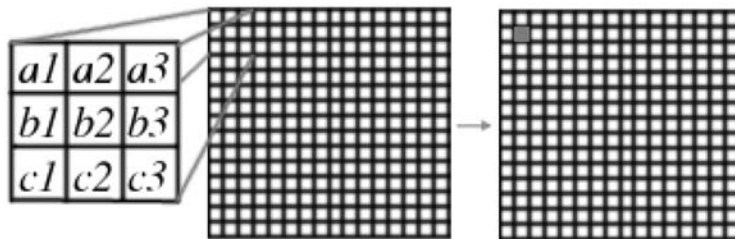


Figura 1: A filtragem exemplificada refere-se à aplicação de uma máscara de tamanho 3 x 3 sobre os valores dos números digitais de uma vizinhança, formada pelos *pixels* de *a1* a *c3*, centrada em (x, y) e de mesmas dimensões.

O resultado (representado em cinza) fornece o valor do *pixel* (x, y) na imagem resultante.

3.1.3. Operações algébricas

Operações algébricas consideram duas ou mais imagens de entrada produzindo uma imagem de saída em que o número digital de cada *pixel* corresponde à aplicação de um operador algébrico sobre os valores dos *pixels* de mesma posição nas imagens de entrada. Alguns tipos de operação algébrica são apresentados a seguir:

- *média aritmética de imagens*: essa operação algébrica consiste em efetuar a média em diversas imagens da mesma cena, a fim de melhorar a relação sinal-ruído. Esse tipo de estratégia é muito útil quando a etapa de aquisição de imagens for suscetível a ruído. A

- tendência, quando o efeito do ruído variar sua distribuição geométrica a cada instante de tempo, é que, à medida que cresça o número de imagens consideradas, melhore a qualidade da imagem média;
- *subtração de imagens*: exemplos de uso dessa operação algébrica são a detecção de mudanças e a correção de iluminação não-homogênea. No caso da detecção de mudanças, duas imagens registradas da mesma cena em instantes diferentes são comparadas. Por exemplo, para o caso de imagens sobre áreas rurais, as regiões que possuem diferenças significativas têm grandes chances de terem sofrido mudanças da cobertura e/ou do uso do solo. Imagens para aplicações de fotogrametria arquitetônica podem sofrer efeito da não-homogeneidade da iluminação. Para a correção desse efeito, a imagem original pode ser subtraída da aplicação consecutiva de um filtro “passa-baixa” bastante restritivo, máscara de dimensões 9 x 9 ou superior, sobre uma cópia da imagem original;
 - *operações lógicas*: empregam uma ou mais imagens binárias como entrada e retornam, como resultado, uma nova imagem binária. Como operadores lógicos, podem ser usados: “negação”, “ou”, “e” e “ou-exclusivo”. Em geral, operações lógicas são empregadas na etapa de pós-processamento, tema apresentado na seção 3.3; p. 78.

3.1.4. Operações geométricas

São operações que visam à transformação da geometria ou disposição do suporte geométrico das imagens. Em linhas gerais, uma operação geométrica implica modificação da disposição dos *pixels* em relação à imagem original (transformação espacial) e definição dos novos valores de intensidade em função da nova disposição (interpolação dos *pixels*).

3.1.4.1. Transformações espaciais

Nesta seção, serão brevemente apresentados dois tipos de transformação espacial: as lineares e as não-lineares. Para tanto, considerar-se-ão as equações 3.2:

$$\begin{aligned} x' &= a_0 + x \\ y' &= Ky, \forall K \in R \end{aligned} \quad (3.2a);$$

$$\begin{aligned} x' &= a_2x + a_1y + a_0 \\ y' &= b_2x + b_1y + b_0 \end{aligned} \quad (3.2b).$$

- *transformações espaciais lineares*: podem ser descritas através de um modelo linear, conforme a equação 3.2a. São exemplos de transformações espaciais lineares a translação e a mudança de escala;
- *transformações espaciais não-lineares*: podem ser representadas em formato linearizado, por intermédio de um polinômio de 1º grau (equação 3.2b) ou não, caso em que são utilizados polinômios de grau maior ou igual a 2, que incluem, portanto, coeficientes para termos de mais alta ordem (x^2 , x^3 , ... , y^2 , y^3 , ...). Transformações não-lineares são muito importantes na fotogrametria digital, pois muitos processos físicos ou geométricos são definidos por modelos não-lineares. Mais detalhes podem ser obtidos nas seções 4.4 e 7.2; pp. 94 e 144, respectivamente.

3.1.4.2. Interpolação dos números digitais

Conforme apresentado anteriormente, a primeira etapa das operações geométricas corresponde à definição das regiões da imagem de entrada que darão origem a cada um dos *pixels* da imagem de saída. No entanto, em função dos valores dos números digitais da região da imagem de entrada, ainda é preciso determinar o número digital na imagem de saída. Essa fase é chamada interpolação dos números digitais. Existem diversos métodos de interpolação apresentados na literatura, entre eles: replicação, interpolação bilinear e bicúbica. Detalhes complementares são apresentados na seção 7.3; p. 148.

3.1.5. Realce de cor

Há diversos sistemas de cor usados em processamento de imagens digitais. O livro de Gomes e Velho (1994) é uma boa referência sobre esse tema. Basicamente, os sistemas de cor fornecem diferentes formas para expressar as várias tonalidades presentes na natureza.

Entre os diversos sistemas de informação de cor, destaca-se o sistema HSI – *Hue, Saturation and Intensity*; matiz, saturação e intensidade (Lillesand e Kiefer, 2000), pela sua utilidade prática. Genericamente, pode-se relacionar ao conceito de matiz a idéia de coloração; à saturação, a idéia de tons mais puros ou mais pastéis; à intensidade, a idéia de “claro-escuro”. Uma operação muito útil em fotogrametria digital e sensoriamento remoto, que se torna possível graças a esses conceitos, é a fusão entre imagens de resoluções diferentes cobrindo a mesma área. A fusão de imagens tem como objetivo aliar a maior resolução geométrica de uma imagem pancromática (tons de cinza) à

maior resolução radiométrica de uma imagem em três bandas. Para fazer isso, basta trocar a coordenada da intensidade da imagem colorida pela da imagem pancromática, preservando as proporções de tamanho dos *pixels*. O produto final é uma imagem que alia as duas resoluções ótimas.

Outra técnica útil que pode ser executada também a partir da representação HSI é o realce individual ou simultâneo das componentes matiz, saturação e intensidade (Lillesand e Kiefer, 2000). Em comparação com o realce feito diretamente nas bandas originais representadas no sistema RGB, o realce feito no modelo HSI pode ser realizado com maior controle sobre quais componentes devem ser corrigidas. Isso se deve ao conteúdo semanticamente mais significativo da decomposição das cores em matiz, saturação e intensidade do que, por exemplo, nas bandas R, G e B do sistema RGB.

3.2. Segmentação

A etapa de segmentação tem como objetivo a seleção, na imagem, das regiões correspondentes aos objetos de interesse. Os objetos são, na maioria dos casos práticos, segmentados por métodos semi-automáticos ou excessivamente específicos. Contudo, é preciso reconhecer o esforço que vem sendo despendido por pesquisadores do mundo inteiro no sentido de aumentar o grau de automatização e generalidade dessa etapa. Esse esforço tem sido relativamente bem-sucedido em diversos casos particulares.

Na literatura, há inúmeras abordagens para a segmentação. Entre elas, podemos mencionar:

- *métodos baseados na definição de faixas de intensidades*: definem, de forma manual ou automática, limiares para os valores dos *pixels*. Em geral, os limiares são valores de intensidade (para imagens em tons de cinza) ou matizes (para imagens coloridas). Os *pixels* cujos números digitais se enquadram na faixa definida pelos limiares inferior e superior compõem os objetos de interesse;
- *métodos baseados na detecção de bordas*: correspondem aos métodos baseados em detecção de descontinuidades nos valores de intensidade de *pixels* vizinhos. Pelo fato de as descontinuidades serem informação de alta frequência, em geral eles são implementados com base em filtros “passa-alta”. Um exemplo bem conhecido é o método de Marr-Hildreth ou *Laplacian of Gaussian* – LOG (Gonzalez e Woods, 1993);

- *métodos baseados em regiões*: visam à definição de regiões contíguas em função de algum critério predefinido. São exemplos de algoritmos baseados em regiões *split-and-merge*, *watersheds*, crescimento de regiões (Gonzalez e Woods, 1993) e *color structure code* (Priese e Sturm, 2003).

Atualmente, uma das áreas mais importantes no estado-da-arte da fotogrametria digital corresponde à extração automática de feições. Do ponto de vista do processamento digital de imagens, essa área pode ser enquadrada na etapa de segmentação. Todavia, são usadas abordagens mais sofisticadas para o problema da segmentação do que aquelas apresentadas nesta seção. Métodos que se valem de conhecimento explicitamente formalizado se mostram bastante promissores (Baltasvias, 2002).

3.3. Pós-processamento

Muitas vezes, o resultado da segmentação não reproduz com fidelidade as características dos objetos de interesse. Nesses casos, podem ser utilizados métodos de morfologia matemática com o intuito de corrigir tais inconsistências. Esses métodos devem ser compreendidos como operações de vizinhança cujas máscaras aplicam uma função não-linear que vai ligar, desligar ou inverter o *pixel* correspondente ao centro de uma janela.

Na verdade, dentro da máscara se define um elemento estruturante que determina os *pixels* vizinhos; em suma, a vizinhança. Dependendo do número de *pixels* ligados em seu interior, é tomada a decisão que define o estado do *pixel* na saída. A geometria do elemento estruturante tem grande influência no resultado da operação; portanto, em função da aplicação, são escolhidos os elementos estruturantes mais adequados. Alguns exemplos de operações morfológicas são apresentados nas seções a seguir.

3.3.1. Erosão

Na operação de erosão, para cada *pixel* ligado da imagem de entrada, se o número de vizinhos ligados for menor do que um determinado limiar, na imagem de saída, o *pixel* será desligado.

Como resultado da operação de erosão, objetos pequenos ou delgados desaparecerão; por outro lado, objetos maiores terão sua área reduzida.

3.3.2. Dilatação

Na operação de dilatação, para cada *pixel* desligado da imagem de entrada, se o número de vizinhos ligados for maior do que um determinado limiar, na imagem de saída, o *pixel* será ligado.

Como resultado da operação de dilatação, buracos pequenos ou estreitos desaparecerão; por outro lado, objetos maiores terão sua área aumentada.

3.3.3. Abertura

A operação de abertura pode ser definida como a aplicação sucessiva de n operações de erosão seguida da aplicação sucessiva de n operações de dilatação. Como resultado, objetos pequenos e conexões delgadas entre objetos desaparecerão, sem, contudo, alterar substancialmente a área dos objetos maiores.

3.3.4. Fechamento

A operação de fechamento pode ser definida como a aplicação sucessiva de n operações de dilatação seguida da aplicação sucessiva de n operações de erosão. Como resultado, buracos pequenos serão preenchidos e objetos próximos, fundidos; já os objetos maiores não serão afetados.

3.4. Extração de atributos

Muitos dos conceitos apresentados nas seções 3.4 e 3.5 são originários da área de reconhecimento de padrões (Duda, Hart e Stork, 2001). O conceito de representação – capacidade de reproduzir o comportamento, expressar de forma sintética a essência ou substituir sem prejuízo – é especialmente importante para a discussão a seguir. Dentro do tópico sobre processamento digital de imagens, a extração de atributos corresponde à forma de representação de imagens ou objetos contidos em imagens, que fornecem informação útil para a compreensão de algum fenômeno ou no apoio à decisão. No caso específico da fotogrametria digital, suporta a reconstituição do espaço 3-D.

Os atributos medidos podem ser usados diretamente ou servir de entrada para algum método de classificação, em geral apoiada por computador. Quando sucedida por uma etapa de classificação, a extração de atributos tem como objetivo adicional a caracterização das diferentes classes de objetos de interesse. Em outras palavras, a finalidade dessa etapa é a escolha

ou obtenção de um conjunto de atributos que agrupe os objetos de uma mesma classe e afaste os objetos pertencentes a classes diferentes. O não-atendimento dessas metas comprometerá o resultado da etapa de classificação.

Dependendo de quantos objetos de interesse são esperados por imagem, medidas podem ser obtidas da imagem como um todo ou de objetos segmentados. Vale a pena esclarecer que até mesmo a estatística do número total de objetos pode ser um atributo relevante, enquanto os atributos mais diretamente obtíveis em imagens digitais são os próprios valores das intensidades dos *pixels*. Porém, quando há grande dependência linear entre os *pixels*, é desejável a inclusão de uma etapa de redução de dimensionalidade. A redução de dimensionalidade visa à obtenção de uma representação mais compacta que preserve ao máximo as diferenças e similaridades entre os padrões originais. Exemplos de métodos de redução de dimensionalidade amplamente utilizados são a análise de componentes principais e o discriminante de Fisher (Johnson e Wichern, 1998). Além da redução da dependência linear entre os atributos, outra importante vantagem da redução de dimensionalidade é simplificar a etapa de classificação.

Para finalizar esta seção, destacamos alguns tipos importantes de atributos presentes na literatura: atributos geométricos (ex.: área, perímetro, forma); distribuição espacial; atributos oriundos de outros domínios (ex.: Fourier, Hough, Wavelets); e medidas de textura (ex.: parâmetros de Haralick [Haralick, Shanmugam e Dinstein, 1973]).

3.5. Classificação

A etapa de classificação tem como objetivo prover meios para decidir a que classe um padrão de entrada pertence. Existem duas modalidades de classificação: não-supervisionada e supervisionada (Duda, Hart e Stork, 2001).

3.5.1. Classificação não-supervisionada

Em geral, os métodos de classificação não-supervisionada recebem, como entradas, o número de classes (c) desejado e uma amostra $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, onde cada padrão é representado por um vetor $x_i = [x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^m]^T$. Assim, as dimensões da amostra são $n \times m$. Cada linha da amostra corresponde a um padrão x_i^T . Por outro lado, cada coluna de X se refere a um atributo. Deseja-se particionar a amostra em c agrupamentos $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_c\}$ (o termo *clusters* também é muito utilizado) e associar cada padrão da amostra a um desses agrupamentos. Além disso, ao

ser apresentado um novo padrão, é possível definir com qual agrupamento ele mais se assemelha.

Um bom exemplo de seu uso na área de PDI pode ser a segmentação de imagens em função exclusivamente das intensidades dos *pixels*. Para uma dada imagem I , a amostra teria dimensões $p \times b$, onde p corresponde ao número de *pixels* e b , ao número de bandas da imagem. Note que, dessa forma, a segmentação, resultante da classificação não-supervisionada, não incorpora explicitamente qualquer informação geométrica. Como resultado, serão obtidos c grupos de intensidades de *pixels*, os quais poderão ser apresentados como c grupos distintos ou s segmentos contíguos habitados por *pixels* de um mesmo grupo.

3.5.2. Classificação supervisionada

O processo de classificação supervisionada recebe esse nome por demandar a apresentação de uma amostra X da qual se conhece *a priori* a classe a que cada padrão pertence. A seleção dos padrões da amostra deve garantir que sua composição seja representativa dos padrões das diversas classes. Com esses dados, o classificador é treinado, processo no qual aprende a reconhecer, a partir de exemplos, os padrões de cada classe. Depois, espera-se que o classificador possa reconhecer apropriadamente padrões diferentes dos apresentados no treinamento. A essa capacidade dá-se o nome de generalização.

O processo de classificação supervisionada pode ser representado da seguinte forma: cada uma das c classes $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_c\}$ está associada a uma função discriminante $d_i\{x\}$, onde $i \in \{1, 2, \dots, c\}$ e x representa o padrão de entrada a ser classificado. No treinamento, são calculados os parâmetros das funções discriminantes. Por sua vez, o tipo de função discriminante é uma característica do modelo de classificador. Dado um novo padrão x' , são calculados os valores das funções discriminantes e, em seguida, é aplicado um critério de decisão. Como exemplo de critério, pode ser mencionada a classe ω_m correspondente à função discriminante de valor mais elevado, ou seja:

$$m = \underset{i \in \{1, 2, \dots, c\}}{\operatorname{argmax}} d_i\{x'\}.$$

Na literatura, existem inúmeros modelos de classificador supervisionado passíveis de ser apresentados conforme a estrutura anterior. Entre estes, podemos citar: classificador bayesiano, classificador de máxima probabilidade

de, classificador de distância euclidiana e redes neurais artificiais. Um método de classificação supervisionada muito utilizado na fotogrametria digital, por requerer apenas um padrão de treinamento, é a detecção automática de padrões pelo método do coeficiente de correlação cruzado (*cross correlation*).

3.5.2.1. Correlação estatística em imagens

Em várias aplicações no âmbito da fotogrametria digital, faz-se necessária a localização do ponto em uma (ou mais) imagem(ns), homólogo a determinado ponto de outra imagem que tenha uma área de superposição com a imagem de referência. Tal fato decorre da necessidade de superposição entre as imagens utilizadas em fotogrametria. Desse modo, o mesmo objeto (ou feição) deverá estar presente em duas ou mais imagens ao mesmo tempo.

Mecanismos estereoscópicos e uma acurada visualização do operador permitem localizar tais pontos manualmente; porém, muito mais interessante é a idéia de se haver uma localização automática dos mesmos.

O coeficiente de correlação de Pearson pode ser entendido como uma medida do grau de relacionamento linear entre duas variáveis aleatórias. Logo, o coeficiente de correlação tem ênfase na predição do grau de dependência entre duas variáveis aleatórias.

O cálculo da correlação, segundo Stockburger (1998), é realizado através da seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3.1),$$

onde:

σ_{xy} é a covariância entre as duas variáveis;

σ_x é o desvio-padrão da variável X ;

σ_y é o desvio-padrão da variável Y .

A covariância e os desvios-padrão podem ser estimados estatisticamente por meio de seus equivalentes amostrais: a covariância amostral e os desvios-padrão amostrais, que terão suas fórmulas exibidas ao fim do exemplo literal que se segue.

Partindo-se, então, de duas amostras para X e Y , cada uma composta de diversos elementos X_i e Y_i :

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad (3.2).$$

Cada qual tem uma média amostral composta pela soma dos elementos componentes de cada um dos vetores:

$$m_X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} ; \quad m_Y = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad (3.3).$$

A covariância amostral cov_{XY} , estimador da covariância σ_{XY} , pode ser definida como:

$$cov_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - m_X)(Y_i - m_Y)}{n - 1} \quad (3.4).$$

Já os valores dos desvios-padrão amostrais s_X e s_Y são:

$$s_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - m_X)^2}{n - 1}} ; \quad s_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - m_Y)^2}{n - 1}} \quad (3.5).$$

Por fim, o estimador para o coeficiente de correlação pode ser definido por $corr$, que, analogamente à equação 3.1, é:

$$corr = \frac{cov_{XY}}{s_X s_Y} \quad (3.6).$$

O coeficiente de correlação pode levar qualquer valor entre -1 e 1. O sinal do coeficiente de correlação (+, -) define a direção da relação entre as duas variáveis (positiva ou negativa). Uma correlação positiva indica que, à medida que os valores das componentes de uma variável aumentam, os valores das componentes da outra variável também aumentam. Para uma correlação negativa, ocorre o oposto: enquanto uns aumentam, os outros diminuem e vice-versa

O valor em módulo do coeficiente de correlação mede a “força” da relação entre as duas variáveis. Um coeficiente igual a 0,5 indica maior grau de dependência linear do que um de 0,4. Um coeficiente de valor zero indica a total ausência de relacionamento linear entre as variáveis. Por último, coeficientes de valor 1 e -1 indicam uma perfeita dependência linear entre elas.

Uma boa forma de se entender tais variações de correlação é representar os valores de cada variável em um gráfico bidimensional, representando cada X_i em relação ao respectivo Y_i .

A reta de melhor ajuste dá informações importantes sobre a correlação entre as duas variáveis: quanto mais os pontos se aproximam dela, maior é a correlação em módulo. E mais: quanto mais o ângulo da reta em relação à horizontal estiver próximo de 45° , mais o coeficiente se aproxima de 1; quanto mais próximo o ângulo estiver de 135° , mais se aproxima de -1 (figura 2).

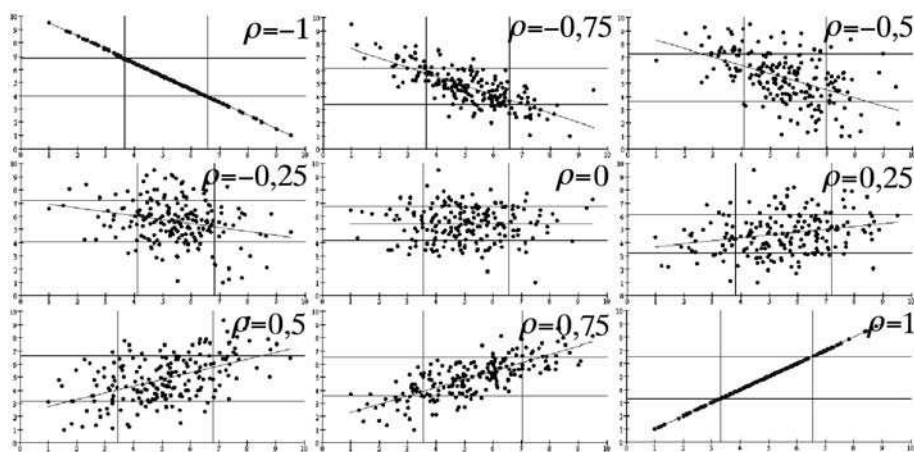


Figura 2: Utilizando o programa SticiGui (programado pelo professor Philip B. Stark, da Universidade de Berkeley) no módulo correlação, pode-se verificar a evolução dos coeficientes, desde -1 até 1. Escolhendo 200 pontos, os respectivos gráficos podem ser exibidos.

Para a correlação de imagens com o intuito de localizar pontos homólogos, interessam sobretudo as correlações positivas. Assim, pode-se presumir que, onde for maior esse coeficiente, localizar-se-á o ponto homólogo desejado.

3.6. Determinação de padrões bidimensionais por correlação

Como já definido, o objetivo da correlação de imagens é determinar pontos homólogos nas imagens digitais. Para isso, um recorte (*template*) é definido na imagem de referência. Tal processo pode ser facilmente implementado computacionalmente: o usuário clica no ponto do qual deseja extrair homólogos em outras imagens. O programa (ou rotina) utilizado grava

numa matriz os valores dos números digitais do *pixel* central e de vários outros adjacentes a ele (intensidade de coloração; ex.: numa imagem de 256 níveis de cinza, o número digital pode ir de 0 a 255). Esses valores são arranjados em uma coluna e equivalerão à variável X . Devem ser utilizados *templates* de números ímpares, para que o ponto de interesse esteja em seu centro. Em geral, são usadas matrizes 9 x 9 ou 11 x 11 para isso. Na figura 3, por simplicidade, foi usada uma matriz 3 x 3.

O próximo passo é varrer a área de procura, região na qual se espera encontrar a ocorrência de um ou mais padrões similares ao *template* recortado.

A partir daí, dentro da janela de procura, um *template* equivalente em tamanho ao da primeira imagem corre *pixel a pixel*, da esquerda para a direita e de cima para baixo. Os valores armazenados neste segundo recorte serão equivalentes à variável Y .

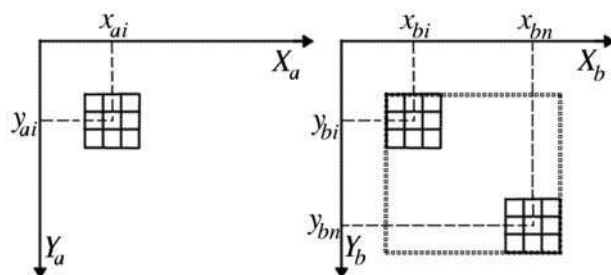


Figura 3: Imagem da esquerda, com *template* definido pelo usuário, e imagem da direita, mostrando em destaque a janela de procura e dois *templates*; um é o inicial e o outro, o final. Além desses, outros intermediários teriam de ser empregados, para que se selecionasse o que tem melhor correlação com o da imagem da esquerda (adaptado de Albertz e Kreiling, 1989).

Assim, calcula-se o coeficiente de correlação entre X e cada um dos valores assumidos por Y . Aquela combinação que possuir o maior valor para o coeficiente de correlação será equivalente aos pontos homólogos. As coordenadas para esse ponto serão as coordenadas do *pixel* central de ambos os *templates* (X e Y).

3.7. Aplicações da correlação estatística

3.7.1. Calibração de *scanner*

Para calibrar um *scanner*, deve-se, em primeiro lugar, digitalizar uma folha de calibração. O exemplo mais simples (quadriculado) é descrito a seguir.

Nesse caso, é importante que os cruzamentos das linhas sejam definidos, de modo que suas coordenadas sejam conhecidas, e que se saiba se estão todos a distâncias iguais uns dos outros, a fim de que possa ser realizado um modelo de correção para todas as imagens obtidas com aquele dispositivo.

Utiliza-se, então, um recorte de um desses cruzamentos como *template* e a imagem digitalizada como área de procura. O programa de calibração deverá ser capaz de perceber que o coeficiente de correlação atingirá altos valores de forma cíclica, atribuindo a esses valores os pontos homólogos (cruzamentos) da imagem de calibração (figura 4).

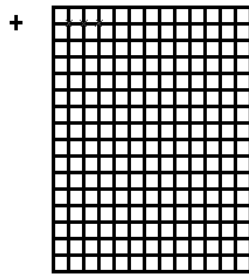


Figura 4: *Template* de um cruzamento e imagem de calibração, que é a janela de procura.

3.7.2. Localização dos centros das marcas fiduciais

Uma aplicação inicial da correlação é a localização das marcas fiduciais em uma imagem digital, quando da orientação interior. Nesse caso, a janela de procura e o recorte encontrar-se-iam na mesma imagem.

Segue-se a sugestão de implementação a ser utilizada: dado o número de marcas fiduciais na imagem e sua posição aproximada (ex.: quatro cantos ou metade dos lados), escolher áreas de procura em torno dessas regiões. O recorte pode vir de um banco de imagens de diferentes tipos de marca fiducial já existente ou ser criado quando da definição do centro da primeira marca – nesse caso, o usuário terá de fazer, ao menos para uma delas, a medição (colimação da marca de referência) precisa no centro. A figura 5 ilustra esse exemplo. Nesse contexto, a rotina genérica em pseudocódigo para a execução da correlação de imagens é apresentada em seguida:

- define-se um recorte (*template*) na imagem 1;
- as coordenadas do *pixel* central desse *template* são armazenadas;
- os valores dos números digitais dos *pixels* do recorte são ordenada-

- mente armazenados em um vetor X ;
- define-se uma janela de procura na imagem 2;
- define-se um *template* nos mesmos moldes que o primeiro dentro desta área de procura (de preferência no canto superior esquerdo), guardando as coordenadas centrais do *pixel* e armazenando os números digitais em um vetor Y ;
- realiza-se o cálculo do coeficiente de correlação entre X e Y ;
- anda-se com o *template* 2 um *pixel* para a direita ou para baixo se tiver chegado ao limite horizontal da área de procura;
- guardam-se novas coordenadas e o vetor Y ;
- realiza-se o cálculo do coeficiente de correlação entre X e Y ;
- o processo segue até que se chegue ao final da área de procura. A coordenada equivalente ao *template* 2 que obteve maior correlação com o primeiro é o ponto homólogo.

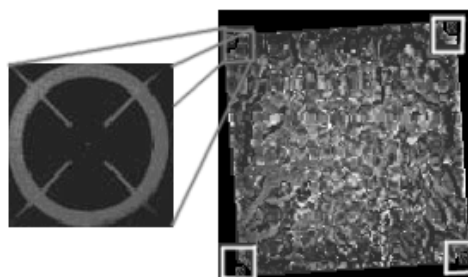


Figura 5: *Template* de uma marca fiducial (ampliado), que pode ser extraído de um banco de dados de diferentes marcas ou determinado na hora e no resultado finais, com os centros das marcas localizados sem a intervenção do usuário.

3.7.3. Localização dos pontos homólogos em diferentes imagens

Esta é a aplicação clássica da correlação. Tem como objetivo buscar numa imagem conjugada, adquirida de um diferente ponto de vista, a ocorrência de um ponto de interesse presente na imagem de referência. A realização automática dessa tarefa é crucial para a fotogrametria digital. Uma possível solução desse problema, com base no coeficiente de correlação cruzada, é apresentada graficamente na figura 6.

É utilizada em todas as fases do processo fotogramétrico em que é necessário realizar a medição de coordenadas de pontos, tanto no espaço-imagem quanto no espaço-objeto.

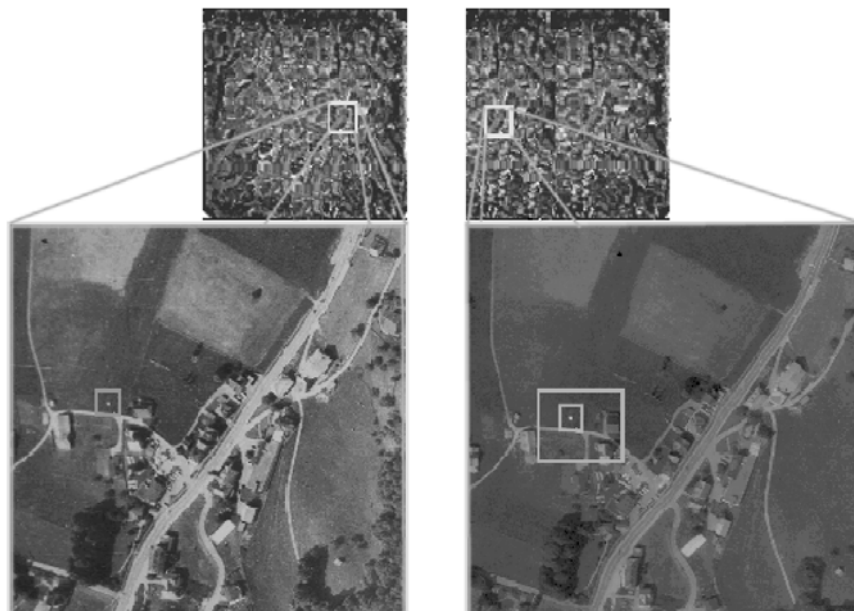


Figura 6: *Template* na imagem 1; janela de procura na imagem 2; e *template* de maior correlação, contendo em seu centro o ponto homólogo.

Selecionado o padrão na imagem de referência, o próximo passo é a determinação da janela de procura na imagem conjugada (da direita). Essa tarefa pode ser realizada através da interação homem-máquina, na qual o operador clica e arrasta o *mouse* – definindo a área de busca –, e o programa salva todos os valores dos números digitais como uma matriz maior. Uma alternativa automática é a estimação em função da percentagem de recobrimento; no contexto da fotogrametria, ela é chamada fotobase. Dessa forma, arbitra-se a área de procura com suficiente margem de tolerância.

A partir daí, dentro da área de procura, realiza-se a busca do ponto com maior valor para o coeficiente de correlação, provavelmente correspondente ao ponto homólogo.

3.8. Considerações finais

Ao fim de mais um capítulo, que por si só não esgota o assunto, pôde-se aprender que há diversos procedimentos matemáticos e estatísticos que, se aplicados às imagens fotogramétricas, permitem a obtenção de resultados de especial interesse. Conforme fica claro a partir da análise mais pormenorizada de aplicações da correlação estatística apresentada anteriormente,

tais procedimentos da área de processamento de imagens podem ser úteis também para o aumento do grau de automação de algumas etapas do processo fotogramétrico.

Na seqüência da presente obra, estas e outras ferramentas serão empregadas nos processos de orientação, que terão, ao fim, todas as imagens do mesmo vôo “orientadas” ao terreno, permitindo que sobre elas sejam executadas medições de coordenadas no espaço-objeto, ou seja, no sistema de terreno.



Capítulo 4

Orientação interior

4.1. Conceito

Por orientação interior, entende-se a *reconstrução do feixe perspectivo*, ou seja, o referenciamento da imagem em relação à câmara. Essa informação é demonstrada na figura abaixo. Uma vez que as imagens obtidas se encontram isoladas umas das outras e salvas meramente como arquivos digitais, *sem nenhuma informação métrica*, isto é, utilizando apenas o sistema de coordenadas em *pixels*, próprio das imagens digitais, faz-se necessário reconstituir o sistema interno câmara-imagem correspondente ao momento em que as fotografias foram obtidas. Somente assim poderão ser efetuadas medidas com precisão sobre as imagens fotográficas.

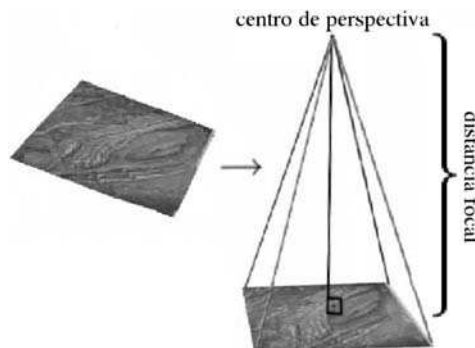


Figura 1: Conceito de orientação interior – reconstrução da geometria do feixe perspectivo, isto é, da posição do plano de imagem em relação ao eixo óptico da câmara fotográfica.

Felizmente, o sistema câmara-fotografia (figura 2) não é de difícil reconstrução geométrica. É composto basicamente de uma perpendicular ao centro da fotografia e mede um comprimento igual à distância focal calibrada.

Conceitualmente, a orientação interior consiste apenas em colocar as imagens, uma a uma, em posição semelhante à que exerciam dentro da câmara, no momento em que foram obtidas.

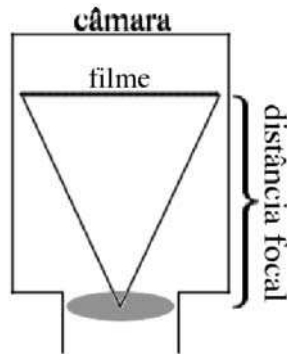


Figura 2: Representação da posição do filme na tomada da fotografia.

4.2. Procedimentos para a execução da orientação interior

As primeiras soluções para esse problema datam dos tempos da fotogrametria analógica. Nos restituidores analógicos, o diafilme é centrado em seu porta-placas, o operador faz as marcas fiduciais do filme coincidirem com pequenas marcas no porta-placas e o projetor é posicionado na distância focal calibrada.

Na fotogrametria analítica, uma alternativa inteiramente radical foi adotada: no lugar de materializar a orientação interior, basta calcular os parâmetros de transformação entre o sistema no qual a imagem foi colocada inicialmente e o sistema fotografia-câmara, que é, em última análise, o objetivo final da orientação interior.

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

Na fotogrametria digital, procedimento muito semelhante ocorre, apenas sem a presença dos servomecanismos. O sistema inicial, que variava de restituidor analítico para restituidor analítico, passa a ser o sistema de coordenadas de *pixel* (linha e coluna), comum a todas as imagens digitais e expresso por números inteiros. O próprio *software* de fotogrametria digital realiza as medições das coordenadas das marcas fiduciais no sistema de *pixel*, com ou sem intervenção do operador. A partir daí, o processo segue

de forma semelhante à fotogrametria analítica, com a entrada dos valores constantes do certificado de calibração e o ajustamento para a definição dos parâmetros de transformação entre um sistema e outro.

4.3. Por que a transformação entre *pixels* e milímetros é necessária?

Uma pergunta que pode surgir a partir de uma análise dos conceitos anteriormente descritos é a seguinte: por que não utilizar o sistema *pixel* diretamente relacionado ao sistema de terreno, sem a necessidade de outro sistema intermediário?

Uma boa razão para tal é o fato de haver uma uniformização das unidades utilizadas, visto que o sistema fotográfico é expresso em milímetros, que são unidades métricas. Em geral, o terreno também está expresso em unidades métricas (metros, por exemplo). Assim, a associação posterior entre esses sistemas tornar-se-á muito mais fácil.

A formulação existente na época do advento da fotogrametria digital também considerava um sistema métrico para a imagem, definido pelo certificado de calibração da câmara. Logo, é muito mais prático utilizar essa formulação já desenvolvida e devidamente estabelecida.

Além disso, a transformação entre *pixels* e milímetros serve para corrigir vários erros de aquisição das imagens, como a má colocação do diafilme no *scanner*, deformações no filme, efeitos atmosféricos não-modelados, distorção na digitalização via *scanner* ou aquisição da imagem digital via câmara, que causam deformações na imagem digitalizada (rotações, translações e fatores de escala).

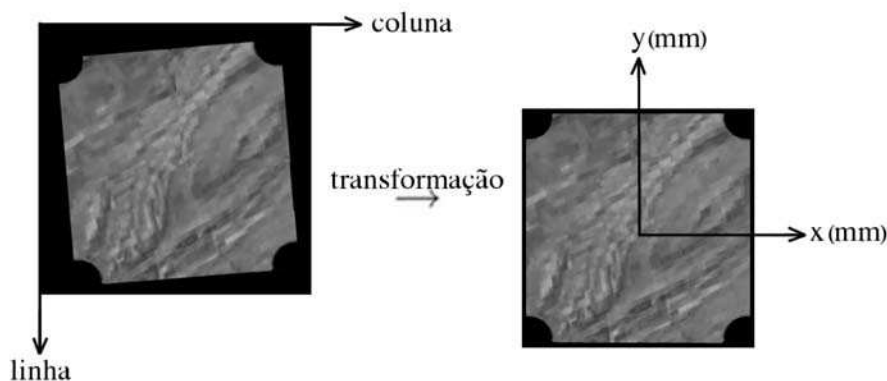


Figura 3: Sistemas de *pixel* e fotográfico (métrico). Notemos o mau posicionamento da imagem no primeiro sistema, em que observamos claramente as distorções existentes na imagem.

Outros erros – os erros sistemáticos causados pela refração atmosférica e pela curvatura da Terra, por exemplo – também poderão ser eliminados. Para isso, devem ser informados outros dados complementares constantes do certificado de calibração, como as coordenadas do ponto de menor distorção e os parâmetros de aberração das lentes.

No final do processo (figura 3), obtemos não apenas uma simples transformação entre sistemas de imagem analógica e digital mas um modo de – dado qualquer ponto na imagem digital – imediatamente ter suas coordenadas no sistema métrico de câmara, que é rígido e preciso, pois se baseia em parâmetros de calibração da mesma.

4.4. Modelos matemáticos para a orientação interior

4.4.1. Transformação afim geral

A transformação afim modela seis parâmetros, que consideram que o sistema inicial – o sistema de imagem digital – pode apresentar as seguintes características:

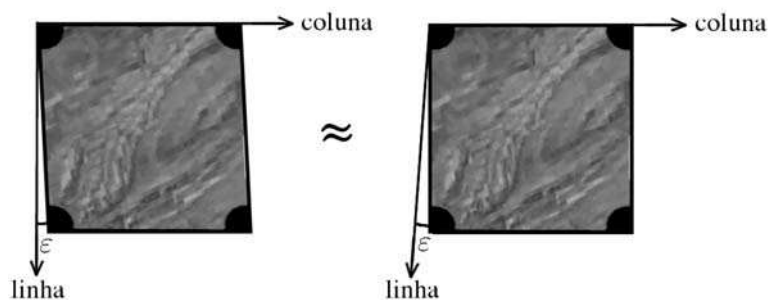


Figura 4: Não-ortogonalidade dos eixos de uma imagem digital.

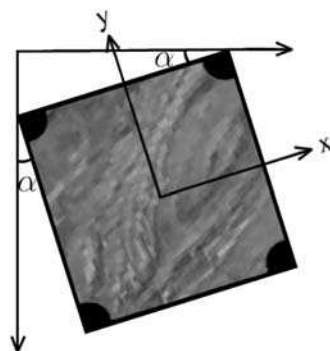


Figura 5: Rotação da imagem digital.

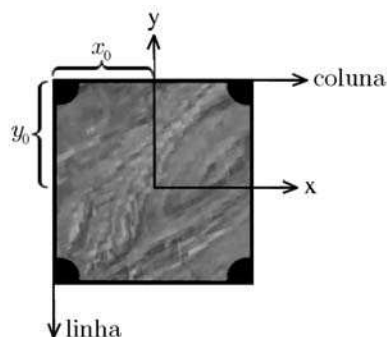


Figura 6: Translação da imagem digital.

- *não-ortogonalidade dos eixos* (figura 4): como o sistema de imagem digital possui seguramente eixos ortogonais, essa consideração servirá para corrigir distorções na própria imagem, decorridas, por exemplo, de má calibração do *scanner*. Embora o sistema de coordenadas de uma imagem digital sempre seja ortogonal, é possível mapear distorções sistemáticas do *scanner* ou câmara como se a imagem estivesse ortogonal e os eixos, distorcidos. A figura 4 tenta explicar essa situação;
- *rotação da imagem* (figura 5): uma má colocação da imagem fotográfica analógica no *scanner* ou mesmo erros sistemáticos na aquisição através de uma câmara digital podem fazer com que a imagem digital esteja rotacionada, tornando o sistema *pixel* rotacionado de mesmo ângulo do sistema fotográfico;
- *translação em x e y* (figura 6): isso é causado em virtude da não-coincidência dos centros dos dois sistemas. Como a imagem digital tem o centro de seu sistema de coordenadas iniciando próximo ao canto superior esquerdo e o sistema fotográfico utiliza o centro da fotografia para origem, sempre haverá uma translação de aproximadamente $\frac{\text{lado da foto}}{2}$ em *x* e $\frac{\text{lado da foto}}{2}$ em *y*. O “aproximadamente” refere-se à possibilidade de, após inúmeras utilizações e calibrações, o centro da foto não coincidir com a média dos lados. Além disso, o sistema de imagem pode não ter sua origem exatamente no canto superior esquerdo da foto. Essa situação é muito comum, pois sempre há algumas “sobras” de *pixels* em branco no início e no fim dos arquivos digitais; estas são deixadas por precaução, a fim de não haver cortes no processo de digitalização da imagem;
- *escalas diferentes em x e y*: os sistemas de imagem digital e analógica têm unidades diferentes. Para uma digitalização a 600 *dpi*, o arquivo

digital terá cerca de 5.500 *pixels* por 5.500 *pixels*, ao passo que o outro sistema compõe uma imagem de cerca de 230 mm por 230 mm. Como se deseja realizar a transformação do sistema *pixel* para o sistema fotográfico, o fator de escala a ser adotado é em módulo, aproximadamente, calculado pela equação 4.1:

$$\frac{\text{lado da foto em milímetros}}{\text{lado da foto em pixels}} mm/px \quad (4.1).$$

Atenção redobrada deve ser tomada devido à inversão do sentido da coordenada “linha” em relação às coordenadas *y*. Assim, pode-se assegurar que:

$$C_x = \frac{\text{lado da foto em milímetros}}{\text{lado da foto em pixels}} mm/px \quad (4.2);$$

$$C_y = -\frac{\text{lado da foto em milímetros}}{\text{lado da foto em pixels}} mm/px \quad (4.3).$$

Com todos os parâmetros descritos, pode-se seguir com a formulação genérica, que considera a existência simultânea dos seis parâmetros (figura 7):

$$x = C_x \cos \alpha \cdot \text{coluna} + C_y \sin \alpha \cdot \text{linha} + X_0 \quad (4.4);$$

$$y = -C_x \sin(\alpha + \varepsilon) \cdot \text{coluna} + C_y \cos(\alpha + \varepsilon) \cdot \text{linha} + Y_0 \quad (4.5).$$

Tais expressões podem ser descritas de forma linear como:

$$x = a_0 + a_1 \cdot \text{coluna} + a_2 \cdot \text{linha} \quad (4.6);$$

$$y = b_0 + b_1 \cdot \text{coluna} + b_2 \cdot \text{linha} \quad (4.7).$$

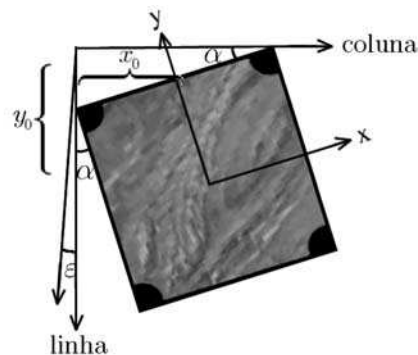


Figura 7: Transformação afim (caso geral).

Para deduzir esses valores, deve-se utilizar um ajustamento de observações. O modelo paramétrico é o mais adequado, uma vez que ajusta simultaneamente as observações e os parâmetros (incógnitas).

No caso linear (equações 4.6 e 4.7), as incógnitas são os valores de a_0 , a_1 , a_2 , b_0 , b_1 e b_2 – parâmetros de transformação entre os dois sistemas. Os valores de x e y das marcas fiduciais advêm do certificado de calibração. Seus equivalentes “linha” e “coluna” são localizados automaticamente por aplicativos para fotogrametria digital. Alguns *softwares* possuem um banco de dados com imagens de diferentes tipos de marcas fiduciais e procuram a marca que mais se assemelha na imagem – ou são selecionados na tela pelo usuário, clicando-se sobre o centro das marcas na imagem exibida (maiores informações sobre o método de correlação de imagens, no capítulo 3).

Como as incógnitas são em número de seis, há a necessidade de ao menos seis observações para uma solução. Felizmente, há quatro marcas fiduciais (figura 8), na pior das hipóteses (algumas câmaras têm oito ou até mais), que fornecem oito coordenadas ($x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4$ e $linha_1, coluna_1, linha_2, coluna_2, linha_3, coluna_3, linha_4, coluna_4$), duas a mais que o mínimo necessário para a resolução de um sistema de equações lineares.

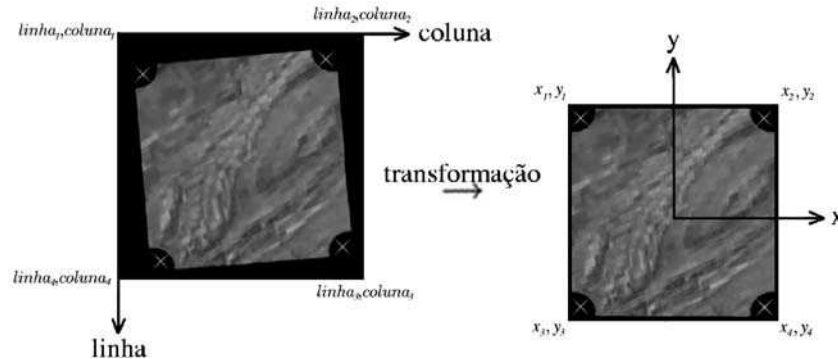


Figura 8: Marcas fiduciais nos dois sistemas.

Rearranjando as equações 4.6 e 4.7 em forma matricial e isolando o vetor que contém as incógnitas, chega-se à equação 4.8:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & coluna & linha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & coluna & linha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (4.8).$$

Para quatro marcas fiduciais, o sistema ficará igual a:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ x_3 \\ y_3 \\ x_4 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \text{coluna}_1 & \text{linha}_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \text{coluna}_1 & \text{linha}_1 \\ 1 & \text{coluna}_2 & \text{linha}_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \text{coluna}_2 & \text{linha}_2 \\ 1 & \text{coluna}_3 & \text{linha}_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \text{coluna}_3 & \text{linha}_3 \\ 1 & \text{coluna}_4 & \text{linha}_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \text{coluna}_4 & \text{linha}_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (4.9).$$

4.4.1.1. Modelo matemático

A formulação para o método paramétrico pode ser encontrada em Gemael (1994). A seguir, transcrevemos as fórmulas mais comuns empregadas no ajustamento, através das equações:

$$X_a = (A^T P A)^{-1} \cdot (A^T P L_b) \quad (4.10);$$

$$V = A X_a - L_b \quad (4.11);$$

$$L_a = L_b + V \quad (4.12);$$

onde:

X_a é o vetor dos parâmetros \hat{a}_0 , \hat{a}_1 , \hat{a}_2 , \hat{b}_0 , \hat{b}_1 e \hat{b}_2 ajustados (é o que se deseja conhecer):

$$X_a = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}_{\text{ajustados.}}$$

A é a matriz dos coeficientes dos parâmetros, que contém, entre outros, os valores das coordenadas *pixel* das marcas fiduciais:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \text{coluna}_1 & \text{linha}_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \text{coluna}_1 & \text{linha}_1 \\ 1 & \text{coluna}_2 & \text{linha}_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \text{coluna}_2 & \text{linha}_2 \\ 1 & \text{coluna}_3 & \text{linha}_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \text{coluna}_3 & \text{linha}_3 \\ 1 & \text{coluna}_4 & \text{linha}_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \text{coluna}_4 & \text{linha}_4 \end{bmatrix}.$$

L_b é o vetor das observações, que são os valores das coordenadas em milímetros das marcas fiduciais constantes do certificado de calibração da câmara:

$$L_b = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ x_3 \\ y_3 \\ x_4 \\ y_4 \end{bmatrix}.$$

P é a matriz-peso das observações. É igual à matriz-identidade se, e somente se, todas as marcas fiduciais tiverem desvio-padrão idêntico. Esses valores podem ser facilmente obtidos no certificado de calibração da câmara;

σ_0^2 é a variância de referência;

$\sum X_{L_b}$ é a matriz variância-covariância das observações:

$$P = \sigma_0^2 \left(\sum X_{L_b} \right)^{-1};$$

L_a é o vetor das observações ajustadas:

$$L_a = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ x_3 \\ y_3 \\ x_4 \\ y_4 \end{bmatrix}_{\text{ajustadas}};$$

V é o vetor dos resíduos.

Um ponto a ser esclarecido, que, potencialmente, pode causar alguma confusão, é a questão sobre as observações do modelo paramétrico. Consideremos a transformação em tela (de *pixels* para milímetros). A questão a ser levantada é: quais são as observações do modelo paramétrico? Seriam as coordenadas medidas na imagem digital (*pixels*) ou provenientes do certificado de calibração da câmara (em milímetros)?

A resposta é um tanto paradoxal. Na realidade, as observações são as coordenadas das marcas fiduciais: provenientes do certificado de calibração da câmara. Os valores das marcas fiduciais medidos na imagem digital (*pixels*) serão considerados *fixos* ou *isentos de erro*. O que irá variar, em verdade, são os valores dos coeficientes da transformação afim (as incógnitas do sistema; vetor X_a) e os valores apresentados para as coordenadas das marcas fiduciais (vetor L_a).

O paradoxo se dá pelo fato de se considerar fixo *exatamente o que foi medido* – ou seja, as coordenadas em *pixels* das marcas fiduciais – e como observações, os valores das coordenadas dessas respectivas marcas fiduciais (em milímetros), provenientes de um processo de calibração de câmara. Isso talvez explique o fato de alguns autores se referirem ao processo de ajustamento pelo método paramétrico como método de *inversão* ou das *equações de observação*.

Como uma observação final (caso se deseje a transformação do espaço-imagem analógico para o espaço-imagem digital), proceder-se-á de maneira semelhante, apenas invertendo-se os valores fixos (nesse caso, as coordenadas fiduciais em milímetros).

Também é interessante obter as matrizes variância-covariância para X_a , L_a e V . As diagonais principais dessas matrizes darão os valores das variâncias para o respectivo parâmetro estimado. Por exemplo, para X_a [3], ou seja, o terceiro elemento do vetor de X_a , que é o valor ajustado de a_2 , a variância será o elemento [3, 3] da matriz variância-covariância de X_a .

As fórmulas para essas matrizes são expressas pelas seguintes equações:

$$\sum X_a = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A)^{-1} \quad (4.13);$$

$$\sum L_a = \hat{\sigma}_0^2 A (A^T P A)^{-1} A^T \quad (4.14);$$

$$\sum V = \hat{\sigma}_0^2 \left[A (A^T P A)^{-1} A^T - P^{-1} \right] \quad (4.15);$$

onde:

$\hat{\sigma}_0^2 = \left(\frac{V^T P V}{n-m} \right)$ é a variância da unidade de peso *a posteriori* (calculada após o ajustamento);

n é o número de observações;

m é o número de incógnitas.

4.4.2. Transformação ortogonal

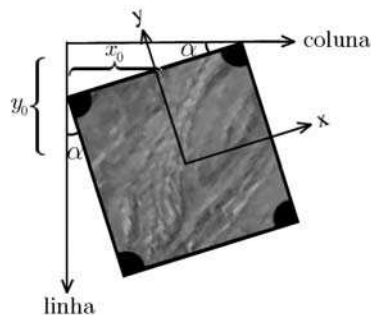


Figura 9: Transformação ortogonal (caso geral).

Também chamada de afim ortogonal, essa transformação é uma variante da afim para o caso em que ambos os sistemas são ortogonais ($\varepsilon = 0$). A formulação para esse caso (figura 9) recai em 4.4 e 4.5, com $\varepsilon = 0$:

$$x = C_x \cos \alpha \cdot \text{coluna} + C_y \sin \alpha \cdot \text{linha} + X_0 \quad (4.16);$$

$$y = -C_x \sin \alpha \cdot \text{coluna} + C_y \cos \alpha \cdot \text{linha} + Y_0 \quad (4.17).$$

Nesse caso, faz-se necessário um ajustamento pelo modelo paramétrico não-linear, que exige valores aproximados de partida para os parâmetros, como já discutido:

C_x varia em torno de $\frac{\text{lado da foto em milímetros}}{\text{lado da foto em pixels}} \text{ mm/px}$;

C_y em torno de $-\frac{\text{lado da foto em milímetros}}{\text{lado da foto em pixels}} \text{ mm/px}$;

α inicialmente pode ser arbitrado igual a zero;

$X_0 = -\frac{\text{lado da foto}}{2}$ (em mm);

$Y_0 = \frac{\text{lado da foto}}{2}$ (em mm).

Esses valores são colocados numa matriz de parâmetros iniciais X_0 . A matriz A receberá as derivadas parciais de 4.16 em relação a todos os parâmetros e as de 4.17 na linha subsequente dessa matriz. Serão repetidos tais valores quantas vezes forem necessárias para o número de observações (no caso de quatro marcas, A terá 8 linhas), como o exemplo abaixo:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial C_x} & \frac{\partial x_1}{\partial C_y} & \frac{\partial x_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial x_1}{\partial X_0} & \frac{\partial x_1}{\partial Y_0} \\ \frac{\partial y_1}{\partial C_x} & \frac{\partial y_1}{\partial C_y} & \frac{\partial y_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial y_1}{\partial X_0} & \frac{\partial y_1}{\partial Y_0} \\ \frac{\partial x_2}{\partial C_x} & \frac{\partial x_2}{\partial C_y} & \frac{\partial x_2}{\partial \alpha} & \frac{\partial x_2}{\partial X_0} & \frac{\partial x_2}{\partial Y_0} \\ \frac{\partial y_2}{\partial C_x} & \frac{\partial y_2}{\partial C_y} & \frac{\partial y_2}{\partial \alpha} & \frac{\partial y_2}{\partial X_0} & \frac{\partial y_2}{\partial Y_0} \\ \frac{\partial x_3}{\partial C_x} & \frac{\partial x_3}{\partial C_y} & \frac{\partial x_3}{\partial \alpha} & \frac{\partial x_3}{\partial X_0} & \frac{\partial x_3}{\partial Y_0} \\ \frac{\partial y_3}{\partial C_x} & \frac{\partial y_3}{\partial C_y} & \frac{\partial y_3}{\partial \alpha} & \frac{\partial y_3}{\partial X_0} & \frac{\partial y_3}{\partial Y_0} \\ \frac{\partial x_4}{\partial C_x} & \frac{\partial x_4}{\partial C_y} & \frac{\partial x_4}{\partial \alpha} & \frac{\partial x_4}{\partial X_0} & \frac{\partial x_4}{\partial Y_0} \\ \frac{\partial y_4}{\partial C_x} & \frac{\partial y_4}{\partial C_y} & \frac{\partial y_4}{\partial \alpha} & \frac{\partial y_4}{\partial X_0} & \frac{\partial y_4}{\partial Y_0} \end{bmatrix};$$

$$L_0 = A.X_0 \quad (4.18);$$

$$X_a = X_0 - (A^T P A)^{-1} \cdot [A^T P (L_0 - L_b)] \quad (4.19).$$

As demais matrizes seguem as fórmulas para o caso linear já descrito em 4.4.1; p. 94.

4.4.3. Transformação isogonal

A transformação isogonal também é denominada afim isogonal, de Helmert, de similaridade, conforme ou euclidiana. Trata-se de uma variação do caso ortogonal, considerando que o fator de escala é constante, ou seja, $C_x = C_y$. A formulação torna-se então:

$$x = C \cos \alpha . \text{coluna} + C \sin \alpha . \text{linha} + X_0 \quad (4.20);$$

$$y = -C \sin \alpha . \text{coluna} + C \cos \alpha . \text{linha} + Y_0 \quad (4.21).$$

Essa transformação permite linearização, reduzindo-se à forma:

$$x = a . \text{coluna} + b . \text{linha} + c \quad (4.22);$$

$$y = -b . \text{coluna} + a . \text{linha} + d \quad (4.23).$$

Na forma matricial, tal arranjo ficaria deste modo:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} coluna & linha & 1 & 0 \\ linha & -coluna & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (4.24).$$

Todavia, os valores de 4.22, 4.23 e 4.24, mesmo corretos matematicamente, não funcionarão com o caso da transformação entre coordenadas *pixel* e milímetros. Isso se explica pelo fato de o eixo *y* do sistema analógico estar invertido em relação ao homólogo no sistema digital (*pixels*), o que implica que os valores de C_x estejam positivos e os de C_y , embora muito próximos ou até mesmo iguais em módulo, negativos.

Soluciona-se o problema com um rebatimento do eixo *y*. As novas fórmulas serão as seguintes:

$$x = a.coluna + b.linha + c \quad (4.25);$$

$$y = b.coluna - a.linha + d \quad (4.26);$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} coluna & linha & 1 & 0 \\ -linha & coluna & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (4.27).$$

Então, os quatro parâmetros são calculados por um ajustamento linear, conforme já explicado anteriormente, sendo o valor da matriz *A* igual a:

$$\begin{bmatrix} coluna_1 & linha_1 & 1 & 0 \\ -linha_1 & coluna_1 & 0 & 1 \\ coluna_2 & linha_2 & 1 & 0 \\ -linha_2 & coluna_2 & 0 & 1 \\ coluna_3 & linha_3 & 1 & 0 \\ -linha_3 & coluna_3 & 0 & 1 \\ coluna_4 & linha_4 & 1 & 0 \\ -linha_4 & coluna_4 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

O restante do procedimento será análogo ao tópico 4.4.1.1; p. 98.

4.4.4. Qualidade do ajustamento

Para que os parâmetros de transformação venham a ser devidamente empregados futuramente, algumas medidas de qualidade devem ser adotadas.

Um primeiro teste é a utilização dos parâmetros em uma transformação a partir das coordenadas *pixel* das marcas fiduciais. Como o ajustamento foi executado levando-se em conta os valores dessas marcas, as diferenças entre as coordenadas obtidas com os parâmetros de transformação e as coordenadas do certificado de calibração devem ser pequenas.

Outro teste se dá verificando-se o desvio-padrão dos resíduos. Como as variâncias dos resíduos estão contidas na diagonal principal da matriz, extraindo-se a raiz de tais valores, acham-se os respectivos desvios-padrão. Estes deverão encontrar-se em unidade métrica (mm). Valores empíricos entre 0,3 e 0,4 *pixel* para esses desvios-padrão indicam um bom ajustamento. Como convertê-los? Sabendo-se a resolução de digitalização em *dpi*. Por exemplo, para 600 *dpi*:

$$600 \text{ dpi} = 600 \text{ px/pol} = 600 \text{ px}/25,4 \text{ mm} = 23,62 \text{ px/mm}$$

Ou seja, em 1 mm há 23,62 *px* (*pixels*). Para um desvio-padrão de um dos resíduos igual a 0,19 mm, por exemplo:

$$\begin{array}{rcl} 0,019 \text{ mm} & - & x \text{ px} \\ 1 \text{ mm} & - & 23,62 \text{ px} \end{array}$$

Nesse caso, o desvio-padrão é igual a $x = 0,4488 \text{ px}$. Está um pouco acima dos padrões desejáveis.

A maioria das soluções computacionais adota esses padrões, dando ao usuário a possibilidade de continuar o processo ou reprová-lo, realizando um novo ajustamento.

Segundo Andrade (1998), para as imagens dotadas das comuns quatro marcas fiduciais, a transformação afim geral é a que apresenta os resultados mais satisfatórios, devendo ser usada na maioria dos casos.

4.4.5. Correções adicionais

Devemos lembrar que os valores a serem encontrados em coordenadas de câmara para determinado ponto equivalem às coordenadas *x* e *y* das equações 2.13 a 2.20, ou seja, ainda estão envolvidos dos erros concernentes

às distorções radial e descentrada. Para que sejam obtidos os valores mais corretos, empregam-se os modelos já explicitados no tópico 2.3.1; p. 61.

Há ainda correções quanto à refração atmosférica e à curvatura das imagens (caso o vôo seja de escalas muito pequenas; em escala menor ou igual a 1:60.000, por exemplo), que são parametrizadas por inúmeros modelos.

Na maior parte dos casos, nenhuma das correções aqui citadas é realizada; porém, tendo em mãos seus coeficientes, sempre é útil reforçar os dados, assegurando uma maior precisão dos valores finais.

4.5. Considerações finais

Neste ponto, o leitor já deve estar a par do processo de orientação interior, especialmente em determinados aspectos:

- a orientação interior serve para associar um sistema de coordenadas à imagem que antes se encontrava livre no espaço;
- associando-se um sistema fotográfico, rígido, definido em laboratório, através da calibração da câmara, o feixe perspectivo é recomposto matematicamente;
- em fotogrametria digital, a orientação interior constitui-se no cálculo dos parâmetros de transformação entre o sistema de coordenadas de imagem digital (linha e coluna do *pixel*) e o sistema fotográfico;
- uma transformação *pixels*-milímetros é necessária por vários motivos, a saber: aproveitamento da formulação já existente, correção de várias deformações na imagem e uniformização das unidades dos sistemas;
- há três modelos fundamentais de transformação utilizados: afim, ortogonal e isogonal, sendo os dois últimos particularizações do primeiro;
- do ajustamento por mínimos quadrados e do modelo paramétrico provêm os parâmetros de transformação necessários;
- no mínimo três pontos de coordenadas conhecidas em ambos os sistemas devem ser utilizados como dado de entrada. Em geral, utilizam-se as marcas fiduciais, cujas coordenadas em sistema fotográfico se encontram no certificado de calibração e cujas coordenadas no sistema de imagem digital são determinadas durante a execução do programa, com a intervenção do usuário (que clicaria sobre elas) ou automaticamente (caso o programa de cálculo da orientação interior possua um banco de imagens de marcas fiduciais, que são

comparadas com a imagem inteira para a localização de outras semelhantes);

- parâmetros estatísticos são utilizados para que os resultados obtidos sejam avaliados.

Com a orientação interior devidamente estabelecida, pode-se seguir com a descrição dos processos fotogramétricos, que, por sua vez, relacionarão as imagens previamente referenciadas às de um sistema métrico. Assim, possibilitar-se-á a reconstrução tridimensional do espaço-objeto. Trata-se dos processos denominados orientação exterior, fototriangulação e interseção espacial, a serem examinados nos próximos capítulos.

Capítulo 5

Orientação exterior

5.1. Conceito inicial

O objetivo primordial da orientação exterior (ou externa) é a obtenção da posição e da atitude do sensor ao coletar cada imagem fotográfica em relação ao referencial do espaço-objeto. Essa situação é mostrada na figura abaixo:

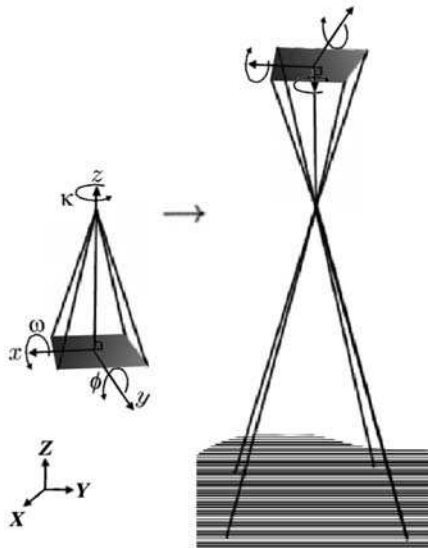


Figura 1: Objetivo da orientação exterior.

Pode-se dizer, então, que uma imagem está orientada exteriormente se são conhecidos seus seis parâmetros de orientação exterior: as coordenadas no espaço-objeto para o centro de perspectiva e os ângulos de rotação ou de atitude do sensor (ϕ , ω e κ).

Esse método difere dos adotados nas fotogrametrias analógica e analítica, que o dividem em dois processos: orientação relativa e orientação absoluta. A relativa serve para referenciar cada feixe em relação ao seu

homólogo, reconstruindo a posição exata de um par estereoscópico no espaço durante a tomada das imagens fotográficas. A absoluta, por sua vez, referencia o par de feixes em relação ao terreno, colocando o modelo estereoscópico em escala e nivelando-o.

Com a orientação exterior, não há a necessidade de se realizarem duas etapas diferentes. Sabendo-se os seis parâmetros já enumerados, para cada uma das imagens de um vôo, pode-se reconstruí-lo totalmente.

Obviamente, algumas restrições se aplicam. Dentre essas, destacam-se:

- a suposição de continuidade do espaço-objeto (prédios e construções em geral podem ser vistos como discontinuidades);
- o fato de o problema em questão pertencer à classe dos problemas “malcondicionados”, isto é, uma pequena variação no cálculo de parâmetros pode implicar soluções totalmente diferentes e inconsistentes.

5.2. Os parâmetros da orientação exterior

Como já citado no tópico anterior, há seis parâmetros que localizam a imagem no espaço. Segue uma explicação mais detalhada de cada um deles.

X_0 , Y_0 e Z_0 representam a posição do centro de perspectiva nos eixos X , Y e Z (respectivamente) do sistema de coordenadas do espaço-objeto.

Os ângulos de Euler (ϕ , ω e κ), por seu turno, significam rotações sofridas pelo sistema local de coordenadas x , y e z (de cada câmara) em relação ao referencial do terreno (X , Y e Z). Rotacionando-se x , y e z de $-\phi$, $-\omega$ e $-\kappa$, pode-se torná-lo paralelo a X , Y e Z .

Já ω representa a rotação do eixo x em relação a X , enquanto ϕ representa a rotação do eixo y em relação a Y . Esses ângulos devem ser pequenos, não devendo ultrapassar 5° em valor absoluto, no caso de fotografias perfeitamente verticais. Por fim, κ representa a rotação do eixo z em relação a Z .

Observe que os três ângulos são contados pontualmente no sentido anti-horário (sistema de mão direita). Os parâmetros de atitude do sensor estão esquematizados na figura 2, a seguir.

A matriz de rotação equivalente a cada ângulo expressa a transformação necessária para rotacionar um sistema em relação a outro de tal ângulo. Multiplicando-se todas, pode-se obter a matriz de rotação R , que equivale aos três movimentos simultaneamente.

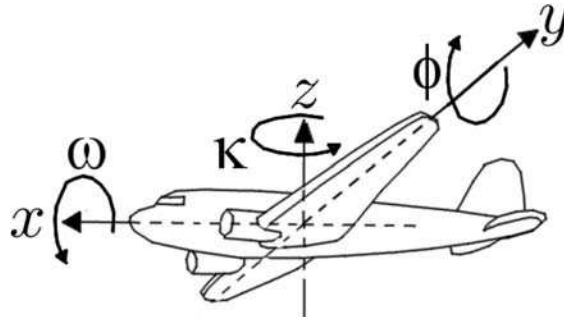


Figura 2: Parâmetros de atitude de um sensor fotogramétrico colocado em plataforma aérea.

$$R_{\phi} = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & -\text{sen}\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (5.1);$$

$$R_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & \text{sen}\omega \\ 0 & -\text{sen}\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \quad (5.2);$$

$$R_{\kappa} = \begin{bmatrix} \cos\kappa & \text{sen}\kappa & 0 \\ -\text{sen}\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3).$$

Assim, $R_{\omega} \cdot R_{\phi} \cdot R_{\kappa} = R$ é igual a:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\phi\cos\kappa & -\cos\phi\text{sen}\kappa & \text{sen}\phi \\ \cos\omega\text{sen}\kappa + \text{sen}\omega\text{sen}\phi\cos\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \text{sen}\omega\text{sen}\phi\text{sen}\kappa & -\text{sen}\omega\cos\phi \\ \text{sen}\omega\text{sen}\kappa - \cos\omega\text{sen}\phi\cos\kappa & \text{sen}\omega\cos\kappa + \cos\omega\text{sen}\phi\text{sen}\kappa & \cos\omega\cos\phi \end{bmatrix} \quad (5.4).$$

Para simplificar, pode-se dizer que:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}.$$

R rotaciona um terno de coordenadas do espaço-imagem para o espaço-objeto. Já M , que é igual a R^{-1} ou R^T , rotaciona um terno de coordenadas do espaço-objeto para o espaço-imagem. Note que a igualdade

$R^{-1} = R^T$ é válida se, e somente se, a matriz R for ortogonal, o que é o caso. R é o produto de três matrizes ortogonais (R_ϕ , R_ω e R_κ). Logo, R é ortogonal e, portanto, vale tal igualdade.

5.3. As equações de colinearidade

As duas equações de colinearidade podem ser consideradas a base da fotogrametria digital, uma vez que relacionam os parâmetros da orientação exterior, as coordenadas fotográficas de um ponto e as coordenadas tridimensionais do mesmo ponto no sistema referencial do terreno ou do espaço-objeto.

A demonstração dessa formulação decorre da *condição de colinearidade*, que pode ser enunciada da seguinte forma: *no momento da tomada da fotografia, o ponto-objeto P , o centro de projeção O e o ponto-imagem p formam uma linha reta.*

A figura 3 oferece uma descrição gráfica dessa condição. Nela, podemos ver um ponto-objeto (P), marcado com uma cruz, e a linha reta que o une ao seu respectivo ponto-imagem (p), também marcado com uma cruz, sobre a foto. Na linha reta que une os dois, encontra-se o centro de perspectiva (CP):

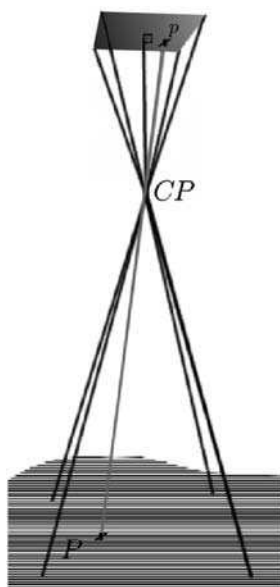


Figura 3: Condição de colinearidade.

Outros dois sistemas são o de coordenadas do objeto (X, Y e Z) e o de coordenadas do objeto paralelo ao sistema-imagem (X', Y' e Z'), que nada mais é do que o primeiro rotacionado dos ângulos de atitude da câmara, de modo que seja paralelo ao sistema de coordenadas do referencial da imagem fotográfica (espaço-imagem). Os pontos auxiliares A, B, D e P estão posicionados nesse sistema. O centro perspectivo, ou O , terá as coordenadas X'_0, Y'_0 e Z'_0 , ao passo que P terá como coordenadas X', Y' e Z' . Com esses conceitos, podem ser enunciadas duas relações de razão e proporção, sendo a primeira:

$$Oab \propto OAB$$

$$\frac{\xi - \xi_0}{c} = \frac{X' - X'_0}{Z'_0 - Z'} \quad (5.5).$$

As relações de proporcionalidade podem ser facilmente visualizadas abaixo:

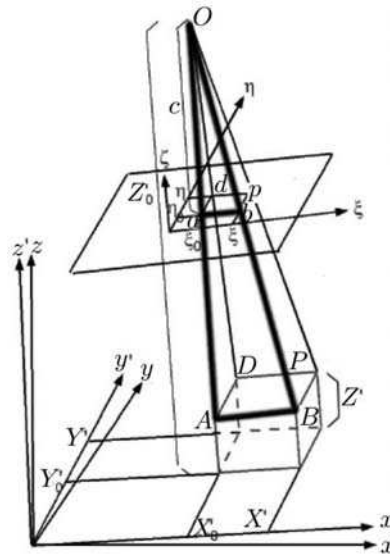


Figura 5: Primeira relação de proporcionalidade.

$$Oab \propto OAB$$

A outra proporção, que pode ser igualmente observada, é:

$$Oad \propto OAD$$

$$\frac{\eta - \eta_0}{c} = \frac{Y' - Y'_0}{Z'_0 - Z'} \quad (5.6).$$

Ela se encontra representada na figura a seguir:

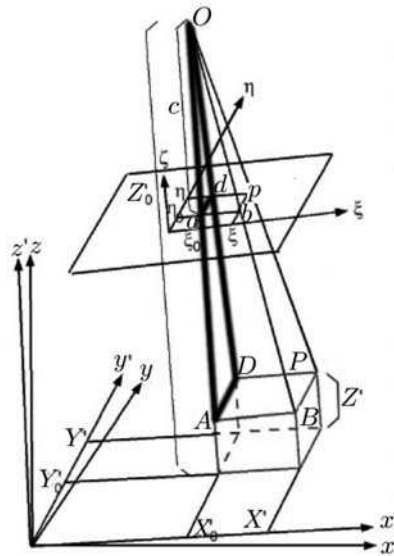


Figura 6: Segunda relação de proporcionalidade.

$$Oad \propto OAD$$

Rearranjando as equações 5.5 e 5.6, chega-se a:

$$\xi - \xi_0 = c \frac{X' - X'_0}{Z'_0 - Z'} \quad (5.7);$$

$$\eta - \eta_0 = c \frac{Y' - Y'_0}{Z'_0 - Z'} \quad (5.8).$$

Os sistemas $X'Y'Z'$ e XYZ se relacionam da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X' - X'_0 \\ Y' - Y'_0 \\ Z' - Z'_0 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \begin{bmatrix} X' - X'_0 \\ Y' - Y'_0 \\ Z' - Z'_0 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (5.9),$$

onde:

$$R^{-1} = R^T;$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}.$$

Utilizando as relações acima e lembrando que $(Z'_0 - Z') = -(Z' - Z'_0)$,

$$\xi = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (5.10);$$

$$\eta = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (5.11).$$

As equações 5.10 e 5.11 são as chamadas equações de colinearidade. A partir delas, pode-se realizar uma série de cálculos, que serão descritos nos próximos tópicos.

5.4. A ressecção espacial

Por intermédio das equações de colinearidade, podemos determinar os seis elementos de orientação exterior de uma fotografia (X_0 , Y_0 , Z_0 , ϕ , ω e κ) a partir de, no mínimo, três pontos de controle não-colineares.

Como os pontos de controle foram identificados na imagem, são conhecidas suas coordenadas no espaço-imagem digital (*pixel*). A partir dos parâmetros da orientação interior, chega-se às suas coordenadas no sistema-imagem analógico (fotográfico) ξ_1 e η_1 , ξ_2 e η_2 , ξ_3 e η_3 , e assim por diante. Como dados, também encontram-se disponíveis suas coordenadas tridimensionais (pois se trata de pontos de controle ou de campo) X_1 , Y_1 e Z_1 ; X_2 , Y_2 e Z_2 ; X_3 , Y_3 e Z_3 ; e assim por diante.

A distância focal já é conhecida, visto que se acha no certificado de calibração da câmara. As coordenadas do ponto principal ξ_0 e η_0 (no espaço-imagem) também estão no mesmo documento; porém, caso não estejam descritas, podem ser adotados os valores das médias das coordenadas em ξ e η das marcas fiduciais.

Com todos esses valores conhecidos, resta apenas determinar as incógnitas. Um exemplo literal vem a seguir, considerando-se quatro pontos de controle.

Dados:

- distância principal (ou focal, ou focal calibrada): c ;
- coordenadas do ponto principal: ξ_0 e η_0 ;
- coordenadas de quatro pontos de controle no espaço-imagem: ξ_1 e η_1 ; ξ_2 e η_2 ; ξ_3 e η_3 ; ξ_4 e η_4 ;
- coordenadas de quatro pontos de controle no espaço-objeto: X_1, Y_1 e Z_1 ; X_2, Y_2 e Z_2 ; X_3, Y_3 e Z_3 ; X_4, Y_4 e Z_4 .

Fórmulas:

$$\xi_1 = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X_1 - X_0) + r_{21}(Y_1 - Y_0) + r_{31}(Z_1 - Z_0)}{r_{13}(X_1 - X_0) + r_{23}(Y_1 - Y_0) + r_{33}(Z_1 - Z_0)};$$

$$\eta_1 = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X_1 - X_0) + r_{22}(Y_1 - Y_0) + r_{32}(Z_1 - Z_0)}{r_{13}(X_1 - X_0) + r_{23}(Y_1 - Y_0) + r_{33}(Z_1 - Z_0)};$$

$$\xi_2 = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X_2 - X_0) + r_{21}(Y_2 - Y_0) + r_{31}(Z_2 - Z_0)}{r_{13}(X_2 - X_0) + r_{23}(Y_2 - Y_0) + r_{33}(Z_2 - Z_0)};$$

$$\eta_2 = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X_2 - X_0) + r_{22}(Y_2 - Y_0) + r_{32}(Z_2 - Z_0)}{r_{13}(X_2 - X_0) + r_{23}(Y_2 - Y_0) + r_{33}(Z_2 - Z_0)};$$

$$\xi_3 = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X_3 - X_0) + r_{21}(Y_3 - Y_0) + r_{31}(Z_3 - Z_0)}{r_{13}(X_3 - X_0) + r_{23}(Y_3 - Y_0) + r_{33}(Z_3 - Z_0)};$$

$$\eta_3 = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X_3 - X_0) + r_{22}(Y_3 - Y_0) + r_{32}(Z_3 - Z_0)}{r_{13}(X_3 - X_0) + r_{23}(Y_3 - Y_0) + r_{33}(Z_3 - Z_0)};$$

$$\xi_4 = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X_4 - X_0) + r_{21}(Y_4 - Y_0) + r_{31}(Z_4 - Z_0)}{r_{13}(X_4 - X_0) + r_{23}(Y_4 - Y_0) + r_{33}(Z_4 - Z_0)};$$

$$\eta_4 = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X_4 - X_0) + r_{22}(Y_4 - Y_0) + r_{32}(Z_4 - Z_0)}{r_{13}(X_4 - X_0) + r_{23}(Y_4 - Y_0) + r_{33}(Z_4 - Z_0)}.$$

Verifica-se então que, para que seja realizado um ajustamento, são necessárias aproximações iniciais para as incógnitas, uma vez que o modelo matemático é não-linear.

Esses valores, chamados de X_{00} , Y_{00} , Z_{00} , ϕ_0 , ω_0 e κ_0 , podem ser estimados de diferentes formas, como enunciado por Kraus (1999): por intermédio do ajustamento por modelos independentes, da transformação linear direta (geometria projetiva) ou adotando-se os valores $\phi_0 = 0$, $\omega_0 = 0$ e κ_0 dados pela direção de vôo (ângulo, no sentido anti-horário, necessário para fazer coincidir a linha de vôo com o eixo X do sistema de coordenadas de terreno, conforme a figura 7).

Os valores X_{00} , Y_{00} e Z_{00} ainda podem ser obtidos de duas maneiras: uma é realizando a ressecção espacial considerando ϕ_0 , ω_0 e κ_0 valores para ϕ , ω e κ ; a outra é promovendo uma transformação afin, nos mesmos moldes da realizada para a orientação interior, mas desta vez relacionando coordenadas fotográficas com coordenadas planimétricas de terreno. Ao obter esses parâmetros de transformação, os mesmos são utilizados para calcular X_{00} e Y_{00} a partir de ξ_0 e η_0 . Z_{00} , para este caso, é a soma da altura de vôo e o plano médio do terreno, que são previstos desde o planejamento da cobertura fotogramétrica.

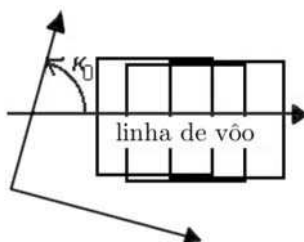


Figura 7: Linha de vôo.

Agora, pode-se realizar um ajustamento pelo modelo não-linear, que segue esta formulação:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi_1}{\partial X_0} & \frac{\partial \xi_1}{\partial Y_0} & \frac{\partial \xi_1}{\partial Z_0} & \frac{\partial \xi_1}{\partial \phi_0} & \frac{\partial \xi_1}{\partial \omega_0} & \frac{\partial \xi_1}{\partial \kappa_0} \\ \frac{\partial \eta_1}{\partial X_0} & \frac{\partial \eta_1}{\partial Y_0} & \frac{\partial \eta_1}{\partial Z_0} & \frac{\partial \eta_1}{\partial \phi_0} & \frac{\partial \eta_1}{\partial \omega_0} & \frac{\partial \eta_1}{\partial \kappa_0} \\ \frac{\partial \xi_2}{\partial X_0} & \frac{\partial \xi_2}{\partial Y_0} & \frac{\partial \xi_2}{\partial Z_0} & \frac{\partial \xi_2}{\partial \phi_0} & \frac{\partial \xi_2}{\partial \omega_0} & \frac{\partial \xi_2}{\partial \kappa_0} \\ \frac{\partial \eta_2}{\partial X_0} & \frac{\partial \eta_2}{\partial Y_0} & \frac{\partial \eta_2}{\partial Z_0} & \frac{\partial \eta_2}{\partial \phi_0} & \frac{\partial \eta_2}{\partial \omega_0} & \frac{\partial \eta_2}{\partial \kappa_0} \\ \frac{\partial \xi_3}{\partial X_0} & \frac{\partial \xi_3}{\partial Y_0} & \frac{\partial \xi_3}{\partial Z_0} & \frac{\partial \xi_3}{\partial \phi_0} & \frac{\partial \xi_3}{\partial \omega_0} & \frac{\partial \xi_3}{\partial \kappa_0} \\ \frac{\partial \eta_3}{\partial X_0} & \frac{\partial \eta_3}{\partial Y_0} & \frac{\partial \eta_3}{\partial Z_0} & \frac{\partial \eta_3}{\partial \phi_0} & \frac{\partial \eta_3}{\partial \omega_0} & \frac{\partial \eta_3}{\partial \kappa_0} \\ \frac{\partial \xi_4}{\partial X_0} & \frac{\partial \xi_4}{\partial Y_0} & \frac{\partial \xi_4}{\partial Z_0} & \frac{\partial \xi_4}{\partial \phi_0} & \frac{\partial \xi_4}{\partial \omega_0} & \frac{\partial \xi_4}{\partial \kappa_0} \\ \frac{\partial \eta_4}{\partial X_0} & \frac{\partial \eta_4}{\partial Y_0} & \frac{\partial \eta_4}{\partial Z_0} & \frac{\partial \eta_4}{\partial \phi_0} & \frac{\partial \eta_4}{\partial \omega_0} & \frac{\partial \eta_4}{\partial \kappa_0} \end{bmatrix};$$

$$X_a = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ \phi \\ \omega \\ \kappa \end{bmatrix};$$

$$X_0 = \begin{bmatrix} X_{00} \\ Y_{00} \\ Z_{00} \\ \phi_0 \\ \omega_0 \\ \kappa_0 \end{bmatrix};$$

$$L_0 = \begin{bmatrix} \xi_{10} \\ \eta_{10} \\ \xi_{20} \\ \eta_{20} \\ \xi_{30} \\ \eta_{30} \\ \xi_{40} \\ \eta_{40} \end{bmatrix};$$

$$L_b = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \eta_1 \\ \xi_2 \\ \eta_2 \\ \xi_3 \\ \eta_3 \\ \xi_4 \\ \eta_4 \end{bmatrix};$$

$$X_a = X_0 - (A^T P A)^{-1} [A^T P (L_0 - L_b)]$$

As demais estatísticas de qualidade e precisão seguem as fórmulas já descritas no capítulo 4.

5.5. A interseção espacial

Conhecendo os parâmetros da orientação exterior para um par de fotografias com superposição ($X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, \phi_1, \omega_1$ e $\kappa_1; X_{02}, Y_{02}, Z_{02}, \phi_2, \omega_2$ e κ_2), pode-se, a partir das mesmas equações de colinearidade, gerar as coordenadas tridimensionais de um ponto, referidas ao sistema do espaço-objeto (terreno).

Na verdade, devemos destacar o aspecto iterativo dessa abordagem. São calculadas correções às aproximações iniciais das incógnitas até que a solução apareça.

Isso se deve ao fato de, desta vez, serem conhecidos os parâmetros para cada foto, mais as coordenadas do ponto principal no sistema fotográfico e a distância focal. Havendo estereoscopia entre as imagens, é possível localizar as coordenadas de determinado ponto no sistema fotográfico de cada uma das imagens (ξ_1 e $\eta_1; \xi_2$ e η_2), como atesta a figura:

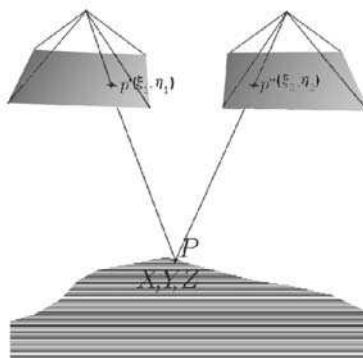


Figura 8: Interseção espacial.

As equações de colinearidade podem, então, ser reescritas da seguinte forma:

$$\xi_1 = \xi_{01} - c \frac{r_{11_1}(X - X_{01}) + r_{21_1}(Y - Y_{01}) + r_{31_1}(Z - Z_{01})}{r_{13_1}(X - X_{01}) + r_{23_1}(Y - Y_{01}) + r_{33_1}(Z - Z_{01})};$$

$$\eta_1 = \eta_{01} - c \frac{r_{12_1}(X - X_{01}) + r_{22_1}(Y - Y_{01}) + r_{32_1}(Z - Z_{01})}{r_{13_1}(X - X_{01}) + r_{23_1}(Y - Y_{01}) + r_{33_1}(Z - Z_{01})};$$

$$\xi_2 = \xi_{02} - c \frac{r_{11_2}(X - X_{02}) + r_{21_2}(Y - Y_{02}) + r_{31_2}(Z - Z_{02})}{r_{13_2}(X - X_{02}) + r_{23_2}(Y - Y_{02}) + r_{33_2}(Z - Z_{02})};$$

$$\eta_2 = \eta_{02} - c \frac{r_{12_2}(X - X_{02}) + r_{22_2}(Y - Y_{02}) + r_{32_2}(Z - Z_{02})}{r_{13_2}(X - X_{02}) + r_{23_2}(Y - Y_{02}) + r_{33_2}(Z - Z_{02})}.$$

Como o ponto em questão é o mesmo, as incógnitas passam a ser suas coordenadas tridimensionais no espaço-objeto (X , Y e Z). Ao todo, o número de equações é igual a quatro. Logo, há superabundância de dados e um ajustamento por mínimos quadrados, nos moldes da ressecção espacial, pode ser aplicado.

Para facilitar o ajustamento, é possível isolar os valores de X e Y , como exibido a seguir:

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \quad (5.12);$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \quad (5.13);$$

$$Z = \frac{X_{0_2} - Z_{0_2}K_{x_2} + Z_{0_1}k_{x_1} - X_{0_1}}{k_{x_1} - k_{x_2}} \quad (5.14);$$

onde:

$$k_{x_i} = \frac{r_{11_i}(\xi_i - \xi_{0_i}) + r_{12_i}(\eta_i - \eta_{0_i}) - r_{13_i}c}{r_{31_i}(\xi_i - \xi_{0_i}) + r_{32_i}(\eta_i - \eta_{0_i}) - r_{33_i}c};$$

$$k_{y_i} = \frac{r_{21_i}(\xi_i - \xi_{0_i}) + r_{22_i}(\eta_i - \eta_{0_i}) - r_{23_i}c}{r_{31_i}(\xi_i - \xi_{0_i}) + r_{32_i}(\eta_i - \eta_{0_i}) - r_{33_i}c}.$$

As equações 5.12 e 5.13 e os valores de k_{x_i} e k_{y_i} podem então ser desmembrados para a primeira e a segunda imagens (ou para mais imagens) da interseção espacial, o que levará às seguintes equações:

$$X = X_{0_1} + (Z - Z_{0_1}) \frac{r_{11_1}(\xi_1 - \xi_{0_1}) + r_{12_1}(\eta_1 - \eta_{0_1}) - r_{13_1}c}{r_{31_1}(\xi_1 - \xi_{0_1}) + r_{32_1}(\eta_1 - \eta_{0_1}) - r_{33_1}c};$$

$$Y = Y_{0_1} + (Z - Z_{0_1}) \frac{r_{21_1}(\xi_1 - \xi_{0_1}) + r_{22_1}(\eta_1 - \eta_{0_1}) - r_{23_1}c}{r_{31_1}(\xi_1 - \xi_{0_1}) + r_{32_1}(\eta_1 - \eta_{0_1}) - r_{33_1}c};$$

$$X = X_{0_2} + (Z - Z_{0_2}) \frac{r_{11_2}(\xi_2 - \xi_{0_2}) + r_{12_2}(\eta_2 - \eta_{0_2}) - r_{13_2}c}{r_{31_2}(\xi_2 - \xi_{0_2}) + r_{32_2}(\eta_2 - \eta_{0_2}) - r_{33_2}c};$$

$$Y = Y_{0_2} + (Z - Z_{0_2}) \frac{r_{21_2}(\xi_2 - \xi_{0_2}) + r_{22_2}(\eta_2 - \eta_{0_2}) - r_{23_2}c}{r_{31_2}(\xi_2 - \xi_{0_2}) + r_{32_2}(\eta_2 - \eta_{0_2}) - r_{33_2}c};$$

$$Z = \frac{X_{0_2} - Z_{0_2}k_{x_2} + Z_{0_1}k_{x_1} - X_{0_1}}{k_{x_1} - k_{x_2}};$$

onde:

$$R_w \cdot R_\phi \cdot R_\kappa = R ;$$

$$k_{y1} = \frac{r_{21_1}(\xi_1 - \xi_{0_1}) + r_{22_1}(\eta_1 - \eta_{0_1}) - r_{23_1}c}{r_{31_1}(\xi_1 - \xi_{0_1}) + r_{32_1}(\eta_1 - \eta_{0_1}) - r_{33_1}c} ;$$

$$k_{x2} = \frac{r_{11_2}(\xi_2 - \xi_{0_2}) + r_{12_2}(\eta_2 - \eta_{0_2}) - r_{13_2}c}{r_{31_2}(\xi_2 - \xi_{0_2}) + r_{32_2}(\eta_2 - \eta_{0_2}) - r_{33_2}c} ;$$

$$k_{y2} = \frac{r_{21_2}(\xi_2 - \xi_{0_2}) + r_{22_2}(\eta_2 - \eta_{0_2}) - r_{23_2}c}{r_{31_2}(\xi_2 - \xi_{0_2}) + r_{32_2}(\eta_2 - \eta_{0_2}) - r_{33_2}c} .$$

5.6. Fototriangulação analítica (por ajustamento de feixes perspectivos)

Um caso mais genérico da utilização das equações de colinearidade é a fototriangulação com ajustamento por feixes perspectivos (*bundle adjustment*). Nesse caso, ajusta-se um bloco inteiro, simultaneamente, recorrendo às diversas possibilidades de superposição, que podem localizar um determinado ponto em até seis imagens, considerando-se as clássicas superposições longitudinal e lateral de 60% e 30%, respectivamente – o que adicionará mais injunções ao modelo. O resultado final são os parâmetros da orientação exterior para todas as imagens do bloco, mais as coordenadas tridimensionais dos diversos pontos fotogramétricos selecionados pelo operador. O capítulo 6 trata exclusivamente desse assunto.

5.7. Considerações finais

Os métodos de orientação exterior através de ajustamentos envolvendo equações de colinearidade só se tornaram disponíveis para uso após a implementação de algumas técnicas computacionais. Embora exijam valores de entrada aproximados, apresentam grande consistência em seus resultados finais e são, portanto, largamente recomendados (Andrade, 1998).

Convém ressaltar que muitas soluções encontradas hoje em dia ainda utilizam a antiga abordagem “orientação relativa e orientação absoluta”, com adaptações da formulação já existente para o caso das fotogrametrias analógica e analítica. Isso se deve ao fato de os usuários ainda estarem acostumados com os métodos tradicionais, sendo adequada sua adaptação à fotogrametria digital utilizando os mesmos métodos. É obrigatório observar, porém, que um

processo de ajustamento por feixes perspectivos, por exemplo, une as etapas da orientação exterior e da fototriangulação em uma só, proporcionando resultados muito mais rápidos para os operadores.

Outros pontos importantes a serem observados encontram-se listados a seguir:

- a orientação exterior na fotogrametria digital consiste em orientar cada uma das imagens em relação ao sistema de coordenadas do espaço-objeto. Isso se dá através do conhecimento dos seis parâmetros da orientação exterior (X_0 , Y_0 , Z_0 , ϕ , ω e κ) para cada uma das imagens;
- entre os vários métodos para encontrá-los, ressaltam-se as soluções por ajustamentos por equações de colinearidade;
- a ressecção espacial serve para obter, para cada imagem, os valores dos parâmetros de orientação exterior. São necessários, pelo menos, três pontos de apoio de campo para cada imagem;
- a intersecção espacial permite, para um par de imagens, a obtenção das coordenadas tridimensionais no sistema de espaço-objeto para qualquer ponto que esteja na área de superposição. Para tal, necessita dos parâmetros da orientação exterior para ambas as imagens;
- o ajustamento por feixes perspectivos propicia a obtenção de todos os valores citados nos tópicos acima – recursivamente – para um bloco de imagens. É bastante utilizado atualmente.

Findo o processo, surgem outras possibilidades no fluxo da fotogrametria digital. Uma delas é a fototriangulação por feixes perspectivos, que pode ser efetuada em separado da orientação exterior, tendo os parâmetros obtidos pela ressecção espacial para cada uma das imagens inseridos como dados, e não mais como incógnitas. Outras opções são a restituição dos modelos ou a utilização de métodos como retificação, extração de modelos numéricos de elevações e ortorretificação, os quais serão melhor apresentados posteriormente.



Capítulo 6

Fototriangulação analítica

6.1. Introdução

No capítulo anterior, foi apresentada a *ressecção espacial* como método de obtenção dos seis parâmetros da orientação exterior (X_0 , Y_0 , Z_0 , ϕ , ω e κ) para cada uma das imagens que compõem um modelo estereoscópico. Adiante, demonstrou-se que, uma vez conhecidos esses valores, podia-se aplicar outro algoritmo, chamado *intersecção espacial*, com o intuito de obter as coordenadas de campo de qualquer ponto que se localizasse em, pelo menos, duas imagens (ou seja, em pelo menos um modelo estereoscópico). A figura abaixo evidencia esse caso simplificado:

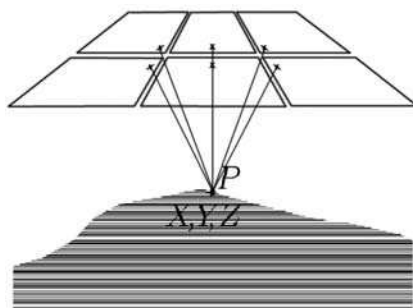


Figura 1: Triângulo $Pp'p''$ formado no espaço entre os raios projetivos e a linha de vôo.

Em destaque, um triângulo no espaço-objeto (terreno), cujos vértices são, respectivamente, um ponto sobre o espaço-objeto e os centros de projeção das imagens esquerda e direita de um modelo estereoscópico. Faz-se necessário ressaltar sua importância; não é senão por intermédio de sua solução que as coordenadas (X , Y e Z) de um ponto no espaço-objeto podem ser determinadas a partir das imagens fotográficas. Daí se origina o vocábulo *aerotriangulação*, que, no entender dos autores, peca pela restrição de

considerar os dois centros de projeção fotográfica duas sucessivas posições ocupadas pela câmara fotogramétrica aérea nos momentos de tirada das fotografias de um par estereoscópico.

Assim, preferir-se-á generalizar o termo aerotriangulação, adotando-se o vocábulo *fototriangulação*.

Seguindo a linha de raciocínio da generalização no contexto fotogramétrico, há de se ressaltar, ainda, estarmos diante de um dos processos fundamentais do mapeamento topográfico a partir de imagens fotográficas: a fototriangulação, ou seja, o processo de se determinar as coordenadas de terreno (ou do espaço-objeto) dos pontos fotogramétricos selecionados sobre as imagens fotográficas (espaço-imagem).

Crê-se que a fototriangulação seja uma das soluções matemáticas mais elegantes da engenharia cartográfica, uma vez que permite a economia de tempo na produção de dados cartográficos digitais, bem como implica notável redução dos custos de produção dos mapas topográficos, especialmente no que se refere às operações de levantamento geodésico e topográfico.

Prosseguindo na direção da generalização da solução fotogramétrica para o cálculo das coordenadas de pontos fotogramétricos no sistema de terreno ou do espaço-objeto, cabe destacar dois aspectos.

O primeiro diz respeito à necessidade do conhecimento prévio das coordenadas dos centros de perspectiva (CPs) no espaço-objeto/terreno nos respectivos instantes de tomada das fotografias que recobrem a área-alvo do mapeamento; além das coordenadas dos CPs, há de se conhecer também os respectivos ângulos de Euler (ou ângulos de atitude) de câmara aérea para cada imagem adquirida.

O segundo aspecto a ser considerado no sentido de uma solução matemática mais genérica para a fototriangulação é, certamente, onde reside sua elegância: que tal se os parâmetros da orientação exterior de cada imagem (v. o capítulo anterior), bem como as coordenadas dos pontos fotogramétricos no sistema de terreno (ou de espaço-objeto), pudessem ser computados e ajustados simultaneamente segundo o método dos mínimos quadrados?

Ainda no sentido de generalização da solução fotogramétrica, que tal se os parâmetros do sensor fotogramétrico (distância focal e coeficientes de distorção das lentes) pudessem também ser incluídos num grande modelo matemático? A boa notícia é: esse modelo existe e já foi implementado em algumas soluções fotogramétricas comerciais de maior relevância; trata-se do ajustamento por feixes perspectivos com parâmetros adicionais de autocalibração do sensor.

Na próxima seção, será examinada em detalhes a fototriangulação por feixes perspectivos.

6.2. Fototriangulação por feixes perspectivos

A fototriangulação por feixes perspectivos (*bundle adjustment*) pode ser entendida como a execução de uma ressecção espacial simultaneamente à execução da interseção espacial para um conjunto de imagens digitais adquiridas sobre determinado trecho do terreno. Dessa forma, com um só ajustamento, obtêm-se os parâmetros da orientação exterior para todas as imagens do vôo, associados às coordenadas no espaço-objeto (sistema de terreno) de uma série de pontos previamente medidos sobre as imagens e de poucos pontos medidos *in situ*. É um método, portanto, de densificação de pontos de campo. Entretanto, não é capaz de realizar milagres. Seu uso com parcimônia garante um excelente aproveitamento dos recursos disponíveis, mas, para isso, convém seguir as regras descritas na seção 6.3; p. 138.

Antes de passar a ele, é importante realizar uma pequena observação quanto aos métodos anteriores de fototriangulação: analógica e semi-analítica (por modelos independentes). O método analógico há muito tempo está em desuso e pressupõe a realização das ligações entre os modelos com intervenção humana, forçando as coordenadas dos modelos anteriores a coincidirem com as dos posteriores em aparelhos analógicos. Já o método de modelos independentes ainda é usado nas organizações que empregam métodos de restituição semi-analítica (ou analógica assistida por computador). Primeiramente, cada modelo é medido em aparelho restituidor. Feito isso, é conectado através de solução analítica (computacional), chegando-se ao conhecimento dos modelos de transformação para as faixas e para o bloco. Esses dois métodos não serão abordados aqui.

O método por ajustamento de feixes perspectivos, adotado como padrão no decorrer deste texto, é o único que pode ser considerado totalmente analítico. É utilizado pela maior parte dos restituidores analíticos e soluções digitais atuais.

6.2.1. Modelo matemático

A fototriangulação pelo método dos feixes perspectivos permite a reconstrução ótima da geometria dos feixes de raios luminosos formadores do espaço-imagem no momento da aquisição das imagens fotográficas. O processo se vale do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) para minimizar a função que quantifica os resíduos do ajustamento, de forma que cada raio

ajustado, originando-se em uma posição qualquer do espaço-objeto, passe o mais próximo possível de seu homólogo no espaço-imagem e do centro de perspectiva da imagem:

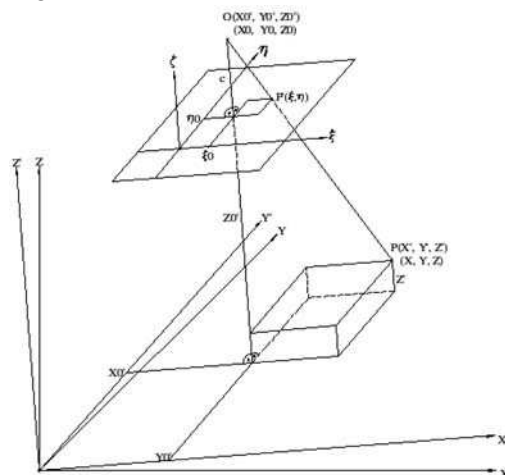


Figura 2: Colinearidade entre os pontos nos espaços imagem e objeto.

Essa condição de colinearidade pode ser expressa pelas equações 5.10 e 5.11, as quais são novamente transcritas:

$$\xi = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (5.10);$$

$$\eta = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (5.11);$$

onde:

c é a distância focal calibrada (mm);

ξ, η são as coordenadas do ponto no espaço-imagem (mm);

ξ_0, η_0 são as coordenadas do ponto principal (mm);

X, Y e Z são as coordenadas de um ponto no espaço-objeto (m);

X_0, Y_0 e Z_0 são as coordenadas do centro de perspectiva (m);

r_{rm} é o elemento da matriz de rotação entre os sistemas XYZ e $X'Y'Z'$ (este último é paralelo ao referencial da câmara fotogramétrica).

A matriz de rotação incorpora os ângulos ϕ, ω e κ , chamados ângulos de atitude, que, juntamente com X_0, Y_0 e Z_0 , formam os parâmetros de orientação exterior a serem obtidos no ajustamento. Também serão obtidas

as coordenadas de terreno X , Y e Z para os pontos fotogramétricos.

As funções de colinearidade, apesar de descreverem uma reta, não são lineares, pois combinam parâmetros lineares e angulares. O processo de ajustamento ocorrerá, então, pela utilização do MMQ combinado à matriz jacobiana de forma iterativa. Para isso, são necessárias aproximações iniciais dos valores das incógnitas. A cada passo do processo, os valores alcançados para as incógnitas ϕ , ω , κ , X_0 , Y_0 e Z_0 , para a orientação exterior, e X , Y e Z , para as coordenadas dos pontos fotogramétricos, estarão mais próximos de seus valores verdadeiros e serão reintroduzidos como parâmetros – até que as diferenças a minimizar estejam dentro do limite desejado, isto é, de tolerâncias fixadas *a priori*, tanto para os valores lineares quanto para os angulares.

6.2.2. Aproximações iniciais

Para ilustrar a explanação sobre a obtenção das aproximações iniciais para as incógnitas e a formação das matrizes para o ajustamento, será adotado o bloco de imagens abaixo:

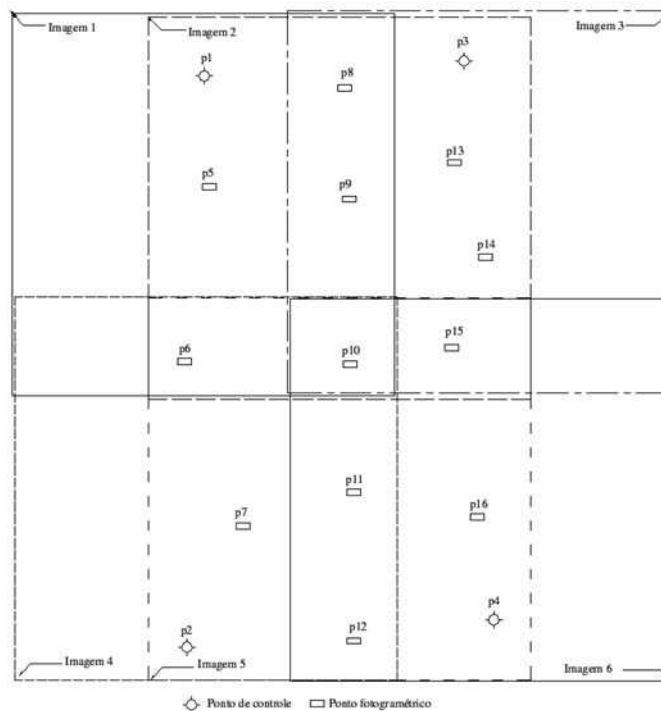


Figura 3: Bloco de imagens fotográficas, pontos de controle e pontos fotogramétricos.

A numeração dos pontos de controle é feita em seqüência, transversalmente ao sentido do bloco. Em seguida, os pontos fotogramétricos serão numerados da mesma forma, para que possam ser obtidas matrizes de banda mínima, ou seja, para que os elementos não-nulos formem uma diagonal a mais estreita possível. Isso possibilita a solução do sistema com um menor esforço computacional (Silveira, 2004).

Para chegar às aproximações iniciais, é preciso que sejam obtidos os parâmetros de transformação entre o sistema do espaço-imagem e o sistema do espaço-objeto para cada imagem.

O modelo de transformação adotado foi o afim geral, que tem seis parâmetros, sendo necessárias para constituir um sistema compatível no mínimo seis equações. Cada ponto contido na imagem resulta em duas equações; dessa forma, são necessários ao menos três pontos não-colineares por imagem. Apesar de as imagens que compõem o bloco apresentarem essa configuração, suas coordenadas no sistema do espaço-objeto (terreno), com exceção dos pontos de controle, não são conhecidas. Os parâmetros de transformação de cada imagem serão obtidos executando-se um ajustamento em que os pontos fotogramétricos serão tratados como injunções, conforme mostram as equações 6.3 e 6.4. As equações para os pontos de controle serão:

$$a_0 + a_1\xi + a_2\eta = X \quad (6.1);$$

$$b_0 + b_1\xi + b_2\eta = Y \quad (6.2).$$

Para os pontos fotogramétricos:

$$a_0 + a_1\xi + a_2\eta - X = 0 \quad (6.3);$$

$$b_0 + b_1\xi + b_2\eta - Y = 0 \quad (6.4).$$

As matrizes para o ajustamento serão compostas pelas submatrizes descritas a seguir:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & \xi_{ij} & \eta_{ij} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \xi_{ij} & \eta_{ij} \end{bmatrix} \quad (6.5);$$

$$B = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (6.6);$$

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (6.7);$$

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \end{bmatrix} \quad (6.8);$$

onde:

i é o identificador da imagem;

j é o identificador do ponto;

ξ e η são as coordenadas em milímetros do ponto no espaço-imagem;

X e Y são as coordenadas planimétricas do ponto no sistema de terreno;

a_0 , a_1 , a_2 , b_0 , b_1 e b_2 são os parâmetros de transformação para as coordenadas da imagem i .

A configuração das matrizes para o ajustamento é descrita no diagrama da figura 4 e essas matrizes constituirão a equação 6.9:

$$MX = L \quad (6.9).$$

A solução da equação 6.9 será obtida recorrendo-se ao método de Boltz (Gemael, 1994). Dessa forma:

$$M_{11} = M_1^T M_1 \quad (6.10);$$

$$M_{12} = M_1^T M_2 \quad (6.11);$$

$$M_{22} = M_2^T M_2 \quad (6.12);$$

$$m_1 = M_1^T L \quad (6.13);$$

$$m_2 = M_2^T L \quad (6.14).$$

Pode-se, então, reescrever a equação 6.9 na forma:

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{12}^T & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} \quad (6.15).$$

O vetor dos parâmetros da transformação afim x_1 e das coordenadas (X, Y) dos pontos fotogramétricos x_2 será obtido através das equações 6.16 e 6.17:

$$x_1 = (M_{11} - M_{12}M_{22}^{-1}M_{12}^T)^{-1} (m_1 - M_{12}M_{22}^{-1}m_2) \quad (6.16);$$

$$x_2 = M_{22}^{-1}m_2 - M_{22}^{-1}M_{12}^T x_1 \quad (6.17).$$

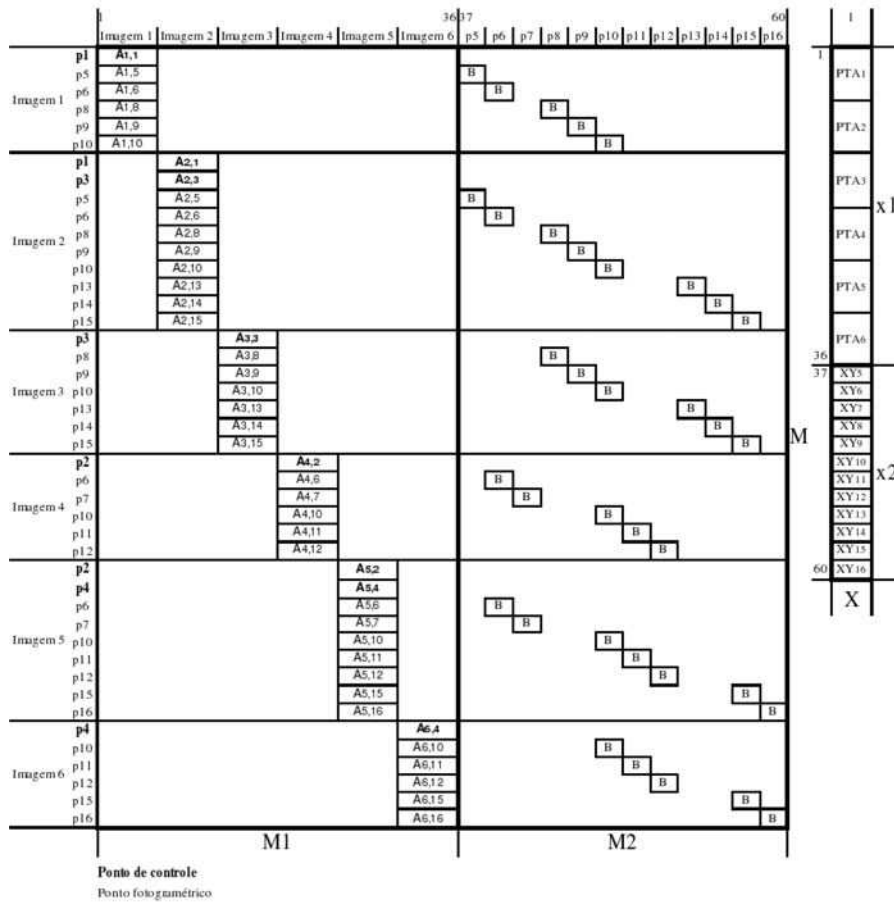


Figura 4: Matrizes para obtenção dos parâmetros de transformação e coordenadas planimétricas dos pontos fotogramétricos.

A coordenada Z dos pontos fotogramétricos será a média das coordenadas Z dos pontos de controle contidos nas imagens componentes do bloco.

Para calcular as aproximações iniciais de X_0 e Y_0 , lança-se mão das coordenadas do Ponto Principal (PP), informado no certificado de calibração. Pelo princípio da colinearidade, o CP e o PP estarão alinhados, permitindo que se obtenham X_0 e Y_0 , as coordenadas do CP no terreno. Dessa forma, usando os parâmetros de transformação obtidos em 6.16 e substituindo ξ e η por ξ_0 e η_0 em 6.1 e 6.2, chega-se a X_0 e Y_0 para cada imagem.

A aproximação inicial para o valor da coordenada Z_0 será estimada através da relação:

$$Z_0 = cEM \quad (6.18);$$

EM é o fator de escala da imagem, como segue:

$$EM = \frac{\left(\frac{S_{p2}}{s_{p2}} + \frac{S_{p3}}{s_{p3}} + \frac{S_{pm}}{s_{pm}} \right)}{n} \quad (6.19);$$

S e s são as normas de vetores definidos por pontos no espaço-objeto e espaço-imagem, respectivamente:

$$S_{pm} = \sqrt{(X_p - X_m)^2 + (Y_p - Y_m)^2 + (Z_p - Z_m)^2} \quad (6.20);$$

$$s_{pm} = \sqrt{(\xi_p - \xi_m)^2 + (\eta_p - \eta_m)^2} \quad (6.21);$$

onde:

X , Y e Z são as coordenadas do ponto no terreno (m);

ξ e η são as coordenadas no espaço-imagem (mm);

p é o identificador do primeiro ponto contido na imagem;

m é o identificador do ponto, maior que p ;

n é o número de pontos contidos na imagem.

Por serem imagens fotográficas aproximadamente verticais, considera-se que o valor verdadeiro dos ângulos ϕ e ω seja próximo de 0° , adotando-se este valor para a sua aproximação inicial. Há de se ressaltar, contudo, que esse procedimento não se aplica a imagens oblíquas.

Para estabelecer o valor aproximado do ângulo κ , que expressa a direção do vôo, é necessário estimar a posição da imagem em relação ao terreno. Primeiramente, transformam-se para o sistema de terreno as coordenadas da marca fiducial que aponta para a direção do vôo (na figura 5, marca fiducial 1), usando os mesmos parâmetros calculados em 6.16, de forma semelhante ao cálculo de X_0 e Y_0 . Com as coordenadas X_1 , Y_1 assim obtidas e as coordenadas já calculadas do CP no terreno X_0 , Y_0 , pode-se estimar o ângulo κ .

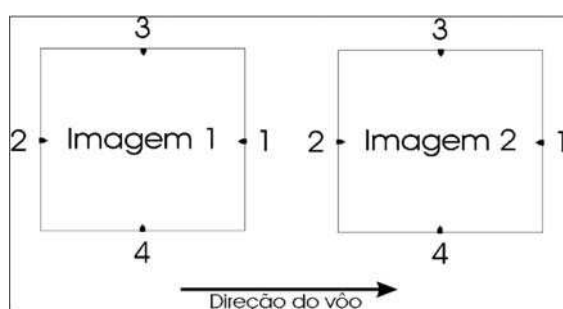


Figura 5: Disposição das marcas fiduciais e direção do vôo.

Verifica-se inicialmente se κ é 0, 90, 180 ou 270 graus. Assim, temos:

$$\Delta X = X_1 - X_0 \quad (6.22);$$

$$\Delta Y = Y_1 - Y_0 \quad (6.23);$$

$$\begin{aligned} &\text{Se } \Delta Y = 0 \text{ e } X_1 > X_0, \kappa = 0^\circ \\ &\text{Se } \Delta Y = 0 \text{ e } X_1 < X_0, \kappa = 180^\circ \\ &\text{Se } \Delta X = 0 \text{ e } Y_1 > Y_0, \kappa = 90^\circ \\ &\text{Se } \Delta X = 0 \text{ e } Y_1 < Y_0, \kappa = 270^\circ \end{aligned} \quad (6.24).$$

Se nenhuma das condições em 6.24 for satisfeita, calcula-se o ângulo que a reta descrita por X_0 , Y_0 e X_1 , Y_1 faz com o eixo das abscissas do sistema de terreno (figura 6):

$$\alpha = \arctan \left(\left| \frac{\Delta Y}{\Delta X} \right| \right) \quad (6.25) .$$

Em seguida, faz-se o estudo do quadrante e determina-se κ :

$$\begin{aligned}
 &\text{Se } \Delta Y > 0 \text{ e } \Delta X > 0, \kappa = \alpha \\
 &\text{Se } \Delta Y > 0 \text{ e } \Delta X < 0, \kappa = 180^\circ - \alpha \\
 &\text{Se } \Delta Y < 0 \text{ e } \Delta X < 0, \kappa = 180^\circ + \alpha \\
 &\text{Se } \Delta Y < 0 \text{ e } \Delta X > 0, \kappa = 360^\circ - \alpha
 \end{aligned} \tag{6.26}$$

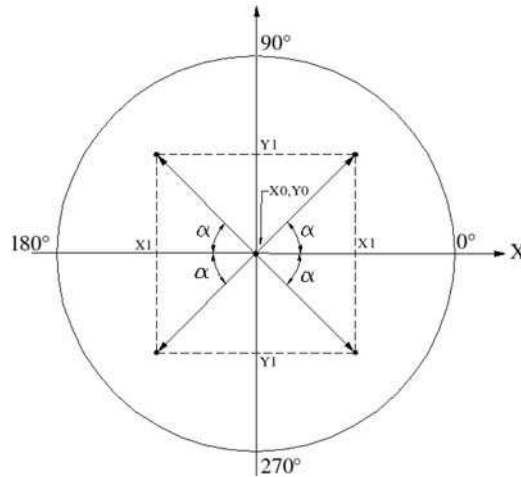


Figura 6: Possibilidades de ocorrência do ângulo α .

6.2.3. Ajustamento por feixes perspectivos

Inicialmente, as equações de colinearidade serão escritas na forma de funções de suas variáveis:

$$f\xi(\varpi, \phi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0, X, Y, Z) = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \tag{6.27};$$

$$f\eta(\varpi, \phi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0, X, Y, Z) = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \tag{6.28}.$$

Pelo princípio da colinearidade – inserindo-se os parâmetros $\varpi, \phi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0, X, Y, Z$ –, obtêm-se ξ_c, η_c , coordenadas no espaço-imagem calculadas para o ponto de controle das coordenadas observadas (X, Y, Z) . Ocorre que $\varpi, \phi, \kappa, X_0, Y_0$ e Z_0 – os parâmetros da orientação exterior que se deseja conhecer – serão, num primeiro momento, aproximações. Portanto, ξ_c, η_c , assim obtidos, divergirão dos valores (ξ_m, η_m) , coordenadas do espaço-imagem observadas (medidas) para o mesmo ponto. O objetivo do ajustamento por feixes perspectivos é fazer com que a diferença entre as coordenadas calculadas (ξ_c, η_c) e as medidas no espaço-imagem (ξ_m, η_m)

seja menor ou igual a um valor estipulado como aceitável, para todos os pontos contidos nas imagens que compõem o bloco.

Para que o sistema seja compatível, é necessário que o número de equações seja maior ou igual ao número de incógnitas. Há seis incógnitas para cada imagem (os parâmetros da orientação exterior) e três para cada ponto fotogramétrico (suas coordenadas de terreno). Cada ponto de controle ou fotogramétrico acrescenta ao sistema duas equações por imagem. O número de incógnitas e o de equações serão dados, respectivamente, pelas equações 6.29 e 6.30:

$$nInc = nImgs \times 6 + nPFt \times 3 \quad (6.29);$$

$$nInc = \left[\sum_{i=1}^{nImgs} nPC(i) + nPF(i) \right] \times 2 \quad (6.30);$$

onde:

$nInc$ é o número de incógnitas;

$nImgs$ é o número de imagens fotográficas do bloco;

$nPFt$ é o número total de pontos fotogramétricos;

nEq é o número de equações do sistema;

$nPC(i)$ é o número de pontos de controle na imagem i ;

$nPF(i)$ é o número de pontos fotogramétricos contidos na imagem i .

Se a condição de compatibilidade for satisfeita, o sistema constituído também o será, pois possui uma incógnita a menos por ponto fotogramétrico.

Para o ajustamento do bloco tomado como exemplo (figura 3; p. 127), a compatibilidade do sistema se verifica como segue:

$$\begin{aligned} nInc &= 6 \times 6 + 12 \times 3 = 72 \\ Eq &= (6 + 10 + 7 + 6 + 9 + 6) \times 2 = 88 \end{aligned}$$

Como já mencionado, o ajustamento ocorrerá pelo MMQ associado à matriz jacobiana. A formação das matrizes jacobianas para os pontos de controle e os pontos fotogramétricos será, respectivamente:

$$JO = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial X_0} & \frac{\partial \xi}{\partial Y_0} & \frac{\partial \xi}{\partial Z_0} & \frac{\partial \xi}{\partial \omega} & \frac{\partial \xi}{\partial \phi} & \frac{\partial \xi}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial \eta}{\partial X_0} & \frac{\partial \eta}{\partial Y_0} & \frac{\partial \eta}{\partial Z_0} & \frac{\partial \eta}{\partial \omega} & \frac{\partial \eta}{\partial \phi} & \frac{\partial \eta}{\partial \kappa} \end{bmatrix} \quad (6.31);$$

$$JF = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial X} & \frac{\partial \xi}{\partial Y} & \frac{\partial \xi}{\partial Z} \\ \frac{\partial \eta}{\partial X} & \frac{\partial \eta}{\partial Y} & \frac{\partial \eta}{\partial Z} \end{bmatrix} \quad (6.32).$$

A configuração das matrizes para o ajustamento dar-se-á pela matriz A, conforme o diagrama da figura 7, onde:

$JO(O_i, X_j)$ é a matriz jacobiana (6.31) para o ponto j contido na imagem i , independentemente deste ser de controle ou fotogramétrico; $JF(O_i, X_j)$ é a matriz jacobiana (6.32) para o ponto fotogramétrico j contido na imagem i , independentemente deste ser de controle ou fotogramétrico;

O_i é o parâmetro da orientação exterior da imagem i ;

X_j é a coordenada (X, Y, Z) para o ponto j ;

O vetor L será composto pelas diferenças entre as coordenadas observadas (medidas) e as coordenadas calculadas ($\xi(O_i, X_j)$ e $\eta(O_i, X_j)$) para cada ponto de controle ou fotogramétrico j contido na imagem i ;

A matriz dos pesos P será, num primeiro momento, a matriz-identidade de ordem igual ao número de equações do sistema, calculado em 6.30.

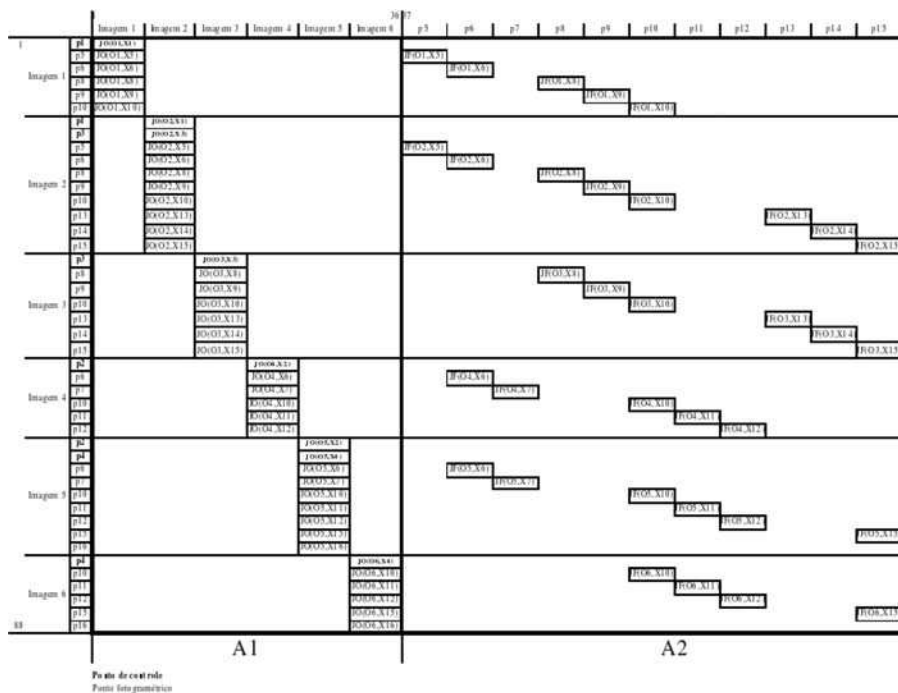


Figura 7: Configuração da matriz A.

A solução do sistema também dar-se-á pelo método de Boltz, conforme mencionado no cálculo das aproximações iniciais (seção 6.2.2; p. 127). Para tanto, temos:

$$N22 = A2^T \cdot A2 \quad (6.33);$$

$$N11 = A1^T \cdot P \cdot A1 \quad (6.34);$$

$$N12 = A1^T \cdot P \cdot A2 \quad (6.35);$$

$$n1 = A1^T \cdot P \cdot L \quad (6.36);$$

$$n2 = A2^T \cdot L \quad (6.37).$$

$A1$ e $A2$ são submatrizes da matriz A (figura 7). Dessa forma, podemos escrever as equações normais como seguem:

$$\begin{bmatrix} N11 & N12 \\ N12^T & N22 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n1 \\ n2 \end{bmatrix} \quad (6.38);$$

$$[N11][x1] = [n1] \quad (6.39).$$

$N11$ será composta por matrizes de dimensão 6×6 , não importando o número de imagens; $N22$ será composta por matrizes 3×3 , não importando o número de pontos fotogramétricos. $N12$ terá, assim, a dimensão $nImgs \times 6 + nPF \times 3$, onde $nImgs$ é o número de imagens fotográficas que compõem o bloco e nPF , o número total de pontos fotogramétricos (figura 8). Se o sistema for do tipo descrito em 6.39, a solução das equações normais será:

$$x1 = N11^{-1} \cdot n1 \quad (6.40).$$

De outro modo, se o sistema for do tipo descrito em 6.38, recorre-se ao particionamento das matrizes. Assim:

$$x1 = (N11 - N12 \cdot N22^{-1} \cdot N12^T)^{-1} \cdot (n1 - N12 \cdot N22^{-1} \cdot n2) \quad (6.41);$$

$$x2 = N22^{-1} \cdot n2 - N22^{-1} \cdot N12^T \cdot x1 \quad (6.42).$$

A inversão das matrizes $N11$ e $N22$ pode ser executada invertendo-se separadamente cada uma das submatrizes que compõem sua diagonal,

minimizando-se a necessidade de grandes capacidades de processamento para blocos compostos por muitas imagens fotográficas ou pontos fotogramétricos.

Os vetores x_1 e x_2 assim obtidos serão as correções aos valores iniciais das incógnitas, sendo somados a estas e reintroduzidos no sistema para uma nova iteração até que todos os componentes lineares e angulares atinjam valores menores ou iguais aos estipulados como critérios de parada. Quando isso tiver ocorrido, considera-se que os valores atingiram a convergência no nível de precisão desejado.

Após o ajustamento, que resulta nos parâmetros de orientação exterior e nas coordenadas referentes ao espaço-objeto (terreno) dos pontos fotogramétricos, é conveniente que se avalie a qualidade dos resultados obtidos. Essa avaliação será feita confrontando-se as coordenadas dos pontos de controle medidas em campo (e usadas no ajustamento) com as coordenadas dos mesmos pontos calculadas a partir dos parâmetros de orientação exterior obtidos no ajustamento. As diferenças serão os resíduos. Como o ajustamento por feixes perspectivos pressupõe a imagem fotográfica como unidade elementar, os resíduos das coordenadas dos pontos devem ser calculados de forma independente para cada imagem, e não por interseção espacial, pois pode haver pontos que estejam contidos em somente uma imagem, ou o ajustamento pode estar sendo feito para apenas uma imagem fotográfica (ressecção espacial). O sistema de imagem fornece apenas duas coordenadas para o ponto – que no referencial de terreno tem três –, o que levará a um sistema incompatível. Adotou-se, então, o resíduo das coordenadas X e Y , possível de ser calculado a partir dos parâmetros advindos de uma única imagem.

Se o valor dos resíduos obtidos a partir dos resultados do ajustamento não estiver dentro de um limite estipulado, os mesmos constituirão uma matriz de pesos, usada em um novo processo de ajustamento.

A matriz A (figura 7; p. 135) utilizada para o ajustamento é composta das derivadas das equações de colinearidade para ξ (abscissas) e η (ordenadas). A matriz dos pesos será então constituída de forma que os pesos advindos dos resíduos das coordenadas X correspondam às equações para ξ e os oriundos das coordenadas Y , às equações para η . Os pesos para os pontos fotogramétricos serão mantidos com o valor 1. Desse modo, quanto menores forem os resíduos dos pontos de controle, maior importância relativa esses pontos terão no ajustamento. Quando o resíduo tender a zero, o peso para a coordenada correspondente tenderá a infinito. Isso garante que o bloco de imagens não sofra deformação no ajustamento.

Com a matriz dos pesos estabelecida, inicia-se um novo ajustamento, utilizando como aproximações iniciais os parâmetros de orientação exterior

obtidos no ajustamento imediatamente anterior, e assim sucessivamente, até que os resíduos atinjam o valor considerado aceitável.

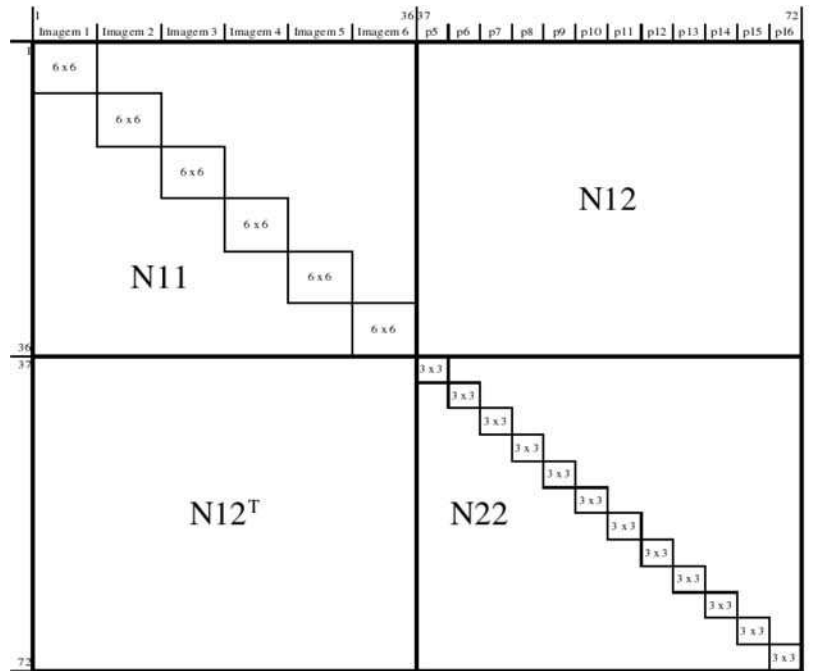


Figura 8: Diagrama das equações normais.

6.3. Planejamento para a fototriangulação

Para que a fotogrametria atinja resultados satisfatórios, deve-se dispor de dados iniciais de boa qualidade, sem, contudo, implicar dispêndios excessivos. Esses dados iniciais constituem-se, basicamente, na determinação dos pontos de controle de campo, bem como na determinação de pontos de teste da qualidade do mapeamento produzido.

É preciso esclarecer que não pretendemos aqui discutir critérios de posicionamento do controle de campo para a fototriangulação. Mencionaremos, porém, o fato de o controle planialtimétrico ser requerido somente na periferia do bloco de imagens.

Quanto ao espaçamento dos pontos de controle, Andrade (1998) recomenda os seguintes valores: de três a cinco bases, no sentido longitudinal do bloco, e de duas bases, no sentido transversal. O termo *base* é considerado o valor da distância, no sistema do espaço-objeto, entre os centros de perspectiva de duas exposições sucessivas, ao longo da mesma faixa de vôo.

Ao utilizar o ajustamento por feixes perspectivos, teoricamente o levantamento de pontos de controle vertical no interior do bloco é dispensável. Entretanto, recomendam-se a seleção e a medição de pontos nítidos nas imagens e facilmente identificáveis no terreno, com vistas à avaliação de qualidade do mapeamento fotogramétrico. Obviamente, esses pontos não participarão do ajustamento por feixes perspectivos, servindo apenas para a avaliação da qualidade do trabalho.

Outro aspecto igualmente relevante no planejamento do controle de campo para a fototriangulação diz respeito às precisões do levantamento de campo. Nesse sentido, julgamos oportuno remeter o leitor para as *Especificações e normas gerais para levantamentos geodésicos em território nacional* (IBGE, 1983) e para as *Especificações e normas gerais para levantamentos GPS* (IBGE, 2006).

Particularmente quanto ao emprego de técnicas de posicionamento geodésico por satélites, prevê-se a sua utilização em larga escala, excetuando-se regiões centrais de densa aglomeração urbana, devido às perdas de sintonia e à interferência nos sinais recebidos pelos equipamentos rastreadores.

É de conhecimento geral a possibilidade de se obterem precisões sub-centimétricas, utilizando-se receptores geodésicos e *software* de pós-processamento. Isso se dá tanto para o posicionamento planimétrico quanto para o altimétrico, devendo-se, contudo, ressaltar que, para este último, há de se considerar o conhecimento do desnível geoidal no ponto de interesse.

A figura 9 mostra um caso em que o espaçamento planimétrico é igual a quatro bases e o espaçamento entre as linhas de apoio altimétrico, igual a cinco bases:

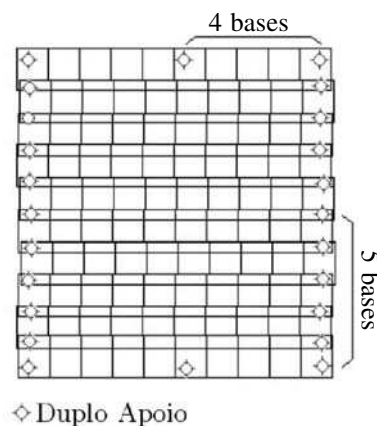


Figura 9: Exemplo de arranjo de pontos de controle em bloco.

Os pontos devem ser escolhidos em lugares nítidos, preferencialmente de fácil acesso, como cantos de cercas, estradas ou construções. Consideram-se más escolhas árvores, regiões homogêneas e locais próximos de espelhos d'água.

Os pontos escolhidos são marcados nas cópias das fotos do voo por intermédio de circunferências desenhadas com lápis dermatográfico. A equipe de campo usará essa informação para determinar as coordenadas de terreno dos pontos escolhidos. No verso da foto, ou em fichas especiais, é desenhado um croqui ou é anexada uma foto da localização exata do ponto. Outras informações pertinentes também podem ser anotadas (descrição do itinerário realizado para chegar ao ponto, pontos notáveis próximos etc.).

Em casos especiais, pode-se contar com a pré-sinalização, que é a marcação *in loco* dos pontos a serem coletados antes da execução do voo. Ao serem fotografados, os sinais ficam visíveis nas fotos, acelerando o processo de identificação. Trata-se de um método caro, pouco usual, exceto em vôos de calibração ou treinamento.

6.4. Dados adicionais para a fototriangulação

Ainda há outros dados que podem ser inseridos, como injunções adicionais. Entre eles, citamos:

- *voo apoiado por GPS*: utiliza-se o modo cinemático, podendo ser pós-processado. Colocam-se antenas nas asas e no dorso do avião durante o voo, permitindo o conhecimento automático dos parâmetros de orientação exterior para cada tomada da foto (com precisão posicional centimétrica). Não sendo necessária a execução da orientação exterior, esse caso dispensa o conhecimento de coordenadas de quaisquer pontos de campo. Caso seja usado o modo RTK (*Real Time Kinematic*, método de posicionamento relativo cinemático em tempo real), pode-se até realizar o restante da fototriangulação em tempo real (*on-the-fly*);
- *imagens adicionais*: podem ser fotografias não-métricas, vôos antigos ou imagens obtidas por plataformas orbitais. O método analítico permite que imagens de diversas fontes sejam anexadas ao bloco, uma vez que se depende apenas das equações de colinearidade. Cada imagem é equacionada a partir de seus próprios parâmetros de orientação interior e exterior (distância focal, parâmetros de transformação imagem/câmara, X_0 , Y_0 , Z_0 , ϕ , ω e κ). Algumas soluções

fotogramétricas comerciais dispõem dessa opção, considerada, juntamente com o voo apoiado por GPS, o estado-da-arte em termos de fototriangulação.

6.5. Controle de qualidade de fototriangulação

Embora reconhecendo tratar-se de um tópico bem controverso – que certamente pode variar em função da seleção de métodos, instrumentos e *software* fotogramétrico, assim como em função do desenvolvimento de textos específicos –, arriscam-se os autores a transcrever os valores apresentados por Kraus (1999).

Assim, temos como estimativas para a precisão do ajustamento por feixes perspectivos a utilização de pontos pré-sinalizados e a não-utilização de parâmetros adicionais no ajustamento. Para a planimetria: $\sigma_{x,y} = \pm 6\mu\text{m}$ na imagem fotográfica; e $\sigma_z = \pm 0,06\%$, denominada escala da imagem, para câmaras de ângulo normal em grandezas angulares e $\sigma_z = \pm 0,08\%$ para câmaras angulares do tipo supergrande.

Evidentemente, não se dispensarão as informações sobre as precisões dos pontos fotogramétricos e dos de controle após o ajustamento. Essas informações poderão ser facilmente computadas por intermédio das respectivas matrizes variância-covariância.

6.6. Considerações finais

A fototriangulação representa um grande avanço nas técnicas fotogramétricas, por permitir a obtenção de coordenadas de vários pontos no terreno a partir da interpolação de apenas alguns pontos de campo, racionalizando custos na produção fotogramétrica.

Por se tratar de um processo de interpolação, não é isento de erros. Porém, se respeitadas as precisões adequadas a cada escala na obtenção dos pontos de apoio básicos, chega-se a resultados aceitáveis para o mapeamento topográfico (escalas de 1:250.000 e menos), ou até mesmo para o mapeamento cadastral (escalas de 1:2.000 e maiores). Os parâmetros obtidos na fototriangulação são essenciais nas práticas posteriores da retificação, ortorretificação e restituição. Ressalta-se aí a importância fundamental dessa tarefa, sendo então essencial a sua realização criteriosa.



Capítulo 7

Retificação e normalização de imagens

7.1. Conceito inicial

Segundo Andrade (1998), retificar uma imagem consiste em projetá-la, segundo seu próprio feixe perspectivo, em um plano horizontal. Isso significa que, por intermédio da retificação, é possível modificar e até mesmo eliminar completamente os ângulos de atitude da câmara em relação a um dado referencial, bem como a distância focal da imagem resultante. Tal fato pode ser evidenciado mais claramente na figura abaixo:

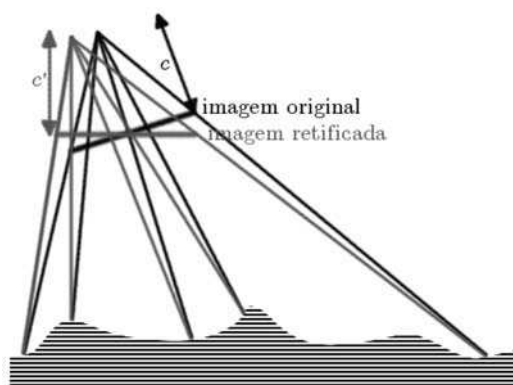


Figura 1: Imagem original, com suas devidas inclinações, e imagem retificada, de modo que não esteja rotacionada. Note que, no processo de retificação, a escala da imagem poderá ser alterada.

No caso da fotogrametria aérea/orbital, ou seja, a fotogrametria com vistas ao mapeamento em larga escala, interessa transformar as imagens, a fim de eliminar os ângulos ϕ e ω , gerando, então, imagens *perfeitamente verticais*. Vale lembrar que, para imagens aéreas, ϕ e ω devem ser menores que 5° . Caso se queira, pode-se alterar, além dos ângulos já citados, o ângulo de deriva κ e a distância focal da imagem, o que serve para uniformizar todas as imagens de um mesmo vôo (ou mesmo de vôos diferentes).

O objetivo primordial da retificação para a fotogrametria aérea/orbital é gerar uma nova imagem vertical sem as distorções introduzidas pela atitude do sensor durante a tomada da imagem. A imagem resultante poderá, inclusive, estar isenta dos erros de deslocamento devido ao relevo. Nessa hipótese, deve-se realizar o processo da ortoretificação.

A retificação é orientada à imagem, sendo necessário o conhecimento dos parâmetros de orientação interior e exterior da mesma. A seguir, serão apresentados alguns métodos matemáticos mais utilizados para esse fim.

7.2. Modelos matemáticos

Existem basicamente duas formas para a realização das operações de retificação: as transformações polinomiais (afim, projetiva etc.) e a utilização das equações de colinearidade.

7.2.1. Transformação afim

A já conhecida transformação afim também pode ser utilizada para a retificação aproximada de uma imagem. Conhecendo-se as coordenadas de no mínimo três pontos não-colineares no sistema de coordenadas da imagem inicial e no sistema de coordenadas da imagem final, consiste em calcular os coeficientes de transformação entre ambos os sistemas através de um ajustamento pelo método paramétrico. Tais coeficientes são a_0 , a_1 , a_2 e b_0 , b_1 , b_2 . A formulação da transformação afim é a seguinte:

$$x = a_0 + a_1x' + a_2y' \quad (7.1);$$

$$y = b_0 + b_1x' + b_2y' \quad (7.2).$$

Aqui, (x, y) representa o sistema de coordenadas da imagem final, enquanto (x', y') é o sistema da imagem de origem.

Nesse caso, deseja-se corrigir as distorções causadas pela rotação da câmara em relação a um referencial. Dispõe-se de uma imagem inicial, em sistema de *pixels* (discreto), e quer-se chegar a outra imagem digital, mas retificada. O sistema de coordenadas da segunda imagem também é discreto. Assim, pode-se reescrever as equações 7.1 e 7.2 como:

$$coluna = a_0 + a_1coluna' + a_2linha' \quad (7.3);$$

$$linha = b_0 + b_1coluna' + b_2linha' \quad (7.4).$$

Resta ainda um requisito para executar o ajustamento: alguns pontos de controle (no mínimo três) são necessários. Para eles, deve-se conhecer suas coordenadas no sistema da imagem retificada. Uma boa saída é escolher os cantos do objeto a ser retificado, se o mesmo for retangular. Caso se queira eliminar totalmente a distorção causada pela rotação da câmara, esses cantos terão de ser obrigatoriamente os cantos da imagem retificada, ou seja, as coordenadas $(0, 0)$, $(0, l)$, (c, l) , e $(c, 0)$, onde c e l são valores arbitrados, que devem ser obtidos aproximadamente caso se deseje manter a proporcionalidade.

Um exemplo que serve para clarificar esse modelo de transformação é o da figura 2. Nela, tem-se uma imagem da fachada de um pequeno edifício, obviamente eivada das distorções convencionais. Sua representação retificada pode ser vista ao lado. Como a fachada é retangular, pode-se utilizar seus cantos como pontos de controle e dizer automaticamente que estes serão os cantos da imagem final. Para dar um valor aproximadamente igual à proporção base \times altura da fachada à imagem final, é possível, por exemplo, verificar quanto valem as alturas (pela direita e pela esquerda) e as bases (embaixo e em cima) do prédio na imagem distorcida e tirar uma média. Esta foi a estratégia adotada nesse caso, chegando-se ao resultado a seguir:

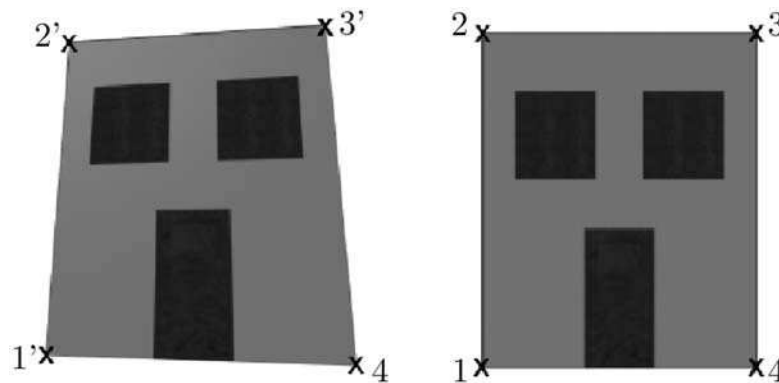


Figura 2: Imagem original, com suas devidas inclinações, e imagem retificada. Os pontos de controle estão marcados com um x .

Temos em mãos, agora, valores de coordenadas de quatro pontos no sistema da imagem original (pois o usuário terá de escolhê-las) e no sistema da imagem final (no caso da figura 2, pois foram arbitrados os cantos da imagem). Arranjando-se os termos em forma matricial, chega-se a:

$$\begin{bmatrix} \text{coluna1} \\ \text{linha1} \\ \text{coluna2} \\ \text{linha2} \\ \text{coluna3} \\ \text{linha3} \\ \text{coluna4} \\ \text{linha4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \text{coluna1}' & \text{linha1}' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \text{coluna1}' & \text{linha1}' \\ 1 & \text{coluna2}' & \text{linha2}' & & & \\ 0 & & & 1 & \text{coluna2}' & \text{linha2}' \\ 1 & \text{coluna3}' & \text{linha3}' & & & \\ 0 & & & 1 & \text{coluna3}' & \text{linha3}' \\ 1 & \text{coluna4}' & \text{linha4}' & & & \\ 0 & & & 1 & \text{coluna4}' & \text{linha4}' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (7.5).$$

Um ajustamento pelo método paramétrico pode ser realizado, tendo como valores finais: a_0 , a_1 , a_2 e b_0 , b_1 , b_2 ajustados.

7.2.2. Transformação projetiva

A transformação projetiva é expressa da seguinte forma:

$$x = \frac{c_{11}x' + c_{12}y' + c_{13}}{c_{31}x' + c_{32}y' + 1} \quad (7.6);$$

$$y = \frac{c_{21}x' + c_{22}y' + c_{23}}{c_{31}x' + c_{32}y' + 1} \quad (7.7).$$

Essa transformação requer no mínimo quatro pontos de controle para sua execução. Outro inconveniente é que ela mapeia planos em planos, sendo desaconselhável para a retificação de superfícies tridimensionais (um terreno, por exemplo). Para superfícies planas, ou aproximadamente planas (uma fachada “bem-comportada”, por exemplo), chega a apresentar melhores resultados finais do que a transformação afim.

7.2.3. Outras transformações

Em vez de utilizarmos a transformação afim, podemos escolher modelos menos completos (isto é, que modelam menos parâmetros, mas que exigem menos pontos de controle), facilitando o esforço computacional do ajustamento por mínimos quadrados. Como exemplos, citamos as transformações isogonal e ortogonal. Polinômios de maior ordem também podem ser empregados, mas se deve ter em mente que estes implicarão maior volume de cálculos e não-linearidade do modelo a ser ajustado.

7.2.4. Considerações sobre as transformações matemáticas apresentadas

As transformações já citadas são de uso e implementação relativamente simples. Porém, é claro que elas não modelam do modo mais eficaz possível o problema da retificação, uma vez que não têm como variáveis ou injunções os valores dos ângulos de rotação aos quais a câmara foi submetida.

Explica-se: no caso da retificação, é de interesse a eliminação (ou modificação) das distorções causadas por esses ângulos. Todavia, nessas transformações, eles não são modelados. O que se faz é uma correção aproximada deles. Assim, para uma retificação mais acurada, faz-se necessária a entrada de tais valores no ajustamento.

7.2.5. Equações de colinearidade

Nesse caso, utiliza-se o princípio da colinearidade, usado anteriormente (capítulo 5) para a orientação exterior e o ajustamento, mas com alguns coeficientes modificados, a fim de se adequar ao problema aqui proposto. As equações são as seguintes:

$$x_N = -f_N \frac{r_{11}x_p + r_{12}y_p - r_{13}f_p}{r_{31}x_p + r_{32}y_p - r_{33}f_p} \quad (7.8);$$

$$y_N = -f_N \frac{r_{21}x_p + r_{22}y_p - r_{23}f_p}{r_{31}x_p + r_{32}y_p - r_{33}f_p} \quad (7.9).$$

Na figura abaixo, encontram-se identificadas graficamente as variáveis envolvidas:

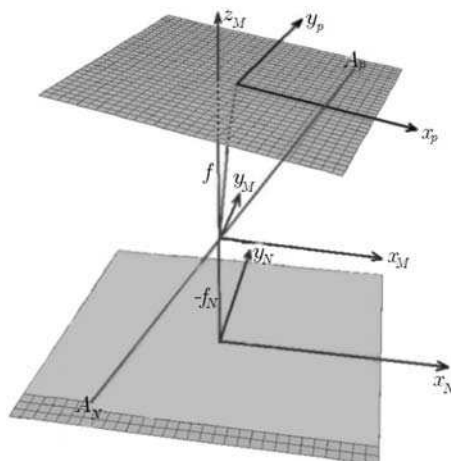


Figura 3: O princípio da colinearidade aplicado à retificação de imagens.

O sistema x_p , y_p e f_p pertence à imagem não-retificada: f_p é a distância focal calibrada da câmara com a qual ela foi obtida; x_p e y_p são as coordenadas do ponto principal da câmara no sistema das marcas fiduciais.

O sistema x_N , y_N e f_N equivale à imagem retificada, sendo em geral utilizado f_N igual a f_p ; no entanto, não há necessariamente de se seguir essa convenção.

Observa-se que, a cada ponto da imagem original, corresponde outro na imagem retificada. Os valores da matriz de rotação modelam as rotações entre os eixos. Em geral, são usados para esses valores os mesmos ângulos de atitude da câmara, a fim de eliminá-los na imagem final. Nada impede, entretanto, que sejam utilizados outros, com o objetivo de se criar uma imagem com inclinação específica ou inclinações específicas.

A partir daí, segue um ajustamento por mínimos quadrados, utilizando-se o método paramétrico não-linear, tendo, como resultados, os valores ajustados dos coeficientes de transformação entre os dois sistemas. Um problema, porém, continua a existir: embora seja modelada uma transformação em que x e y possam assumir valores reais, o espaço representado deve ser discreto (*pixels*). Assim, para exibir na imagem final a distribuição radiométrica mais adequada possível, diversos métodos de reamostragem dos níveis de cinza dos *pixels* são necessários. A seguir, serão vistos alguns deles.

7.3. Reamostragem

O grande problema da reamostragem encontra-se, como já dito, na determinação exata dos tons de cinza a serem destinados aos *pixels* da nova imagem. Como exemplo, um determinado *pixel*, que se encontra na coluna 430 e na linha 289, possui o nível de cinza igual a 17. De acordo com a transformação utilizada para executar a retificação, a posição equivalente do ponto (430; 289) na nova imagem deve ser (427, 35; 288, 78). A figura 4, na próxima página, demonstra graficamente a situação apresentada.

A imagem original acha-se com sua grade de *pixels* em cinza-claro. Já a nova imagem é representada pelo quadriculado cinza-escuro sobreposto. Essa representação gráfica mostra claramente o problema oriundo da transformação utilizada para retificar uma imagem e os inconvenientes decorrentes dos eventuais resultados a serem obtidos. Nesse caso, vê-se que o *pixel* assinalado de nível de cinza 17 da imagem original deve influenciar radiometricamente ao menos outros quatro da imagem retificada (colunas 427 e 428; linhas 288 e 289). A reamostragem faz-se necessária para que

os novos *pixels* tenham a cor que deveriam ter por estarem em tal posição. Vários métodos foram desenvolvidos para realizar essa correspondência. Os mais utilizados são: vizinho mais próximo, interpolação bilinear, *splines* bicúbicas e polinômio de Lagrange, conforme citado em Andrade (1998).

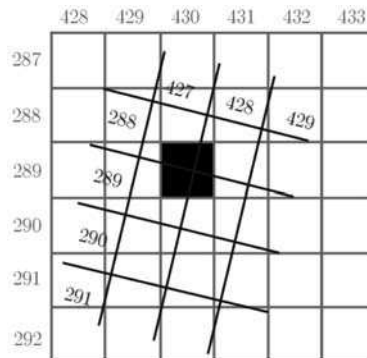


Figura 4: O problema da reamostragem – compatibilizar a radiometria da imagem original para uma nova distribuição de *pixels*.

7.3.1. Reamostragem por vizinho mais próximo

Esse método apenas atribui o valor do nível de cinza de determinado *pixel* da imagem reamostrada ao *pixel* da imagem original que estiver mais próximo. Trata-se, então, apenas de um arredondamento. Para o caso citado anteriormente, o *pixel* 427; 289, que é o arredondamento de 427, 35; 288, 78 da imagem final, receberá o nível de cinza (tonalidade) igual a 17. Esse método possui 0,5 *pixel* de erro, e isso leva a descontinuidades na imagem reamostrada. Algumas vantagens suas, segundo Novo (1992), são o rápido processamento e a fácil implementação. Além disso, essa reamostragem não altera os valores radiométricos da imagem original.

Andrade (1998) apresenta tal método na forma de equações, a fim de facilitar a pronta utilização em implementações computacionais:

$$A'(k, l) = A(i, j) \text{ para } dx < 0,5 \text{ e } dy < 0,5 \quad (7.10);$$

$$A'(k, l) = A(i + 1, j) \text{ para } dx \geq 0,5 \text{ e } dy < 0,5 \quad (7.11);$$

$$A'(k, l) = A(i, j + 1) \text{ para } dx < 0,5 \text{ e } dy \geq 0,5 \quad (7.12);$$

$$A'(k, l) = A(i + 1, j + 1) \text{ para } dx \geq 0,5 \text{ e } dy \geq 0,5 \quad (7.13).$$

A notação empregada (a ser adotada também nas equações para os outros métodos) é a seguinte: A' é o valor reamostrado do *pixel*; A é o valor do *pixel* na imagem original; dx e dy são os valores calculados, em números reais, das coordenadas definidoras da posição de um *pixel* (na imagem a ser reamostrada) e seus valores inteiros menores.

7.3.2. Reamostragem por interpolação bilinear

O valor do nível de cinza, nesse método, será determinado a partir dos quatro *pixels* da imagem inicial que são vizinhos a ele. Segundo Novo (1992), haverá uma maior precisão geométrica e o desaparecimento de discontinuidades. Entretanto, há de se considerar o maior processamento de cálculos e a alteração dos valores de níveis de cinza da imagem original. Segue a fórmula contida em Andrade (1998):

$$A(k, l) = A(i, j) + dx[A(i + 1, j) - A(i, j)] + dy[A(i, j + 1) - A(i, j)] + dx dy[A(i, j) - A(i + 1, j) - A(i, j + 1) + A(i + 1, j + 1)] \quad (7.14).$$

7.3.3. Reamostragem por métodos de vizinhança 4 x 4 *pixels*

Esses métodos apresentam um resultado de melhor visualização, incorrendo em menos erros de interpolação. Reclamam, porém, em situações muito mais complexas, uma vez que utilizam cálculos envolvendo os tons dos 16 *pixels* vizinhos e guardam a modificação da radiometria da imagem original.

Andrade (1998) apresenta as formulações para os métodos de *splines* bicúbicas e polinômio de Lagrange. Elas estão transcritas a seguir. Para as *splines* bicúbicas, define-se uma função $df(x)$:

$$\begin{aligned} df(x) &= |x|^3 - 2|x|^2 + 1, \text{ se } |x| < 1 \\ df(x) &= -|x|^3 + 5|x|^2 - 8|x| + 4, \text{ se } 1 \leq |x| < 2 \\ df(x) &= 0, \text{ se } |x| \geq 2 \end{aligned} \quad (7.15).$$

E outra função $a(n)$:

$$a(n) = df(dx + 1) \times A(i - 1, j + n - 2) + A(i, j + n - 2) \times df(dx) + A(i + 1, j + n - 2) \times df(dx - 1) + A(i + 2, j + n - 2) \times df(dx - 2) \quad (7.16).$$

Por fim, $A'(k, l)$ equivale a:

$$A'(k, l) = a(1)df(dy + 1) + a(2)df(dy) + a(3)df(dy - 1) + a(4)df(dy - 2) \quad (7.17).$$

Para o polinômio de Lagrange:

$$\begin{aligned}
 a(n) = & A(i-1, j+n-2) \times (dx-1) \times (dx-2) \times \frac{dx}{-6} + \\
 & + A(i, j+n-2) \times (dx+1) \times (dx-1) \times \frac{dx-2}{2} + \\
 & + A(i+1, j+n-2) \times (dx+1) \times (dx-2) \times \frac{dx}{-2} + \\
 & + A(i+2, j+n-2) \times (dx+1) \times (dy-2) \times \frac{dy}{6}
 \end{aligned} \quad (7.18);$$

$$\begin{aligned}
 A(k, l) = & a(1) \times (dy-1) \times (dy-2) \times \frac{dy}{-6} + \\
 & + a(2) \times (dy+1) \times (dy-1) \times \frac{dy-2}{2} + \\
 & + a(3) \times (dy+1) \times (dy-2) \times \frac{dy}{-2} + \\
 & + a(4) \times (dy+1) \times (dy-1) \times \frac{dy}{6}
 \end{aligned} \quad (7.19).$$

Stucki (1979), apud Andrade (1998), apresenta um quadro comparativo sobre os erros e o número de operações matemáticas envolvidos nos quatro processos apresentados. Essas informações estão contidas na tabela abaixo:

Tabela 1: Métodos de reamostragem.

Método	Vizinhança	Operações de adição e multiplicação	Erros de interpolação
Vizinho mais próximo	1×1	1	15,70%
Interpolação bilinear	2×2	8	3,70%
<i>Splines</i> bicúbicas	4×4	110	0,30%
Polinômio de Lagrange	4×4	80	Quase 0

7.4. Normalização de imagens

Outro processo extremamente útil é a normalização de imagens. Diferentemente da retificação – feita imagem a imagem –, a normalização é “orientada” ao par estereoscópico, mas sem se restringir à área de superposição das imagens.

O objetivo principal da normalização é gerar um novo par de imagens digitais que se adapte à chamada geometria epipolar. Normalmente, um par estereoscópico não está adequado a essa condição geométrica.

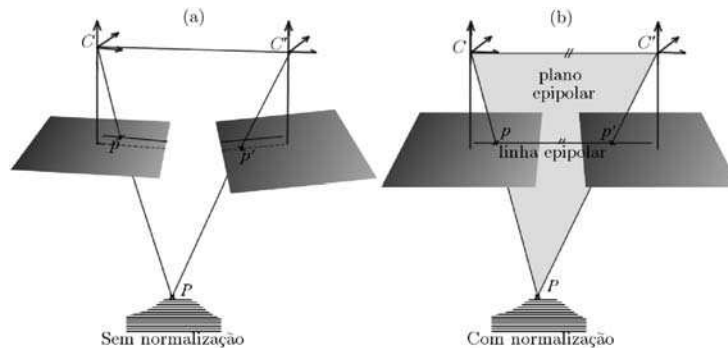


Figura 5: Um par estereoscópico antes e depois da normalização.

As imagens estão eivadas de ângulos de rotação diferentes, além de aparecerem deslocadas em Y e Z . Como visto na figura 5(a), embora as linhas que se originam dos centros perspectivos – passando pelos pontos p e p' – se encontrem no ponto P (no terreno), não se pode dizer que C' , C , p' , p e P estejam em um mesmo plano. Da mesma forma, observa-se que p e p' não se encontram na mesma linha em cada uma das imagens. Isso dificultaria bastante a situação caso fosse realizado um processo de correlação automática, uma vez que a janela de procura na segunda imagem deveria ser muito grande, ampliando o tempo de processamento. Some-se a isso o não-paralelismo entre a linha que une os dois centros de perspectiva e os sistemas de coordenadas (x, y, z) de cada um dos centros de perspectiva.

A geometria epipolar é materializada pela presença de um plano epipolar e de linhas epipolares. O plano epipolar é definido pelos dois centros de perspectiva das imagens e por um ponto no espaço-objeto (P), como visto na figura 5(b). As linhas epipolares são as interseções do plano epipolar com os planos das imagens normalizadas. Uma linha epipolar está representada na mesma figura.

Dessa forma, normalizar um estereopar é torná-lo compatível com a geometria epipolar, seguindo então a configuração demonstrada na figura 3; p. 147. Pode-se ver que, para um par normalizado, C' , C , p' , p e P estão em um mesmo plano; os pontos p e p' estão na mesma linha tanto na imagem direita quanto na esquerda. As linhas epipolares encontram-se paralelas aos sistemas de coordenadas centrados nos centros de perspectiva. Uma situação ideal como essa permite muito mais facilmente a execução de algoritmos de localização automática de pontos homólogos, uma vez que ambos devem estar em uma mesma linha, diminuindo a área de procura na segunda imagem.

Para adequar um par à geometria epipolar, faz-se necessário eliminar todos os ângulos de atitude da aeronave (convém lembrar que, para a reti-

ficação, apenas ϕ e ω obrigatoriamente deveriam ser minimizados). Além disso, os componentes de base B_Y e B_Z do par também devem ser eliminados, para que ambas as imagens estejam em uma mesma altura e com seus pontos homólogos em uma mesma linha (linha epipolar). É importante dizer que B_X não é eliminado. Eliminar B_X (base fotogramétrica) seria equivalente ao ato de colocar uma imagem sobre a outra, impossibilitando a chance de se tirar proveito das condições geométricas advindas do princípio da colinearidade e da geometria epipolar. Por isso, apenas a distância em X relativa entre uma imagem e a outra deve ser mantida.

Caso ainda seja necessário, uma rotação adicional pode ser executada, a fim de otimizar a reamostragem para a geometria epipolar. O produto final, embora dotado de uma rigidez geométrica muito boa, ainda não elimina o deslocamento devido ao relevo (como já dito, apenas a ortorretificação é capaz de realizar tal tarefa).

7.4.1. Modelo matemático

O processo da normalização envolve um modelo matemático que pode ser melhor representado matricialmente. Sucintamente, a equação da normalização pode ser representada por:

$$R_N = R_B \cdot R^T \quad (7.20).$$

Nesse caso, R_B equivale a $R_\Omega R_\phi R_\kappa$ (não se deve confundir com R , que é a matriz de rotação $R = R_\phi R_\omega R_\kappa$).

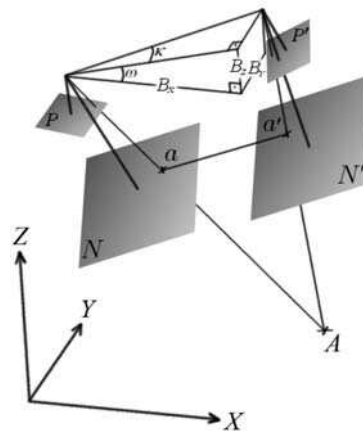


Figura 6: Um par estereoscópico normalizado e seus correspondentes não-normalizados, referenciados a um sistema cartesiano (adaptado de ASPRS, 1997).

Na figura 6, ficam mais bem evidenciadas as relações matemáticas entre os componentes de base do par estereoscópico. Com elas, pode-se calcular R_{Ω} , até então desconhecido.

Notemos os triângulos retângulos na parte superior da figura. Seus lados são paralelos aos eixos do sistema cartesiano e representam os componentes de base B_X , B_Y e B_Z (ou seja, a diferença entre X' e X , Y' e Y , Z' e Z). Os ângulos relativos κ e ω também estão representados.

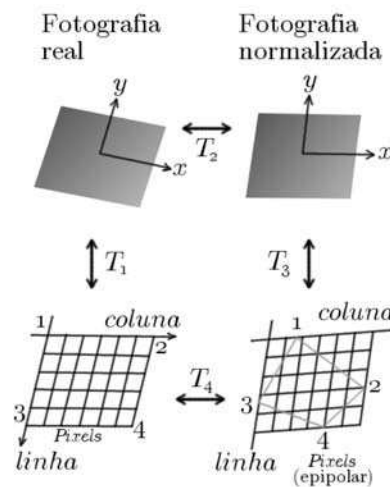


Figura 7: Proposta de algoritmo de Schenk-Choo (adaptado de Choo, Schenk e Madani, 1992).

Por relações trigonométricas:

$$K = \arctan \left(\frac{B_Y}{B_X} \right) \quad (7.21);$$

$$\Phi = - \arctan \left(\frac{B_Z}{\sqrt{B_X^2 + B_Y^2}} \right) \quad (7.22).$$

Nesse caso, Ω será igual à média aritmética entre ω_1 e ω_2 :

$$\Omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad (7.23).$$

Como exemplo de reamostragem por geometria epipolar, citamos o algoritmo de Schenk-Choo, que se constitui em uma transformação do tipo:

$$T_4 = T_3 (T_2 (T_1 (\text{linha}_i, \text{coluna}_j) [\text{epipolar}]))) \quad (7.24).$$

Cada uma dessas transformações tem seu significado, a saber:

T_1 : transformação entre as imagens digital e analógica correspondentes;

T_2 : normalização da imagem analógica (retificação aliada à eliminação dos componentes de base);

T_3 : definição do sistema de coordenadas para a imagem epipolar;

T_4 : transformação entre a imagem epipolar vazia e a imagem digital original para a reamostragem dos níveis de cinza (o algoritmo parte de uma imagem em branco e sobre ela executa a reamostragem).

A figura 7, na página anterior, mostra graficamente esse conjunto de operações.

7.5. Considerações finais

A retificação – eliminação das distorções causadas pelos ângulos de atitude da câmara – e a normalização – eliminação dos ângulos e componentes de base B_Y e B_Z – de imagens permitem a preparação das imagens propriamente ditas para a execução de outras tarefas fotogramétricas. Pode-se dizer, ainda, que este capítulo marca o fim das tarefas de preparação das imagens para a extração de informações. A partir daí, todas as tarefas gerarão produtos-fim da fotogrametria, tais como: Modelo Numérico de Elevações (MNE), Modelo Digital do Terreno (MDT), originais de restituição fotogramétrica, fotocartas, ortoimagens e ortofotocartas.

Outro fato a ser ressaltado quanto à normalização de imagens é a aplicação destinada primariamente à extração semi-automática de MDTs (objeto de análise mais aprofundada no capítulo a seguir). Isso, no entanto, não impossibilita a utilização de pares normalizados, por exemplo, em outras aplicações. Os próprios MDTs também podem ser gerados de forma semi-automática ou manual, a partir de pares não-normalizados – e ainda o são com frequência. Assim, em caso de economia orçamentária ou de tempo, essa etapa pode ser descartada sem maiores prejuízos à linha de produção cartográfica.

A retificação já possuiu maior relevância na época da fotogrametria analógica e analítica; hoje em dia, porém, com a maior facilidade na produção de ortoimagens e ortomosaicos, a retificação pura e simples não tem sido tão empregada, podendo, até mesmo, não ser efetuada caso não haja necessidade de uso. Reserva-se a ela sobretudo a utilização em fotogrametria com fotos oblíquas, para curtas distâncias, ou com câmaras não-métricas.



Capítulo 8

Geração de modelos numéricos de elevações

8.1. Conceito inicial

A modelagem digital do terreno é um conceito relativamente novo. As pesquisas iniciais nessa área são creditadas ao professor Charles L. Miller, do Massachusetts Institute of Technology (MIT). Têm como objetivo principal a execução de projetos de estradas auxiliados por computação. Nesse caso, eram criados modelos altimétricos do terreno a partir de pontos de altitudes obtidas por métodos fotogramétricos, espaçados a intervalos regulares.

Atualmente, o conceito de mapeamento envolve a idéia de modelos digitais de superfícies, em particular a do relevo terrestre, e não mais apenas o traçado de curvas de nível analógicas sobre uma base de poliéster. O Modelo Digital de Superfícies (MDS) pode ser definido como qualquer representação numérica para uma determinada superfície física do terreno (relevo, por exemplo) a ser representada (Brito, Prado e Augusto, 1999).

Desse modo, um MDS pode expressar vários tipos de atributos: temperatura, pressão e declividade, além, é claro, da altitude. Quando um MDS exprime altitudes, chama-se Modelo Numérico de Elevações (MNE) ou Modelo Digital de Elevações (MDE ou DEM, *Digital Elevation Model*). Os processos fotogramétricos extraem, geralmente, altitudes ou alturas. Por isso, neste capítulo, será tratada a extração de MNEs:

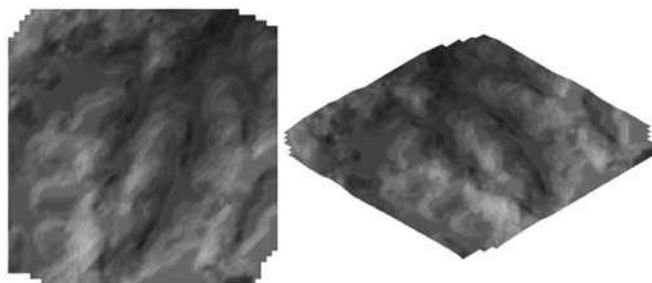


Figura 1: MNE (vista de topo e em perspectiva isométrica).

8.2. Aquisição de dados para MNEs

Existem várias fontes de dados para se obter as altitudes para a elaboração de um MNE. Um dos primeiros métodos adotados era a digitação das coordenadas de determinados pontos, obtidos por inspeção na carta ou provenientes da fototriangulação. Obviamente, como se tratava de uma abordagem pouco prática e passível de erros, não se popularizou.

Outro método, ainda hoje utilizado, é a digitalização de cartas em papel através de mesa digitalizadora (figura 2). Esse aparelho possui um transdutor, com um cursor, que transfere as coordenadas planimétricas do mapa que está sobre a superfície da mesa. Percorrendo uma curva de nível com o cursor, obtemos as coordenadas planimétricas de pontos situados sobre a curva. Assim, um documento cartográfico analógico pode ser digitalizado a partir desses procedimentos.

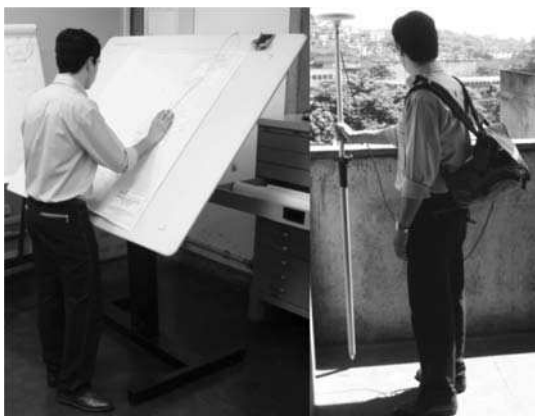


Figura 2: Mesa digitalizadora (à esquerda) e rastreamento por GPS (à direita).

Hoje em dia, um terceiro método tem sido bastante empregado: a aquisição de dados via GPS em método cinemático ou semicinemático (figura 2). Percorre-se o terreno com a antena portátil, ligada a um coletor de feições, e, ao fim, descarregam-se os dados para seu pós-processamento. Esse método é aplicável apenas em pequenas extensões de terreno. Apesar disso, tem sido empregado em extensões maiores, na grande parte dos casos por desconhecimento dos métodos fotogramétricos, muito mais práticos e rápidos.

O último dos métodos de geração de MNEs é o de extração fotogramétrica digital. Seguramente o mais prático, pode ser realizado em boa parte dentro de gabinete, sendo justificável a ida a campo apenas para coleta de pontos de controle e/ou de teste.

Os dados podem ser adquiridos de várias maneiras: dispersa, semi-regular ou regular:

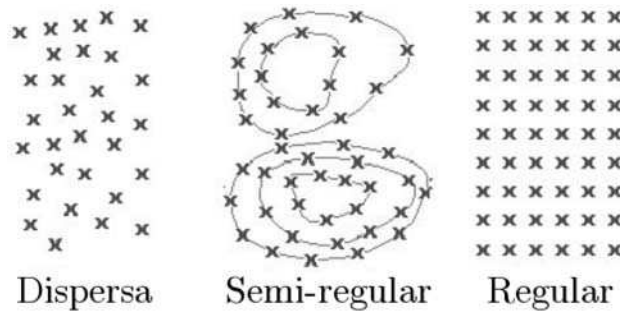


Figura 3: Formas de aquisição.

A forma dispersa não segue ordem de aquisição. Os pontos são adquiridos livremente no espaço a ser representado no MNE.

A semi-regular segue algum arranjo específico, sem, no entanto, possuir espaçamento constante entre os pontos. Exemplos de aquisição semi-regular podem ser a coleta de curvas de nível via mesa digitalizadora ou a coleta de pontos de um sistema viário por GPS.

Já a forma regular é aquela em que todos os pontos estão igualmente espaçados em X e Y . Só pode ser conseguida por meio de métodos de fotogrametria analítica ou digital. Sua maior importância reside no fato de que as altitudes dos pontos já arranjados são obtidas em forma de grade regular.

8.3. Tipos de grade de um MDT

Antes de seguirmos com a descrição da aquisição por métodos fotogramétricos, convém descrever os dois principais tipos de grade utilizados em MDT:

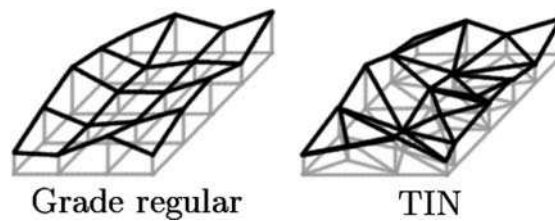


Figura 4: Tipos de grade em MDT.

A grade regular pode ser obtida por aquisição regular ou interpolação. Sua principal vantagem é o fato de, dado seu arranjo regular, poder ser armazenada e representada sem maior esforço computacional. No entanto, como em geral advém de interpolação, perde a precisão dos pontos originais. A grade regular também não permite a inserção de linhas de quebra (*breaklines*), o que impede que certas feições descontínuas (como rios, estradas etc.) sejam representadas fielmente.

A rede de triangulação irregular (*Triangular Irregular Network* – TIN) é composta pelos pontos originais, ligados três a três, formando triângulos irregulares, mas com propriedades matemáticas bem definidas.

O modo como se ligam os pontos é determinado por um algoritmo chamado triangulação de Delaunay, que conecta um ponto apenas a seus vizinhos (o conceito de vizinhança está intrinsecamente ligado ao próprio algoritmo, fugindo do escopo deste texto). Cabe aqui ressaltar que os triângulos são formados tão próximos quanto possível de triângulos equiláteros.

Um exemplo real de terreno visualizado em grade regular e em TIN pode ser visto a seguir:

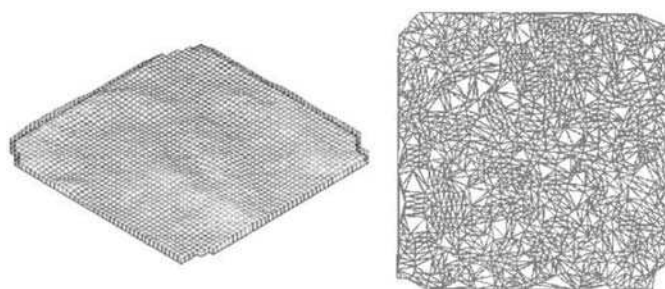


Figura 5: Grade regular em vista isométrica (à esquerda) e TIN em vista de topo (à direita).

8.4. Extração fotogramétrica de um MNE

A maior parte dos métodos empregados na extração do modelo de elevações já é conhecida e foi descrita nos capítulos anteriores. Resta apenas enunciar a seqüência de passos a serem seguidos, bem como os principais problemas envolvidos nesse processo e as estratégias diferenciadas para variadas situações.

Primeiramente, as imagens devem ser convertidas para o meio digital, a fim de realizar uma conversão do sistema digital para o sistema de câmara; a tarefa seguinte deve ser a orientação interior da imagem (capítulo 4).

Uma vez concluída a orientação interior, faz-se a orientação exterior, por ressecção espacial (capítulo 5) ou pelos métodos convencionais de paralaxe, realizando-se separadamente a orientação relativa e a absoluta. O importante, ao fim dessa etapa, é obter os parâmetros da orientação exterior, ou seja, a posição tridimensional do centro de perspectiva e os ângulos de atitude da câmara em cada uma das imagens adquiridas.

A tarefa seguinte não é obrigatória; porém, para o caso de extração automática, é desejável: trata-se da normalização do par estereoscópico (capítulo 7). Essa operação otimiza o algoritmo de localização automática de pontos homólogos, os quais devem situar-se sobre uma mesma linha epipolar. Assim, a janela de procura pode ser bastante reduzida. A figura abaixo ilustra esse caso:

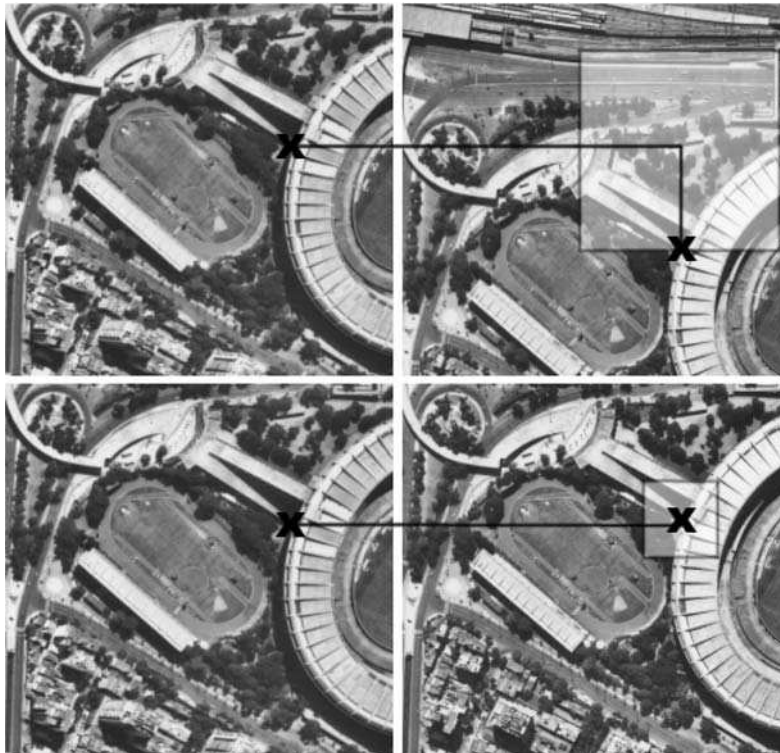


Figura 6: Vantagem da normalização do estereopar – como os pontos homólogos localizam-se na mesma linha epipolar, a janela de procura é bem menor, permitindo a localização automática de pontos homólogos com tempo de cálculo consideravelmente menor (as fotografias aéreas retratam o bairro do Maracanã, no Rio de Janeiro; em destaque, o estádio do Maracanã e a pista de atletismo Célio de Barros; cortesia do Instituto Pereira Passos, da Prefeitura do Rio de Janeiro).

Depois disso, dá-se a extração dos pontos tridimensionais propriamente ditos. Nas formas dispersa e semi-regular, o usuário – caso disponha de um sistema de visão estereoscópica – localiza os pontos homólogos e, a partir daí, faz-se a extração manual.

No caso da extração semi-automática, os pontos homólogos são localizados por correlação (capítulo 3). A partir de um ponto no terreno, sabendo-se a sobreposição entre as imagens, define-se uma janela de procura na imagem conjugada. Essa janela será bastante reduzida, pois as imagens foram normalizadas (figura 6). Encontrando-se o homólogo, segue-se com o processo repetindo-se a localização dos pontos, dado um espaçamento predefinido pelo operador.

Após ter a grade de homólogos identificada, segue-se corrigindo os lugares onde a correlação não funcionou (ex.: áreas de oclusão, sombras, paralaxe de objetos altos). Findas essas correções, realiza-se a interseção espacial (capítulo 5) em cada um deles, chegando-se, ao final, às coordenadas tridimensionais para um conjunto de pontos, arranjados em grade (regularmente).

Por fim, caso se queira inserir linhas de quebra, estas podem ser restituídas seguindo-se a forma de aquisição semi-regular já descrita anteriormente. Pesquisas têm sido conduzidas com o objetivo de se reconhecerem automaticamente determinadas feições que seguem certa simetria (como nuvens, estradas, prédios, rios e outros tipos de acidentes naturais e obras de edificação), mas ainda não trouxeram soluções totalmente automáticas, de eficácia comprovada.

8.5. Problemas na extração automática do MNE

Um problema que surge de imediato é a definição do espaçamento dos pontos da grade – assim como a direção que esta deve seguir. Esse espaçamento deve ser definido previamente, seguindo os parâmetros delimitados para o projeto, como escala, resolução geométrica da imagem, parâmetros de qualidade do MNE gerado e o tipo de terreno. Terrenos planos não exigem uma densidade muito grande de pontos. Já terrenos acidentados precisam de um número de pontos tão grande quanto possível.

Uma estratégia para terrenos heterogêneos, isto é, que possuem áreas planas, onduladas e acidentadas ao mesmo tempo, é a sua divisão em várias áreas homogêneas, a extração dos respectivos modelos (cada qual seguindo a densidade de pontos mais adequada para a área em questão) e a junção posterior dos mesmos, que pode ser realizada por meio de *software* especí-

fico. Muito elegante, essa solução maximiza a acurácia e a precisão do modelo gerado e minimiza o espaço em disco que este ocupará.

Outro grande problema envolve as áreas onde a correlação falha (já citadas no tópico anterior). Nesse caso, a única solução cabível é a mencionada “extração manual”.

8.6. Considerações finais

A modelagem digital do terreno é um campo do conhecimento que cresceu bastante nos últimos tempos. Suas aplicações nas áreas que exigem uma visualização tridimensional do terreno são cada vez mais exigidas e bem aproveitadas. Em consequência disso, refinam-se os métodos fotogramétricos de extração de MNEs. Desconsiderando tecnologias recentes e pouco utilizadas (radares aerotransportados e *laser-scanning*, por exemplo), a modelagem digital é a que demanda menor trabalho de campo e, obviamente, menor esforço logístico.

Os algoritmos empregados para a determinação das altitudes não são novos para o leitor que vem acompanhando os capítulos anteriores; no entanto, na extração de MNEs, a metodologia de uso dos mesmos segue um modelo diferente, totalmente voltado a esta atividade. Isso justifica a abordagem aqui descrita, pois cada vez mais a fotogrametria encaminha-se para a produção de ortoimagens e ortofotocartas – as quais exigem MNEs para serem feitas. Estas serão examinadas mais a fundo no próximo capítulo.



Capítulo 9

Geração de ortoimagens

9.1. Conceito inicial

Com os conceitos até aqui apresentados, o nome *ortoimagem* traz à tona uma definição simples para o tema “imagens em perspectiva ortogonal”. As imagens adquiridas por câmaras convencionais encontram-se em perspectiva central, com os inúmeros raios de luz advindos de diferentes pontos imageados, passando por um só ponto (centro de perspectiva), localizado no sistema óptico da câmara (figura 1). O conjunto desses raios é chamado feixe perspectivo.

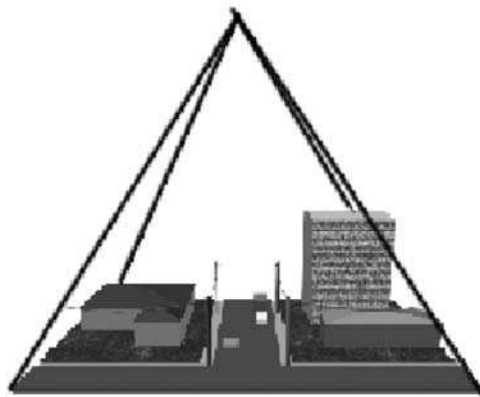


Figura 1: Princípio dos feixes perspectivos, que guia a projeção central.

Obviamente, uma imagem em perspectiva central (figura 2) não pode ser tomada como fonte de informação métrica segura, uma vez que possui erros devido à rotação do sensor e deslocamentos devido ao relevo, inerentes à perspectiva cônica.

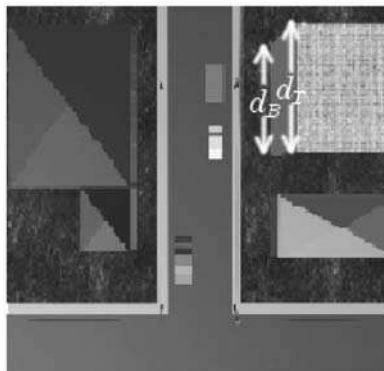


Figura 2: Imagem da região obtida na figura 1.

Deve-se notar a diferença entre as distâncias de um lado do edifício medidas na base (d_B) ou no topo (d_T), que, na verdade, são iguais.

Em uma projeção ortogonal, raios ortogonais são projetados a partir da região imageada (figura 3). Os raios nunca se encontram, e a imagem final em um sistema como esse não possui desvios nem distorções relativos ao relevo.

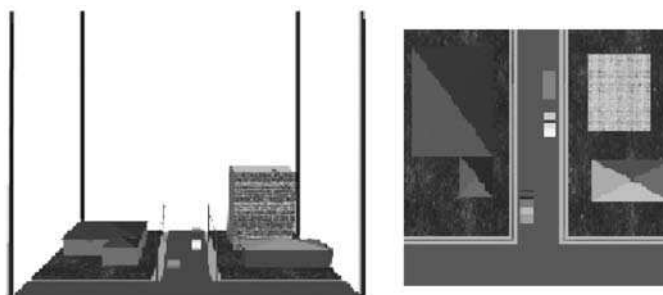


Figura 3: Projeção ortogonal e imagem advinda de um sistema hipotético capaz de registrar tal tipo de perspectiva.

A imagem em projeção ortogonal, ao contrário da projeção central, pode ser tomada como um documento cartográfico e empregada em qualquer atividade que demande um mapa, carta ou fonte de dados similar. A perspectiva central, porém, não é ruim. Há de se desfazer a impressão de que é um obstáculo, em virtude da impossibilidade de se usar imagens isoladas como fontes de dados espaciais. Por exemplo, é a imagem de perspectiva cônica que traz certas noções básicas de que o fotogrametrista irá dispor, como proximidade e distância de objetos, paralaxe, luz, sombras (figuras 4, 5 e 6) e estereoscopia.

A perspectiva central está presente nos fenômenos ópticos que regem o mundo real, uma vez que o olho humano, as fontes de luz e as câmaras fotográficas podem ser tomados como centros para diversos feixes que deles partem. As figuras 4 e 5 ilustram o problema ora abordado.

A perspectiva ortogonal é um fenômeno artificial. Assim, para obter ortoimagens, faz-se necessário realizar uma transformação sobre as imagens já existentes (em perspectiva central), chamada ortorretificação. Os primeiros aparelhos capazes de realizar tal operação eram chamados ortoprojetores – aparelhos óptico-mecânicos que possuíam a capacidade de aproximar ou afastar a fotografia de acordo com a aproximação ou o afastamento da marca flutuante em relação ao terreno estereoscopicamente construído. No momento em que a marca estava posicionada, “tocando” determinado trecho do terreno, o operador acionava o disparo de um sistema fotográfico que registrava a imagem de um pequeno trecho relativo ao ponto alcançado pela marca e que tinha determinado o afastamento ou a aproximação da fotografia. A junção das imagens desses pequenos trechos formava a ortofoto. Obviamente, era um processo muito demorado e caro. Isso o tornava extremamente restrito a casos de maior necessidade.



Figura 4: Nessa imagem, é possível perceber o fenômeno da perspectiva central.

As distâncias entre prédios opostos dos dois lados da rua, que são iguais, aparecem menores na fotografia à medida que os alvos se afastam da câmara (a fotografia retrata a Rua Augusta, no centro de Lisboa).



Figura 5: Aqui é possível perceber que objetos de mesmo tamanho, como os postes da esquerda, quanto mais distantes estiverem do centro de perspectiva da câmara, menores aparecem na imagem final (na fotografia, o Cais da Ribeira, da cidade do Porto).



Figura 6: Em virtude da iluminação oblíqua dos raios de sol, os objetos produzem sombras, que podem se tornar desagradáveis por cobrirem parte relevante da fotografia (essa fotografia aérea é cortesia do Instituto Pereira Passos, da Prefeitura do Rio de Janeiro, e mostra o pavilhão Reitor João Lyra Filho, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, e parte do bairro de Vila Isabel).

Em fotogrametria digital, a ortorretificação é realizada por meio de transformações sobre números digitais dos inúmeros *pixels* das imagens de origem e ortorretificadas. Essa transformação será melhor detalhada no tópico a seguir.

Por fim, após esta breve introdução sobre a ortorretificação, podem surgir dúvidas quanto à diferença entre ortorretificação e retificação (capítulo 7). A primeira é “um passo a mais”; além de retirar as distorções relativas à rotação da câmara (como já é feito pela retificação), elimina a distorção relativa ao relevo (através da transformação da perspectiva cônica em ortogonal). É aí que reside a importância das ortoimagens, pois, em bases de dados para o Sistema de Informações Geográficas (SIG) e documentos cartográficos analógicos e digitais, as imagens retificadas não se mostram uma opção adequada; continuam em perspectiva central, ainda que se trate de um par normalizado e reamostrado por geometria epipolar.

9.2. Modelos matemáticos

Há três modelos empregados para a ortorretificação. Os dois primeiros foram mais bem explicados no capítulo que trata da retificação e normalização de imagens: a transformação afim (modelos do tipo polinomial também cabem nesse caso) e a projetiva. O outro método ainda não abordado aqui é, contudo, o mais empregado: a retificação diferencial.

9.2.1. Transformação afim

Segue exatamente a mesma formulação apresentada no capítulo 7. É empregada quando o centro de perspectiva está bem longe do terreno imageado (ex.: imagens orbitais de média ou baixa resolução). É um método aproximado.

Vale ressaltar que esse método é uma retificação simples que, quando aplicada a imagens em condições extremas de relação base/altura (valores muito baixos), se aproxima dos efeitos de uma ortorretificação. Isso se explica pelo fato de que, nessas condições, o deslocamento devido ao relevo é quase imperceptível.

9.2.2. Transformação projetiva

Usa a mesma formulação abordada no capítulo 7 e deve ser empregada quando se trata de uma região bastante plana (figura 7), como a fachada de uma edificação ou um campo de futebol. É um método aproximado.

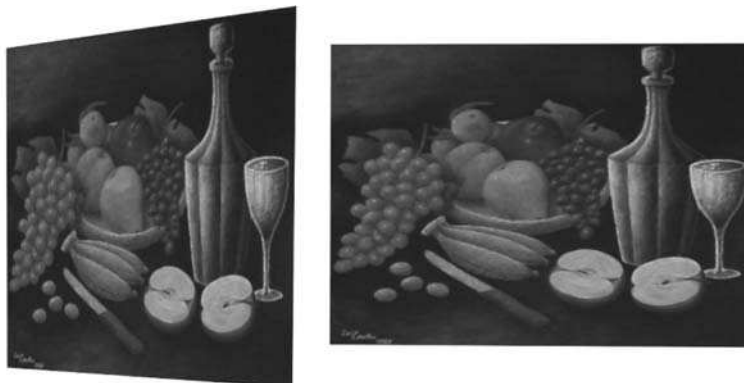


Figura 7: Exemplo de transformação projetiva – a pintura à esquerda (já recortada de sua moldura) foi retificada segundo o método projetivo, dando origem à imagem da direita. Como a tela é praticamente plana, pode-se dizer que essa retificação equivale a uma ortorretificação.

9.2.3. Retificação diferencial

É o método mais genérico e por ele são obtidos os melhores resultados. Seu objetivo é gerar uma nova imagem digital em perspectiva ortogonal, através da reconstrução dos feixes perspectivos.

Para realizá-la, primeiramente se define uma *ortomatriz vazia* sobre o terreno. Essa ortomatriz é associada a uma imagem digital “em branco”, com *pixels* cujas dimensões são da ordem do elemento de resolução do terreno (ou seja, o “tamanho real” equivalente a um *pixel*).

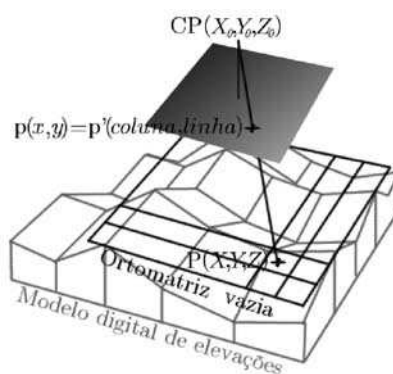


Figura 8: Processo de ortorretificação por meio de retificação diferencial.

Em seguida, são determinadas as coordenadas tridimensionais conhecidas do centro de cada *pixel* da ortomatriz vazia. Para isso, é indispensável

o conhecimento do MNE. A partir dessas coordenadas, por meio das equações de colinearidade (parâmetros da orientação exterior conhecidos), são definidas as coordenadas no espaço-imagem para aquele ponto. Através dos parâmetros da orientação interior, chega-se ao *pixel* correspondente e, conseqüentemente, ao seu nível de cinza (ou de cor). Essa tonalidade é, então, reamostrada na imagem vazia. Os procedimentos são mais bem esquematizados na figura 8, na página anterior.

9.3. Fontes de erro em ortoimagens digitais

As ortoimagens são passíveis dos mesmos erros encontrados nas cartas restituídas pelos métodos fotogramétricos convencionais. Entre eles, podem ser citados os problemas relacionados à má determinação do plano de vôo e à má resolução dos sistemas fotográficos e/ou das imagens digitais ou digitalizadas, o que diminui a resolução geométrica do espaço-imagem.

Ainda relacionada à imagem digital, outra provável fonte de erros é a má reamostragem dos níveis de cinza, tanto durante a digitalização/obtenção da imagem digital quanto durante a ortoretificação digital. No pior dos casos (reamostragem por vizinho mais próximo), o erro é da ordem de 0,5 *pixel*.

Há outros erros relacionados à imagem digital, como os ocorridos na ampliação e na compressão (o caso mais comum é o de arquivos JPEG e TIFF). Entretanto, o único tipo de erro que é exclusivo das ortoimagens e, em geral, incorre em maiores problemas é a incompatibilidade entre o MNE empregado e a realidade do terreno:

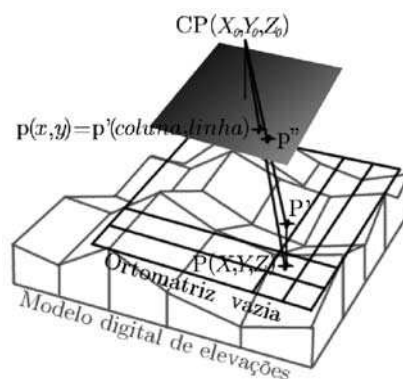


Figura 9: Efeito do deslocamento de um ponto em função da imprecisão no modelo de elevações.

Isso ocorre principalmente quando o MNE é extraído a partir do solo exposto, sem levar em conta os acidentes artificiais. Estes, durante a

ortorretificação, ficarão inegavelmente distorcidos. Em outra hipótese, o MNE pode ter sido adquirido realmente com erros, e todos os acidentes (naturais e artificiais) na área com problemas serão afetados. Por fim, MNEs com espaçamento de grade maior do que a resolução da ortoimagem digital obviamente causarão degradação da precisão do produto final.

Informações detalhadas sobre as fontes de erro em ortoimagens digitais e na influência na precisão de ortoimagens são apresentadas por Brito (1997).

9.4. Produtos derivados

A partir da ortorretificação, alguns produtos podem ser confeccionados. O primeiro e mais simples é a ortoimagem em si. Embora ela esteja corrigida de todo tipo de distorção, fica muito difícil para o usuário final aproveitar essa informação. Isso leva a outras alternativas, apresentadas a seguir.

Outra hipótese é mesclar a imagem ortorretificada a uma carta digital. O produto final é chamado ortofotocarta ou carta-ortoimagem e apresenta as feições que se quer ressaltar desenhadas sobre a imagem.

Em última instância, pode-se até mesmo usar a ortoimagem para, sobre ela, restituir uma carta completa da região imageada. Hoje em dia, dados a facilidade de se produzirem ortoimagens e o imenso número de pacotes que realizam tal tarefa, esse método de restituição se popularizou, pois dispensa a visualização estereoscópica (os vetores são traçados diretamente sobre a ortoimagem), o que permite sua realização em computadores comuns. Todavia, ele se restringe às feições planimétricas, sendo denominado *monorrestituição* ou *restituição monoscópica*.

9.5. Considerações finais

Entre os diferentes processos que a fotogrametria pode oferecer à obtenção de informação espacial, a ortorretificação ganha especial destaque por estar sendo utilizada de forma cada vez mais intensiva nos últimos tempos. Com isso, seu estudo reveste-se de grande importância.

Para os eventuais usuários e produtores de ortoimagens e produtos derivados, os seguintes pontos devem ser bastante explicitados: a ortoimagem não possui distorções devido ao relevo, tampouco rotações devido à inclinação da câmara no momento da tomada das imagens originais; mas a ortoimagem por si só não é uma substituta para a carta, visto que esta já está devidamente traduzida para um código mais compreensível, enquanto aquela possui informação excessiva e não-traduzida.

A qualidade do MNE utilizado também influi diretamente na ortoimagem final. Assim, caso não haja MNE de resolução compatível com a ortoimagem a ser gerada, é melhor utilizar os métodos mais convencionais de restituição, a serem aprofundados no capítulo seguinte.



Capítulo 10

Restituição fotogramétrica digital

10.1. Revisão de conceitos

Até este ponto foram estudados diversos métodos e processos de orientação e/ou extração de dados a partir de imagens digitais. A restituição fotogramétrica digital pode ser considerada o ápice desse processo. Neste momento, pode-se dizer que não há mais muitos conceitos a serem apresentados. Entretanto, a fim de fundamentar a base desta “pirâmide do conhecimento”, convém lembrar alguns pontos importantes que podem ter passado despercebidos aos olhos do leitor:

- as *imagens* para a fotogrametria digital podem ser adquiridas diretamente no formato digital ou em formato analógico, sendo, nessa hipótese, digitalizadas em aparelhos digitalizadores matriciais ou *scanners*;
- a orientação *interior* reconstrói a posição dos feixes perspectivos em relação à câmara no momento da tomada da foto (figura 1). Para materializar esse efeito, são calculados os parâmetros que relacionam o sistema de coordenadas de imagem digital (*pixels*) em um sistema característico de cada câmara, dado pelos parâmetros do certificado de calibração. Simplificadamente, pode-se afirmar que a imagem digital, que estava “solta” (não-referenciada), é atrelada à posição que exercia dentro da câmara quando foi obtida;

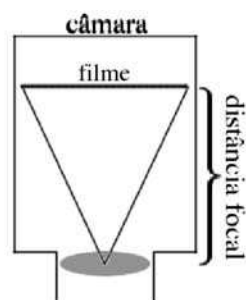


Figura 1: Orientação interior.

- a orientação *exterior* relacionará o sistema de câmara (reconstruído na orientação interior) ao sistema de coordenadas de terreno (espaço-objeto) naquele instante (figura 2), por meio da determinação dos seis parâmetros que regem a posição do centro de perspectiva na tomada da foto – posição tridimensional e rotações nos três eixos (*ressecção espacial*). Isso quer dizer que, agora, é conhecida a posição da imagem em relação à câmara (espaço-imagem) e em relação ao terreno (espaço-objeto). Com o conhecimento desses parâmetros, podemos deduzir as coordenadas, no espaço-objeto, de qualquer ponto representado no espaço-imagem (objetivo da fotogrametria), por meio das equações de colinearidade, que consideram as coordenadas do ponto no espaço-objeto incógnitas (*intersecção espacial*). Há de se observar que, visando às convenções das eras analógica e analítica, essa orientação encontra-se dividida em duas etapas – relativa (relaciona pares estereoscópicos) e absoluta (relaciona esses pares no que diz respeito ao terreno) –, mas com resultados finais equivalentes;

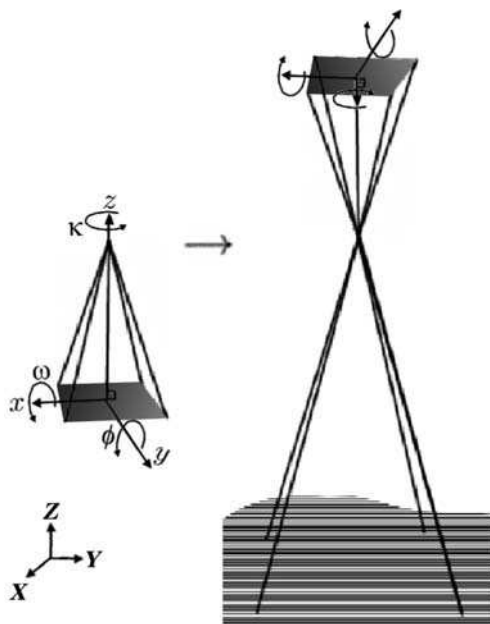


Figura 2: Orientação exterior.

- a *fototriangulação* é uma fonte segura de cálculo de coordenadas no espaço de pontos medidos fotogrametricamente. Nada mais é do

que um conjunto de ressecções espaciais realizado simultaneamente com um conjunto de interseções espaciais para um conjunto de imagens (bloco). Em certos casos, é preciso reorientar o modelo estereoscópico levando-se em conta uma quantidade considerável de pontos nele contidos. Por meio da fototriangulação, podemos precisar das coordenadas *in loco* de apenas uns poucos pontos espaçados pelo bloco para calcular quantos pontos forem necessários (ou desejados) para cada modelo. Isso é normalmente denominado *adensamento* de pontos de controle (apoio) de campo;

- os processos de extração de *modelos digitais do terreno* e (orto) *retificação* de imagens pressupõem conhecidos os parâmetros das orientações, bem como as coordenadas de pontos de campo. Levam à obtenção de produtos cartográficos finais que não precisam de posterior processamento e/ou tradução. Entretanto, não chegam ao máximo de interpretação de informações possível. Isso somente dar-se-á pela restituição digital, conjunto de operações fotogramétricas que passará a ser descrito em seguida.

10.2. A restituição fotogramétrica digital

A restituição objetiva a interpretação das diversas feições naturais ou artificiais manifestas no terreno, extraindo-as geograficamente referenciadas – coordenadas no espaço-objeto –, a fim de compor a base cartográfica de uma região geográfica em uma dada escala.

Em outras palavras, tratar-se-á de descrever as feições geográficas por meio das coordenadas de pontos ao longo de sua geometria no sistema do espaço-objeto. Além da descrição numérica das feições, vale-se a engenharia cartográfica da semiologia gráfica para a representação cartográfica das feições, por intermédio de símbolos e convenções cartográficas adequados à respectiva escala da representação do cenário geográfico de interesse.

O sistema de coordenadas do espaço-objeto (terreno) é tridimensional. Por esse motivo, informações (dados) tridimensionais necessitam ser obtidas a partir das imagens fotogramétricas. Tem-se, então, o problema malcondicionado de reconstrução do espaço tridimensional a partir das imagens bidimensionais, conforme explicação efetuada no início desta obra (capítulo 1).

Para que o espaço-objeto possa ser reconstruído a partir do espaço-imagem, por intermédio da interação homem-máquina (atual estado-da-arte), o conceito de visão e estereoscopia e o da visualização tridimensional de um estereograma digital são necessários. Ambos serão abordados em seguida.

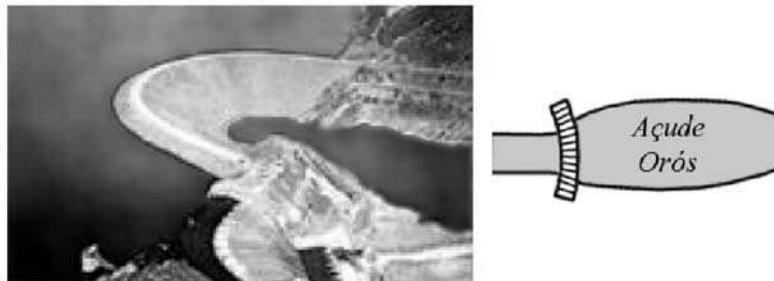


Figura 3: Feição (açude) e representação de acordo com a TBCD (fonte: T34-700); v. p. 186.

10.2.1. O fenômeno da estereoscopia

O ser humano está imerso num mundo tridimensional, ou seja, os objetos estão presentes num cenário que apresenta três grandezas distintas: comprimento, largura e profundidade. Essas grandezas são normalmente mensuradas em relação a um sistema de eixos cartesianos, de orientação levógira ou dextrógira.

A visão humana se inicia com a formação de imagens individuais na retina de cada olho, as quais são bidimensionais, isto é, a percepção de uma das dimensões (a profundidade) é perdida.

Cada olho do observador se comporta como uma câmara fotográfica, que irá detectar e registrar, ou seja, perceber as dimensões relativas à largura e à altura do objeto observado. Mas a dimensão de profundidade não será percebida pelas imagens separadamente. Cada olho observa a mesma cena de um ângulo diferente. As imagens de cada olho são fundidas no cérebro, proporcionando a percepção da profundidade, dimensão perdida na observação individual das imagens. Isso só é possível graças ao fenômeno da estereoscopia humana, que é de grande importância para o mapeamento tridimensional de feições do terreno a partir de imagens fotogramétricas. Pode-se enunciar o conceito de visão estereoscópica como a maneira pela qual o espaço-objeto pode ser reconstruído no cérebro, a partir do espaço-imagem.

Uma simples experiência pode mostrar como de fato funciona esse sistema: se um dos olhos do observador for tapado, ele terá certa dificuldade de tocar com a ponta dos dedos uma quina de mesa, já que a sensação de profundidade é perdida. Quando se repete esse experimento com os dois olhos abertos, a quina da mesa será alcançada com muito mais facilidade.

O sistema de visão humana pode ser simulado através de imagens fotográficas. Para tal, é necessário fotografar os objetos de pontos de vista

distintos, de forma que haja certa uniformidade na escala das imagens e superposição na direção da cobertura fotográfica. Projetos de mapeamento fotogramétrico normalmente adotam as proporções de 60% e 30%, respectivamente, para as superposições longitudinal (ao longo da faixa de voo) e lateral (transversalmente à direção de voo).

A tomada de uma fotografia de uma cena geográfica pode ser feita por intermédio de uma câmara fotográfica, sendo esta métrica ou não. É também possível obter fotografias de modo sistemático, por meio de uma plataforma aerotransportada, com determinadas características de estabilidade em voo e dotada de sistemas de controle de seus parâmetros de navegação e posicionamento. Nesse caso, essas fotografias são denominadas *fotogramas* e a cobertura aérea, *aerolevanteamento*. Fotogramas podem também ser obtidos a partir de plataformas espaciais imageadoras em órbita da Terra, caracterizando a fotogrametria em nível orbital, conforme discussão efetuada no primeiro capítulo.

Um esquema simplificado para gerar imagens fotogramétricas pode ser visto na figura 4(a). Supondo-se um objeto de interesse a ser fotografado, coloca-se a câmara na posição correspondente ao olho direito e obtém-se a imagem, conforme a figura 4(b). Depois, desloca-se a câmara para a posição do olho esquerdo e obtém-se a segunda imagem, de acordo com a figura 4(c). O objeto de interesse deve estar contido nas duas imagens, de modo que proporcione a sobreposição previamente mencionada. Observa-se que as imagens do alvo de interesse, nas tomadas de diferentes pontos de vista, aparecem deslocadas entre si e que há uma área em cada imagem que não está presente na imagem conjugada.

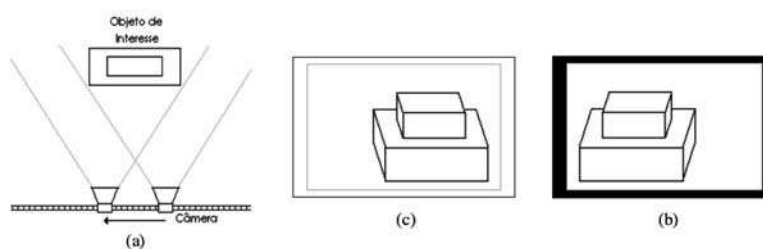


Figura 4: Sistema para tomada de pares estereoscópicos.

É também necessário utilizar técnicas apropriadas para conseguir visualizar, simultaneamente, os dois fotogramas que compõem um estereograma, de forma que o resultado seja a sensação de uma imagem tridimensional. Um exemplo mais realista de um estereograma, obtido a partir de uma cobertura aerofotogramétrica, é apresentado na figura 5:

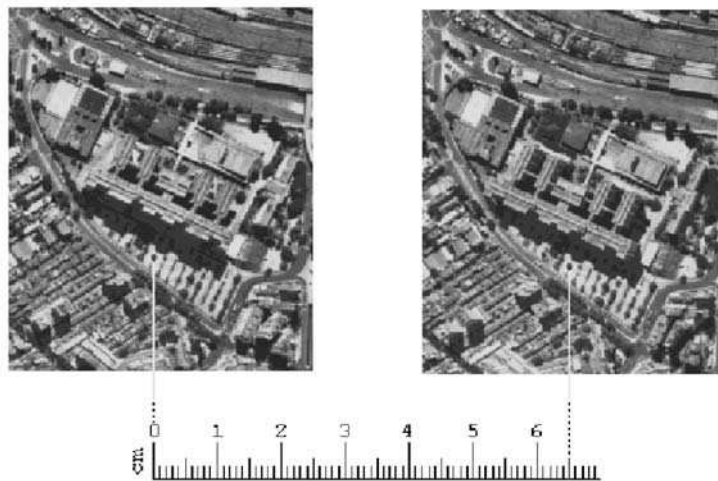


Figura 5: Exemplo de um estereograma obtido a partir da aquisição de fotografias aéreas tomadas em nível de aeronave, com o eixo da câmara verticalizado em relação ao plano do horizonte (as fotografias aéreas foram tomadas sobre o *campus* da Universidade do Estado do Rio de Janeiro e cedidas pelo Instituto Pereira Passos, da Prefeitura do Rio de Janeiro).

10.2.2. Paralaxe estereoscópica

Paralaxe estereoscópica é definida como o deslocamento aparente da posição de um corpo ou objeto em relação a um ponto ou sistema de referência, causado pela mudança do ponto de observação.

Se um observador tomar como referência a quina da parede de uma sala, estender seu polegar apontado para cima entre a quina e seus olhos e visualizá-lo alternadamente, com um só olho aberto de cada vez, perceberá que o alinhamento entre seu dedo e a quina da parede deslocar-se-á horizontalmente. Esse deslocamento aparente entre o dedo e a quina é chamado de paralaxe estereoscópica. Quanto mais próximo do observador estiver o polegar, maior será esse deslocamento horizontal. Dessa forma, o cérebro é capaz de ter a noção de profundidade num cenário real.

O deslocamento aparente só acontece paralelamente à linha reta imaginária que liga o centro de um olho ao outro.

Analogamente ao exemplo dado, pode-se observar o mesmo conceito de paralaxe estereoscópica em imagens fotográficas que se superponham; os alvos fotografados aparecem deslocados de suas verdadeiras posições nas imagens que formam o par estereoscópico. Esse fenômeno também pode ser visto no estereograma apresentado na figura 5.

Outro exemplo relativamente simples, julgado útil para a fixação do conceito de paralaxe estereoscópica e de grande importância para a fotogrametria, é apresentado na figura abaixo:

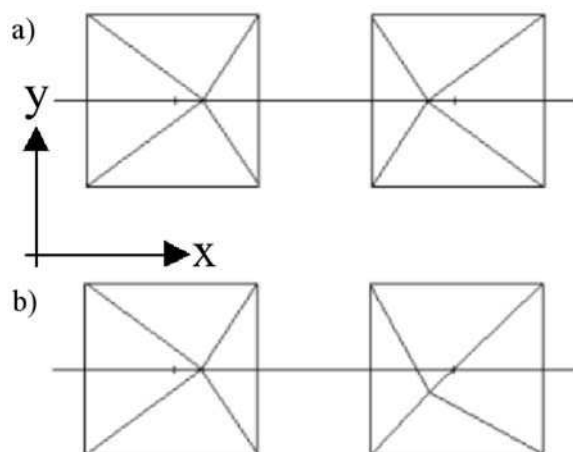


Figura 6: Imagens de uma pirâmide quadrangular supostamente tomadas com o eixo óptico da câmara verticalizado em relação ao plano da base da pirâmide. A linha horizontal que une as imagens do topo da pirâmide materializa, em (a), a direção ao longo da qual ocorre a paralaxe; já na figura (b), podemos observar os deslocamentos aparentes do topo da pirâmide, tanto na direção horizontal quanto na direção perpendicular a esta.

Supondo-se uma pirâmide de base quadrangular posta sobre um terreno plano e duas fotografias contíguas, tomadas movendo-se a câmara apenas na direção do eixo x , conforme a figura 6(a), será observado o efeito de tombamento do topo da pirâmide somente ao longo desse eixo. Se porventura a câmara se mover também na direção y , o efeito de tombamento também será notado nessa direção, conforme mostra a figura 6(b). Na figura 6(a), chama-se de paralaxe estereoscópica em x o deslocamento aparente do topo da pirâmide nessa direção. Com a mudança na tomada das fotografias, mostrada na figura 6(b), o efeito da paralaxe estereoscópica é percebido tanto em x quanto em y .

Se o olho esquerdo de um observador captar somente a imagem da esquerda na figura 6(a) e o olho direito, apenas a imagem da direita, a imagem será fundida no cérebro e ocorrerá a sensação de uma pirâmide tridimensional.

A paralaxe estereoscópica absoluta está relacionada ao deslocamento total de um mesmo ponto fixo do objeto em relação ao centro focal de cada

olho humano ou de uma câmara fotográfica. Por outro lado, o deslocamento relativo entre dois pontos de referência distintos é chamado de *diferença de paralaxe estereoscópica* entre esses dois pontos. O ponto central dessa questão é que tanto a paralaxe estereoscópica absoluta quanto a diferença de paralaxe irão permitir a determinação da altura de objetos ou de um cálculo da diferença de nível entre dois pontos quaisquer no espaço-objeto ou no terreno. A título de ilustração do conceito ora em tela, observe a figura 7. Nela estão representadas marcas de referência de medição (marcas flutuantes ou estereoscópicas) respectivamente sobre a base e o topo de um objeto, de modo que a altura desse objeto possa ser calculada em função da diferença de paralaxes estereoscópicas entre esses pontos:

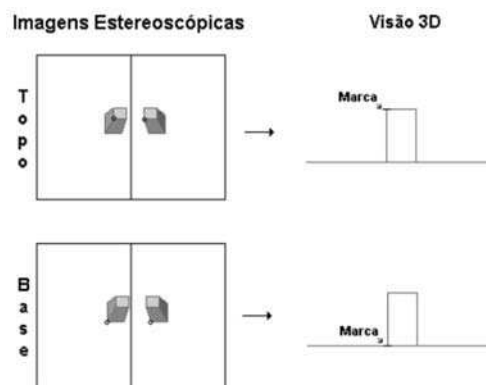


Figura 7: Medição da diferença de paralaxe entre o topo e a base de um objeto por intermédio de uma marca de medição da paralaxe estereoscópica. Essa marca é denominada marca flutuante, referência ou simplesmente marca estereoscópica.

O conhecimento da paralaxe estereoscópica é, portanto, fundamental para o mapeamento fotogramétrico topográfico, uma vez que é por intermédio desse conceito que a fotogrametria cumprirá seu papel de reconstruir o espaço-objeto (o relevo do terreno, por exemplo) a partir da visualização estereoscópica do mesmo e de imagens fotográficas (espaço-imagem) do terreno ou objeto de interesse. A restituição fotogramétrica depende de medições estereoscópicas efetuadas sobre os fotogramas que compõem um estereograma ou modelo estereoscópico. Mais detalhes sobre o assunto, incluindo exemplos numéricos da medição de paralaxes estereoscópicas, podem ser facilmente encontrados na literatura clássica sobre fotogrametria.

Raciocinando-se agora num ambiente de fotogrametria digital, onde as imagens fotográficas digitais são conjuntos de valores numéricos inteiros organizados segundo uma estrutura de matriz (capítulo 2), resta o problema

da visualização estereoscópica de um estereograma num monitor de um computador digital.

10.2.3. Visualização estereoscópica de imagens digitais

De início, há de se ressaltar que esse tema foi abordado em literatura relativamente recente, especificamente no *Adendo ao manual de fotogrametria*, publicado pela Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ASPRS, 1997). No capítulo 1 da obra ora referenciada, pode-se encontrar um excelente material sobre os sistemas de visualização estereoscópica utilizados em estações fotogramétricas digitais.

Segundo a ASPRS, os sistemas de visualização estereoscópica de estações fotogramétricas digitais são classificados, quanto ao tipo, em: a) separação espacial; b) separação espectral; c) separação temporal; e d) numa combinação dos dois métodos anteriores. Evidentemente, não se pretende aqui transcrever o estudo apresentado pela ASPRS. Apenas se julga oportuno recapitular alguns dos conceitos lá apresentados, no sentido de mostrar uma brevíssima discussão sobre o assunto e apontar uma solução de custo relativamente baixo, o que tem surgido como uma tendência para os sistemas fotogramétricos digitais mais recentes.

Primeiramente, é preciso lembrar que o processo da visualização estereoscópica por separação espacial é uma solução similar à adotada nos restituidores analógicos, caracterizados por componentes óptico-mecânicos, ainda hoje utilizada em sistemas de visualização de estações fotogramétricas digitais de construção simples e de custo inferior ao de soluções mais complexas. Esse sistema de visualização estereoscópica apresenta, contudo, a desvantagem de poder ser utilizado apenas por um único observador de cada vez. Trata-se, por exemplo, da solução originalmente desenvolvida pelo *Digital Video Plotter (DVP)*.

A visualização estereoscópica por separação espectral caracteriza-se, segundo a ASPRS, pela necessidade de se dispor de processadores gráficos dedicados, óculos especiais de cristal líquido e dispositivos de sincronização para a exibição e o fechamento alternado das imagens. Esses dispositivos revelaram-se bastante frágeis e onerosos. Além disso, a manutenção e a reposição de seus componentes mostraram-se, ao longo do tempo, relativamente ineficientes para ambientes de produção cartográfica de grande demanda.

No contexto ora discutido, uma solução relativamente simples – desenvolvida para os primeiros restituidores fotogramétricos óptico-mecânicos – volta à cena: a visualização em anaglifo. Esse método será apresentado em

detalhes a seguir, por ser útil à complementação dos conceitos anteriormente discutidos e apresentados na literatura.

10.2.4. Visualização estereoscópica de imagens digitais pelo processo anaglifo

A técnica de visualização estereoscópica em anaglifo consiste em separar as imagens componentes de um estereopar por intermédio de óculos especiais, com filtros de cores complementares em cada lente. Pode-se utilizar, por exemplo, um par de óculos com as seguintes lentes ou filtros: vermelho e ciano. O filtro vermelho permite que somente as frequências de cor vermelha o atravessem. Para completar as demais cores, o outro filtro deverá ser ciano, uma mistura de verde com azul, ou seja, as cores primárias complementares ao vermelho. Podemos construir os óculos com outras cores, desde que não haja coincidência de cores primárias nos dois filtros. Por exemplo, podemos construir um par de óculos com filtros azul e amarelo (combinação de verde e vermelho). Normalmente, os óculos são construídos com filtro vermelho para o olho esquerdo e ciano para o direito.

As imagens digitais também deverão ser filtradas, a fim de serem visualizadas pelo respectivo olho. Assim, para que um par estereoscópico de imagens digitais possa ser visualizado pelo processo anaglifo, empregando-se óculos com lentes vermelha e ciano é necessário ter a seguinte transformação:

$$I_e[x, y] = (R, G, B) \rightarrow_e I[x, y] = (R, 0, 0) \quad (10.1).$$

Uma vez aplicada a transformação representada pela equação 10.1, somente a informação da componente de cor vermelha é mantida, atribuindo-se valor 0 às demais. Por conseqüência, a imagem digital a ser visualizada pelo olho direito sofrerá a seguinte transformação:

$$I_d[x, y] = (R, G, B) \rightarrow_d I[x, y] = (0, G, B) \quad (10.2).$$

Por fim, as imagens devem ser sobrepostas em sua área de exibição, num monitor colorido (RGB), formando-se uma imagem final correspondente ao estereopar, conforme a equação:

$$Estereopar[x, y] = I_d + I_e \quad (10.3).$$

É bom lembrar que as imagens deverão ser obtidas de pontos de vista diferentes. Na figura 8, observa-se o processo descrito. A imagem do olho esquerdo contém somente a componente vermelha, enquanto a outra possui as componentes das cores verde e azul. Quando as imagens são fundidas e o anaglifo, utilizado, cada olho perceberá a imagem correspondente, dando a impressão de três dimensões.

Quando um ponto vermelho está à direita de seu homólogo ciano, provoca a sensação de que está em um plano acima do plano-objeto. Quando eles coincidem, a impressão dada é a de que essa coincidência se dá no plano-objeto. Por outro lado, quando o ponto vermelho está à esquerda de seu ponto homólogo, a impressão dada é a de que esse ponto está em um plano abaixo do plano-objeto. Pode-se aplicar com sucesso essa técnica nas imagens em tons de cinza. O processo é rigorosamente o mesmo utilizado nas imagens coloridas.

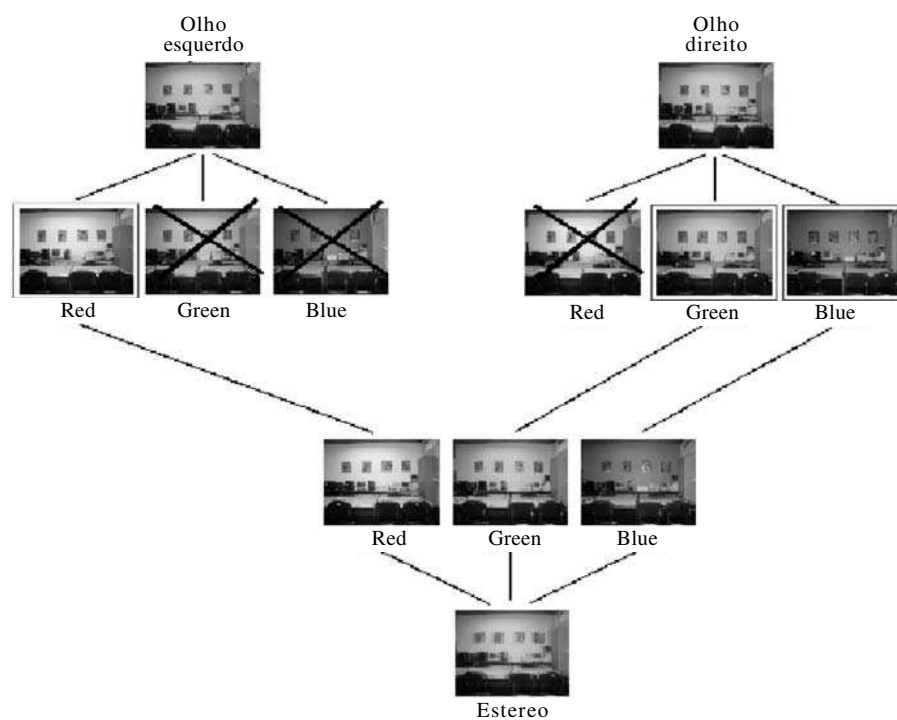


Figura 8: Composição de um estereograma de imagens digitais visualizado pelo processo anaglifo.

10.3. Geração de bases de dados cartográficos digitais

A base cartográfica é o conjunto de objetos geograficamente referenciados a um determinado sistema de coordenadas. Esses objetos serão omitidos ou representados de diversas formas, de acordo com a escala empregada (figura 3; v. p. 178). No Brasil, segue-se como modelo para a representação de feições a Tabela da Base Cartográfica Digital (TBCD), elaborada pela Diretoria de Serviço Geográfico (DSG), do Exército Brasileiro, ou a Mapoteca Temática Digital (MTD), elaborada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A restituição fotogramétrica digital nada mais é que a restituição fotogramétrica executada em ambiente digital. O estado-da-arte nessa área é a utilização de sistemas *Computer Aided Design* (CAD) com suporte a sistemas de coordenadas cartográficas. Esses sistemas pressupõem a junção de um modelo da Terra, ou sistema geodésico, sobre o qual será aplicada uma projeção cartográfica. Usa-se principalmente o sistema de coordenadas UTM, aplicado sobre sistemas geodésicos diversos. Para o Brasil, os mais comuns, em ordem decrescente de modernidade, são: o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), o *South American Datum* 1969 (SAD-69) e o Córrego Alegre. É tendência mundial a substituição de sistemas geodésicos topocêntricos por geocêntricos, cobrindo maiores extensões. Essa transformação tem se tornado comum em vários países. Na Europa, por exemplo, está sendo implementado o *European Terrestrial Reference System* 1989 (ETRS-89), substituindo gradativamente outros sistemas locais mais antigos (em Portugal, além do *European Datum* 1950, existem o *Datum* 1973 e o *Datum* Lisboa). Já nos Estados Unidos, houve a evolução do *North American Datum* 1927 (NAD-27) para o NAD-83, e assim por diante.

Hoje, há vários programas CAD que admitem tais tipos de coordenadas e funcionam paralelamente a programas de restituição fotogramétrica digital, instalados como *plug-ins*, permitindo a visualização do modelo estereoscópico sobre o arquivo em que são inseridas as feições. A formulação matemática já é conhecida: o operador, ao colimar a marca estereoscópica no terreno, está indicando ao sistema as coordenadas de determinado ponto nas duas imagens do par. Como os parâmetros da orientação interior e exterior são conhecidos, imediatamente essas coordenadas são traduzidas em coordenadas métricas de câmara; assim, por meio das equações de colinearidade, deduzem-se as coordenadas de terreno diretamente no sistema adotado (v. o item 5.5; p. 118).

A obtenção desses dados se dá em arquivos digitais vetoriais. Estes diferem dos arquivos matriciais porque, em vez de expressarem seus objetos através de células (*pixels*) de coloração constante, representam-nos por suas coordenadas inicial e final, levando a três tipos básicos de objeto: pontos, linhas e áreas:



Figura 9: Tipos básicos de objetos vetoriais.

A esses objetos, atribuem-se outras características, como cor, espessura, estilo (figura 10) e nível (figura 11). Esta última reveste-se de importância por permitir uma melhor organização do arquivo obtido, colocando-se em cada um dos níveis feições relacionadas entre si, como hidrografia, vegetação ou transportes. Os níveis podem ser exibidos ou não, de acordo com a preferência do usuário, permitindo que se visualize apenas o nível que está sendo trabalhado.



Figura 10: Linhas de diferentes cores, espessuras e estilos (esses padrões também podem ser aplicados a pontos e áreas).

É claro que esse trabalho árduo não fica somente sob a responsabilidade do restituidor. Outros profissionais, como o editor e o revisor, irão tratar o arquivo proveniente da restituição fotogramétrica – que ainda não está padronizado de acordo com as normas para a base cartográfica e pode conter erros de restituição. O resultado final é a carta em formato digital, que pode ser impressa para manuseio ou aproveitada na integração a um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

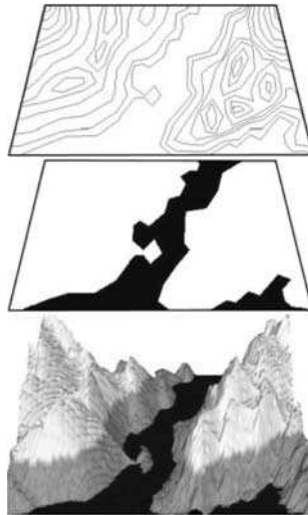


Figura 11: Exemplo de dois níveis diferentes (hidrografia e altimetria), que, juntamente com outros, compõem um arquivo de restituição do terreno representado abaixo deles.

10.4. Tendências em restituição fotogramétrica digital

A estrutura em níveis apresentada anteriormente é bastante eficaz para cartas com poucos temas, mas folhas de mapeamento sistemático apresentam uma quantidade tão grande de dados que elas se tornam impossíveis para a especificação de tamanho máximo da maior parte dos arquivos vetoriais digitais. Por isso, as instituições responsáveis pela produção e atualização de bases cartográficas têm separado cada um desses níveis em arquivos diferentes – o que não invalida a analogia da figura 11 (nessa hipótese, devemos considerar a hidrografia e a altimetria arquivos diferentes). A prática de separação em diferentes arquivos tem se tornado uma tendência em todo processo de restituição fotogramétrica digital, deixando-se a divisão em níveis para subdivisões de cada arquivo. Por exemplo: as curvas de nível mestras, as curvas de nível comuns e os pontos cotados situar-se-iam em níveis diferentes dentro do arquivo chamado *altimetria*.

Os arquivos digitais, caso seja necessário incorporá-los à base de dados do SIG, devem ser validados. Esse fato é cada vez mais comum nos dias de hoje.

A validação é um processo que torna os arquivos topologicamente coerentes, para que sejam devidamente compreendidos por um sistema de informação. Entre outras tarefas, o algoritmo de validação verifica erros que

em uma impressão podem não aparecer: polígonos abertos, linhas duplas, pontos redundantes e segmentos livres. Além disso, o algoritmo quebra todas as interseções de linhas em pontos, a fim de adequá-los à topologia empregada no SIG (figura 12). Por auxiliar o processo de revisão, futuramente, qualquer produção cartográfica deverá passar por um processo equivalente. Hoje ainda há cartas sendo produzidas pelo método convencional.

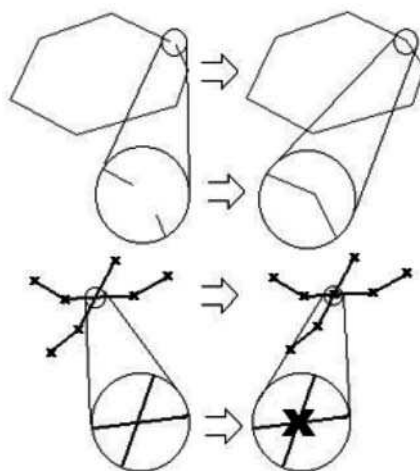


Figura 12: Dois exemplos de processos que ocorrem na validação: fechamento de polígonos abertos e criação de pontos na interseção de linhas.

10.5. Considerações finais

Ao chegarmos ao fim do texto principal desta obra, esperamos que o leitor tenha podido compreender melhor o processo de aquisição de informação espacial por meio de técnicas fotogramétricas, com ênfase especial no estado-da-arte da tecnologia – a *fotogrametria digital*.

Os dez capítulos-base podem ser tratados como obra única de referência para o tema, não necessitando de leituras prévias ou adicionais. Na bibliografia ao fim do livro, encontram-se obras que, devido à sua relevância, foram objeto de intensa consulta quando da elaboração do texto principal.

Como consideração final, é inegável ressaltar que a fotogrametria tem sido empregada substancialmente na restituição de cartas, plantas e produtos afins há cerca de cem anos. As reviravoltas proporcionadas pela era digital possibilitaram rapidez e praticidade aos processos clássicos, sem se abdicar da precisão preconizada por eles. Assim, não é exagero sonhar com outros

cem anos de utilização de tecnologias fotogramétricas. Atualmente, emprega-se fotogrametria desde a imagem ortorretificada de satélite submétrico até os sistemas de reconhecimento de caracteres, passando por aplicações ainda mais inusitadas, como a modelagem numérica de falhas e deformações em estruturas, além de contribuições à medicina e diagnóstico por imagens.

Uma conclusão fundamental pode então ser tirada de tudo o que se viu: o conhecimento dos métodos fotogramétricos, ao menos em nível básico, é essencial para qualquer profissional que queira trabalhar com dados espacialmente referenciados. Ao ser concebido, este texto pretendeu tratar do tema com um enfoque totalmente novo, minimizando o contato com tecnologias em desuso (o que poderia levar a experiências traumáticas) e tentando explicar os métodos modernos com o máximo de profundidade, sem abdicar da simplicidade e da clareza. Esperamos que esses objetivos tenham sido atingidos.

Referências bibliográficas

- AGNARD, J-P. et al. "Present status of the DVP system". *Geomatica*, Ottawa (Canadian Institute of Geomatics), 1995, v. 49, pp. 479-87.
- ALBERTZ, J. e KREILING, W. *Photogrammetric guide*. Karlsruhe: Wichmann, 1989.
- ALTAN, O., TOZ, G. e SEKER, D. *Photogrammetry lecture notes*. 1 ed. Turquia: Istanbul Technical University, 2002.
- ANDERSON, P. S. *Fundamentos para fotointerpretação*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, 1982, 129 p.
- ANDRADE, D. *Fotogrametria básica*. Rio de Janeiro: IME, 1997.
- . *Fotogrametria*. Curitiba: SBEE, 1998.
- ASPRS. *Digital photogrammetry: an addendum to the manual of photogrammetry*. Estados Unidos: The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1997.
- AUGUSTO, E. *Determinação automática dos parâmetros da orientação exterior de uma imagem fotogramétrica digital*. Rio de Janeiro: IME, 1999.
- BALTSAVIAS, E. "Object extraction and revision by image analysis using existing geospatial data and knowledge: state-of-the-art and steps towards operational systems". *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Xian, 2002, v. 34, parte 2, pp. 13-22.
- BRITO, J. *Precision of digital orthoimages: assessment and application to the occlusion detection problem*. Columbus: The Ohio State University, 1997.
- . *Curso de fotogrametria digital (notas de aula)*. Mestrado de Sistemas e Computação. Rio de Janeiro: UERJ, 2003.
- , PRADO, W. e AUGUSTO, E. *Estágio de fotogrametria digital para engenheiros cartógrafos (notas de aula)*. IME, 1999.
- BURCH, R. *A short history of photogrammetry*. Estados Unidos: The Institute for Digital Mapping, Ferris State University, 1997.

- BURNSIDE, C. D. *Mapping from aerial photographs*. Estados Unidos: Halsted Press, 1985.
- CASTLEMAN, K. R. *Digital image processing*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1979.
- CHOO, W., SCHENK, T. e MADANI, M. *Resampling digital imagery to epipolar geometry*. Columbus: The Ohio State University, 1992.
- COELHO, L. *Sistema de medição automática de coordenadas de pontos em imagens fotogramétricas digitais*. Rio de Janeiro: IME, 2001.
- CONVENÇÕES cartográficas: manual técnico T34-700. 2 ed. Brasília: Exército Brasileiro, 1998.
- COSTA, F. *Medição automática de coordenadas em imagens fotogramétricas digitais*. Rio de Janeiro: IME, 1999.
- . *Geração de coordenadas tridimensionais do terreno a partir de imagens fotogramétricas digitais*. Rio de Janeiro: IME, 2000.
- CRÓSTA, A. P. *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. Campinas: Unicamp, 1993.
- CRUZ, V. N. R. *Estações fotogramétricas digitais* (trabalho do curso de fotogrametria digital do Mestrado de Sistemas e Computação). Rio de Janeiro: UERJ, 2003.
- DUDA, R. O., HART, P. E. e STORK, D. G. *Pattern classification*. Nova Iorque: Wiley Interscience, 2001.
- FERREIRA, J. *Geração de ortomosaico a partir de câmara fotográfica digital não-métrica Kodak DC 265* (dissertação). Mestrado em Engenharia Cartográfica. Rio de Janeiro: IME, 2001.
- THE FUNDAMENTALS of digital photogrammetry. Vancouver: International Systemap Corporation, 2000.
- GEMAEL, C. *Introdução ao ajustamento de observações*. Curitiba: UFPR, 1994.
- GOMES, J. e VELHO, L. *Computação gráfica: imagem*. Rio de Janeiro: IMPA, 1994.
- GONZALEZ, R. C. e WOODS, R. E. *Digital image processing*. S. l.: Addison-Wesley, 1993.
- HARALICK, R. M., SHANMUGAM, K. e DINSTEN, I. "Texture features for image classification". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, s. l., 1973, n. 3 (6), pp. 610-21.
- HEIPKE, C. "State-of-the-art of digital photogrammetric workstations for topographic applications". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Estados Unidos, 1995, n. 61 (1), pp. 49-56.
- IMAGESTATION 2001 factsheet. S. l.: Z/I Imaging, 2001.

- INTRODUCTION to photogrammetry. Viena: Universidade de Viena, 2000.
- ISPRS brochure. Suíça: The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2001.
- JOHNSON, R. A. e WICHERN, D. W. *Applied multivariate statistical analysis*. 4 ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.
- JONES, N. *Photogrammetry lecture notes*. Melbourne: The University of Melbourne, 1998.
- KRAUS, K. *Photogrammetry: fundamentals and processes*. 4 ed. Bonn: Ferg, Dummler Verlag, 1999, v. 1.
- LILLESAND, T. e KIEFER, R. *Remote sensing and image interpretation*. 4 ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2000.
- MADEIRA, B. E. *Computer graphics: um sistema para visualização estereoscópica de gráficos de funções de duas variáveis*. S. l.: s. e., 2004.
- MIKHAIL, E. M., BETHEL J. S. e MCGLONE J. C. *Introduction to modern photogrammetry*. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2001.
- NOVO, E. *Sensoriamento remoto: princípios e aplicações*. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.
- NORMAS provisórias para estruturação e validação de arquivos digitais. Porto Alegre: Divisão de Levantamento (Exército Brasileiro), 2000.
- PHOTOGRAMMETRIC mapping EM 1110-1-1000 engineer manual. Washington D. C.: U. S. Army Corps of Engineers, 2002. (Series Engineering and Design).
- PIRES JR., C. et al. "Cadastro fotogramétrico da Torre do Castelo Garcia d'Ávila". *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, Rio de Janeiro, 1994, n. 1, v. 11.
- PRADO, W. et al. *Solar da Imperatriz: o primeiro projeto fotogramétrico no Brasil utilizando as regras 3 x 3*. XIX Congresso Brasileiro de Cartografia. Recife, 1999.
- PRIESE, L. e STURM, P. *Introduction to the color structure code and its implementation*. S. l.: s. e., 2003.
- ROBINSON, A. et al. *Elements of cartography*. 6 ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 1995.
- SCHENK, T. *Digital photogrammetry*. 1 ed. Estados Unidos: TerraScience, 1999.
- SILVEIRA, F. *Fototriangulação por feixes perspectivos*. Rio de Janeiro: UERJ, 2004.
- STARK, P. *SticiGui: statistics tools for internet and classroom instruction with a graphical user interface*. Berkeley: Department of Statistics, University of California, 2001.

STOCKBURGER, D. *Introductory statistics: concepts, models and applications*. Missouri: Southwest Missouri State University, 1998.

TBCD (Tabela da Base Cartográfica Digital). 2 ed. Brasília: Exército Brasileiro, 1998.

VASCONCELLOS, J. *Ajustamento de observações: modelos e análises*. Rio de Janeiro: IME, 2000.

Sobre os autores



Luiz Carlos Teixeira Coelho Filho formou-se em Engenharia Cartográfica no Instituto Militar de Engenharia (IME), em 2002, e é mestre em Informática (Universidade Federal do Amazonas, 2005). Trabalhou desde 1999 como orientando de Jorge Brito na área de imageamento digital. Nos últimos anos, vivenciou diretamente a implementação de técnicas fotogramétricas digitais, culminando com o desenvolvimento do projeto e-foto na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Atualmente, é consultor em geoprocessamento com *software* livre.



Jorge Luís Nunes e Silva Brito formou-se em Engenharia Cartográfica¹ no Instituto Militar de Engenharia (IME), em 1984. Integrou o Quadro de Engenheiros Militares do Exército Brasileiro até 2002. Foi professor do Departamento de Ensino de Engenharia Cartográfica do IME. Possui os títulos de mestre em Sistemas e Computação (IME, 1988) e de doutor em Ciências Geodésicas (The Ohio State University, 1997). Após anos de trabalho em ensino e pesquisa no IME, atualmente é professor do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação (ênfase em Geomática) e da graduação em Engenharia Cartográfica, ambos da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

¹ A formação em Engenharia Cartográfica também recebe o nome de Engenharia Geográfica, Engenharia de Trabalhos Cartográficos, Engenharia de Geodésia e Topografia, e Engenharia Geomática. Tem ainda afinidades profundas com os currículos de Engenharia de Levantamentos, Engenharia de Agrimensura e Engenharia Civil com ênfase em Geotecnologias (aplicada em alguns países).

Esta obra contou ainda com as participações de: Guilherme Lúcio Abelha Mota (UERJ), co-autor e revisor do capítulo 3; Francisco José da Cunha Silveira (UERJ), co-autor e revisor do capítulo 6; e Marcelo Teixeira Silveira (UERJ), co-autor e revisor do capítulo 10.