



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO
AUTHORIZATION FOR PUBLICATION

AUTORES AUTHORS	PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS		AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY
	CORREÇÃO GEOMÉTRICA SENSORIAMENTO REMOTO SENSOR HRV-SPOT		<i>Ralf Gielow</i> RALF GIELOW PRES. CONS. PÓS-GRADUAÇÃO
	AVALIAÇÃO DISTORÇÃO		
AUTOR RESPONSÁVEL RESPONSIBLE AUTHOR		DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION	REVISADA POR / REVISED BY
<i>Antonio José Ferreira Machado e Silva</i> Antonio José Ferreira Machado e Silva		☐ INTERNA / INTERNAL ☒ EXTERNA / EXTERNAL ☐ RESTRITA / RESTRICTED	<i>Nelson D.A. Mascarenhas</i> Nelson D.A. Mascarenhas

CDU/UDC		DATA / DATE		
621.376.5		Outubro 1989		
TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO		ORIGEM ORIGIN	
	INPE-5001-TDL/395		PG/DDS	
AUTORES/AUTHORSHIP	MODELOS DE CORREÇÃO GEOMÉTRICA PARA IMAGENS HRV - SPOT		PROJETO PROJECT	
			FRH/CAP	
			Nº DE PAG. NO OF PAGES	ULTIMA PAG. LAST PAGE
			239	221
		VERSÃO VERSION	Nº DE MAPAS NO OF MAPS	

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

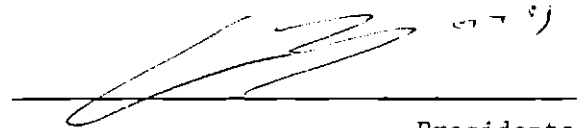
A correção geométrica apresenta-se como uma ferramenta extremamente importante nas diversas aplicações de Sensoriamento Remoto. Por este motivo, ela deve incluir o rol das tarefas que compõem o pré-processamento de imagens. A literatura apresenta diversos modelos matemáticos para este fim, bem como modelos para refinar a correção geométrica. Esta dissertação busca apresentar, analisar e comparar alguns métodos de correção geométrica, procurando estudar a relação entre custos computacionais e precisão alcançados. Alguns critérios de avaliação geométrica são discutidos, por se tratar do instrumento pelo qual é possível comprovar a excelência ou não dos modelos adotados.

OBSERVAÇÕES / REMARKS

Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada, aprovada em 28 de outubro de 1988.

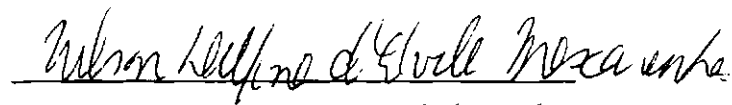
Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em computação Aplicada

Dr. Gerald Jean Francis Banon



Presidente

Dr. Nelson D.d'Ávila Mascarenhas



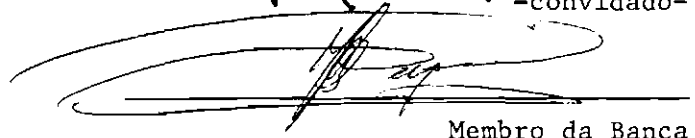
Orientador

Dr. João Fernando Custódio da Silva



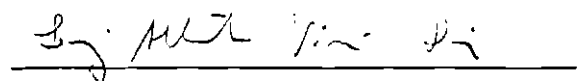
Membro da Banca
-convidado-

Dr. João Bosco Lugnani



Membro da Banca
-convidado-

Dr. Luiz Alberto Vieira Dias



Membro da Banca

Candidato: Antonio José Ferreira Machado e Silva

São José dos Campos, 27 de outubro de 1988

À minha esposa Virginia, pelo seu amor, seu incentivo e sua dedicação

Aos meus filhos Diogo, Victor e Renan, pela felicidade e realização que me proporcionam

Aos meus pais Carlindo e Maria Amélia, pela minha educação e formação

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Nelson Delfino D'Ávila Mascarenhas, pela sua orientação eficiente e pelo exemplo de conduta como pesquisador; aos colegas que contribuíram, através de frutíferas discussões, ao enriquecimento do trabalho; a José Luiz de Barros Aguirre que, na qualidade de chefe do DDS, representa o apoio do INPE à realização desta dissertação; a Ana Lúcia Magalhães de Lima pelo apoio na datilografia; a Soraya Porto de Barros Gomes Rigo Lima, pelas excelentes gravuras que ilustram este trabalho; e, finalmente, à minha esposa Virginia pelo apoio, incentivo e compreensão à renúncia de muitos finais de semana juntos, e aos meus filhos Diogo, Victor e Renan, por aceitarem trocar tardes de futebol com o pai, pela companhia silenciosa no quarto de estudo. O amor de vocês foi fundamental.

Obrigado!

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xvii
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
<u>CAPÍTULO 2 - O SISTEMA SPOT</u>	7
2.1 - A plataforma do SPOT	7
2.1.1 - Subsistema de controle de órbita e atitude	9
2.1.2 - Subsistema de determinação de efemérides	11
2.2 - O instrumento HRV-SPOT	11
2.1.1 - O modo multiespectral	13
2.2.2 - O modo pancromático	16
2.2.3 - A visada oblíqua	19
2.2.4 - O modo de operação do satélite e dos instrumentos	24
2.3 - Os satélites SPOT-2, 3, 4 e 5	25
<u>CAPÍTULO 3 - PRINCIPAIS FONTES DE DISTORÇÕES GEOMÉTRICAS</u>	29
3.1 - Distorções inerentes à plataforma	29
3.1.1 - Os dados de efemérides	31
3.1.1.1 - Variação da velocidade	32
3.1.1.2 - Variação da altitude	34
3.1.2 - Os dados de atitude	34
3.1.2.1 - Distorção provocada pelo rolamento	36
3.1.2.2 - Distorção provocada pela arfagem	36
3.1.2.3 - Distorção provocada pela guinada	37
3.2 - Distorções inerentes ao sensor (instrumento)	38
3.2.1 - Distorções relativas a um sensor de varredura mecânica ..	39
3.2.1.1 - Cisalhamento da varredura	39
3.2.1.2 - Variação do tempo útil da varredura	40
3.2.1.3 - Distorção panorâmica	40
3.2.1.4 - Deslocamento entre bandas	41
3.2.1.5 - Deslocamento entre detetores	42
3.2.2 - Distorções relativas a um sensor de varredura eletrônica	43
3.2.2.1 - Deslocamento entre bandas	43
3.2.2.2 - Deslocamento entre barras de detetores	44
3.2.2.3 - Desalinhamento das barras de detetores	44

3.3 - Distorções inerentes à Terra	45
3.3.1 - Rotação da Terra	45
3.3.2 - Esfericidade da Terra	46
3.3.3 - Relevo da Terra	47
<u>CAPÍTULO 4 - MODELOS DE CORREÇÃO GEOMÉTRICA</u>	49
4.1 - Modelo polinomial	56
4.2 - Modelo de correções independentes	62
4.2.1 - Correção da variação da velocidade	67
4.2.2 - Variação da altitude	68
4.2.3 - Rolamento	69
4.2.4 - Arfagem	69
4.2.5 - Guinada	70
4.2.6 - Cisalhamento da varredura	71
4.2.7 - Distorção panorâmica	72
4.2.8 - Rotação da Terra	73
4.2.9 - Esfericidade da Terra	74
4.2.10 - Análise das vantagens e desvantagens do modelo	76
4.3 - Modelo fotogramétrico	77
4.3.1 - Modelo matemático	80
4.3.2 - Análise das vantagens e desvantagens do modelo	90
<u>CAPÍTULO 5 - O PROCESSAMENTO DAS IMAGENS SPOT</u>	93
5.1 - Características geométricas do sistema de formação de imagens	94
5.1.1 - Parâmetros diferenciadores dos instrumentos HRV ₁ e HRV ₂ ..	94
5.1.2 - Parâmetros diferenciadores do modo multiespectral e do modo pancromático	96
5.2 - Nível 0	101
5.3 - Nível 1A	101
5.4 - Nível 1B	101
5.4.1 - Mapeamento direto no nível 1B	106
5.4.1.1 - Posição do satélite referente a um ponto da amostra ...	106
5.4.1.2 - Vetor de visada referente a cada ponto da amostra	108
5.4.1.3 - Equação do plano de referência para a Terra	113
5.4.1.4 - Determinação do ponto objeto	115
5.4.1.5 - Determinação do plano imagem corrigida	116
5.4.2 - Mapeamento inverso no nível 1B	119

5.5 - Nível 2A	121
5.5.1 - Mapeamento direto no nível 2A	124
5.5.2 - Mapeamento inverso no nível 2A	126
5.5.2.1 - Modelo polinomial para inversão da grade	127
5.5.2.2 - Inversão da grade por partes	128
5.6 - Nível 2B	131
5.6.1 - Modelo de refinamento polinomial	132
5.6.2 - Refinamento da atitude utilizando um filtro estocástico de Kalman	139
5.7 - Nível 3	146
5.7.1 - Definição dos elipsóides auxiliares	149
5.7.2 - Modelo interpolativo	152
5.7.3 - Modelo iterativo	156
5.7.4 - Comparação dos modelos	158
5.8 - Nível 4	159
5.9 - Nível S	159
<u>CAPÍTULO 6 - AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE IMAGENS E MODELOS</u>	163
6.1 - Avaliação pelo método polinomial	164
6.2 - Avaliação pelo método da SPOTIMAGE	172
6.2.1 - Qualidade interna	173
6.2.2 - Qualidade externa	177
6.3 - Avaliação das diversas fontes de distorções	177
6.3.1 - Influência da atitude	180
6.3.2 - Influência da variação da altitude	193
6.3.3 - Influência da esfericidade da Terra	195
6.3.4 - Influência da rotação da Terra	197
6.4 - A distorção provocada pelo mapeamento inverso	200
<u>CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO</u>	211
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	215
BIBLIOGRAFIA	219

ABSTRACT

Geometric correction is a very important tool of remote sensing applications. Therefore, it must include tasks which compose the preprocessing of the images. There are several mathematical models for the geometric correction itself, and also for its refinement. Here, some geometric correction methods are presented, analysed and compared, and the relation between computational costs and precision is studied. Some geometric evaluation standards are discussed, as they are the instrument to confirm the quality of the adopted models.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Atitude do satélite SPOT	10
2.2 - Precisão das efemérides transmitidas	11
2.3 - Campo de visada do sensor HRV-multiespectral	13
2.4 - Formação da varredura multiespectral	14
2.5 - Formatação da cena multiespectral	15
2.6 - Campo de visada do sensor HRV-pancromático	17
2.7 - Formatação da cena pancromática	18
2.8 - Concepção da visada lateral do satélite SPOT	20
2.9 - As possibilidades de movimento do espelho	21
2.10 - Repetitividade da visada oblíqua	22
2.11 - Configuração acoplada dos instrumentos	23
2.12 - Ângulo de incidência da tomada de imagem	24
3.1 - Interpolação das efemérides	32
3.2 - Variação da velocidade	33
3.3 - Variação da altitude	34
3.4 - Integração dos dados de atitude	35
3.5 - Variação do ângulo de rolamento	36
3.6 - Variação do ângulo de arfagem	37
3.7 - Guinada: efeito e variação	38
3.8 - Cisalhamento da varredura	39
3.9 - Distorção panorâmica	41
3.10 - Deslocamento entre bandas	42
3.11 - Deslocamento entre detetores	43
3.12 - Deslocamento entre barras de detetores	44
3.13 - Desalinhamento das barras de detetores	45
3.14 - Rotação da Terra	46
3.15 - Esfericidade da Terra	47
3.16 - Deslocamento devido ao relevo	48
4.1 - Mapeamento direto	51
4.2 - Distribuição da grade amostral durante o mapeamento direto	52
4.3 - Distribuição da grade amostral durante o mapeamento inver-	
so	52
4.4 - Interpolação pela transformação projetiva	53

4.5	- Interpolação do nível de cinza	55
4.6	- Relação entre os sistemas de projeção e da imagem corrigida	57
4.7	- Relação entre os sistemas de coordenadas de imagens bruta e corrigida	63
4.8	- Grade amostral da imagem bruta	64
4.9	- Velocidade do ponto subsatélite para os nós da coluna central	67
4.10	- Deslocamento devido ao rolamento	69
4.11	- Deslocamento devido à arfagem	70
4.12	- Deslocamento devido à guinada	71
4.13	- Distorção panorâmica	73
4.14	- Efeito da rotação da Terra	74
4.15	- Efeito da esfericidade da Terra	75
4.16	- Princípio da equação de colinearidade	78
4.17	- Orientação entre o SRI e o SRA	81
4.18	- Orientação entre o SRA e o SRO	82
4.19	- Orientação entre o SRO e o SGG	83
4.20	- Intersecção da visada com o elipsóide	87
4.21	- Fluxo das tarefas do modelo fotogramétrico	88
5.1	- Orientação entre o SRH _i e SRA	94
5.2	- Disposição dos barretes dos modos XS e PAN em relação ao SRH _i	97
5.3	- O vetor de visada $\vec{v}$	98
5.4	- Influência da posição do espelho na visada	100
5.5	- Intersecção do feixe de visadas com o plano de referência para a Terra	103
5.6	- Mapeamento direto entre imagem bruta e imagem corrigida ..	105
5.7	- Orientação entre o SRO e o SGG	109
5.8	- Orientação entre o SRA e o SRO	112
5.9	- Vetor normal ao elipsóide	114
5.10	- Sistema de projeção normal ao plano de referência	116
5.11	- Orientação entre o SP e o sistema de coordenadas de imagem corrigida	119
5.12	- Mapeamento direto no nível 2A	125
5.13	- Discretização das coordenadas de projeção no nível 2A	126

5.14 - Inversão da grade pela transformação projetiva	129
5.15 - Transformação afim	133
5.16 - Transformação afim ortogonal	134
5.17 - Transformação de similaridade	135
5.18 - Transformação de corpo rígido	136
5.19 - Transformação de translação	137
5.20 - Relação entre os vetores posição do satélite, posição do ponto observado e visada	142
5.21 - Erro devido ao relevo	148
5.22 - Definição do elipsóide auxiliar referente à altitude H ...	151
5.23 - Modelo fotogramétrico no nível 3	152
5.24 - Avaliação do modelo interpolativo para o nível 3 SPOT	154
5.25 - Modelo interpolativo para o nível 3 SPOT	156
5.26 - Modelo iterativo para o nível 3 SPOT	158
6.1 - Orientação entre os sistemas de projeção e de imagem	182
6.2 - Magnitude do deslocamento provocado pelo rolamento ou, pela arfagem	191
6.3 - Deslocamento da imagem devido ao rolamento e à arfagem ...	192
6.4 - Correlação entre a variação da altitude e a inclinação da visada	194
6.5 - Correlação entre a esfericidade da Terra e a inclinação da visada	196
6.6 - Vetor deslocamento devido à não correção do efeito da ro- tação da Terra	198

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Principais características do satélite SPOT-1	9
2.2 - Principais características do sensor HRV-SPOT multiespectral	16
2.3 - Principais características do sensor HRV-SPOT pancromático	19
2.4 - Modos de operação dos instrumentos	24
2.5 - Principais características do sensor HRVIR	26
2.6 - Principais características do sensor VGT	28
5.1 - Precisão do MDET em função do ângulo de visada para uma precisão planimétrica de 10 metros	147
5.2 - Erro devido ao relevo em função do ângulo de visada	149
6.1 - Características das imagens observadas	179
6.2 - Influência da não correção da atitude	181
6.3 - Influência da adição de um valor constante à atitude	185
6.4 - Influência da variação da altitude sobre o modelo fotogramétrico	194
6.5 - Influência da esfericidade da Terra sobre o modelo fotogramétrico	195
6.6 - Influência da rotação da Terra sobre o modelo fotogramétrico	197
6.7 - Distorção inerente ao mapeamento inverso	202

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O processo de correção geométrica de imagens de sensores remotos orbitais visa modelar os efeitos provocados pelas diversas fontes de distorções geométricas de modo a eliminar, ou reduzir ao máximo, a degradação geométrica que tais efeitos provocam. Deve-se ter em mente, que neste processo, a radiometria da imagem deve ser preservada ao máximo, para não deturpar aquilo que está representado na imagem.

Este processo é de vital importância para diversas aplicações das imagens de satélite, principalmente quando se faz necessária a análise quantitativa, e não simplesmente a análise qualitativa.

Após o processo de correção geométrica é possível realizar medições sobre a imagem, medições estas que podem ser de distâncias, ângulos, perímetros ou áreas. A precisão destas medições está intrinsecamente relacionada com a precisão da correção geométrica, que pode ser determinada a partir de um criterioso procedimento de avaliação. É importante, então, que a correção geométrica seja sempre seguida de um processo de avaliação que informe a qualidade ou a exatidão da geometria da imagem.

A avaliação da qualidade geométrica envolve dois conceitos a saber: o de similaridade que indica o grau de semelhança entre a imagem e o terreno nela retratado, ao qual associa-se o termo geometria interna; e o de localização ou posicionamento que indica a precisão pela qual as coordenadas da imagem estão relacionadas com um determinado referencial (geometria externa).

A correção geométrica pode ter dois objetivos distintos: o de correção absoluta, quando a imagem procura retratar com

fidelidade o terreno, ou o de correção relativa, quando uma imagem deve retratar a realidade de uma outra imagem.

A correção absoluta interessa de perto às aplicações quantitativas, e é imprescindível para as aplicações cartográficas, pois permite a colocação da imagem numa determinada projeção cartográfica, possibilitando a superposição desta com cartas topográficas, temáticas ou especiais, bem como o seu emprego como base para algum tipo de mapeamento. A correção absoluta, a princípio, deve ser a única a ser observada como um processo de correção geométrica de imagens.

A correção relativa, na realidade, não deve ser encarada como um processo de correção, mas sim como um processo de registro entre imagens, pois consiste em distorcer uma imagem da mesma forma em que uma outra se encontra distorcida, através de pontos de controle relativos. O objetivo é possibilitar o registro multitemporal entre imagens do mesmo sensor, e até mesmo o registro entre imagens de diversos sensores.

Vale destacar que o processo de correção geométrica absoluta, se realizado com boa precisão, permite o registro entre imagens multitemporais ou multisensores, podendo-se ainda, refinar o registro, a partir de pontos de controle relativos de forma mais rápida e eficiente.

A literatura apresenta uma série de modelos de correção geométrica que basicamente definem três classes distintas: a dos modelos de correções polinomiais, a dos modelos de correções independentes e a dos modelos fotogramétricos.

Os modelos de correções polinomiais utilizam polinômios de ordens variadas para mapear a imagem bruta num sistema de projeção cartográfica preestabelecido, ou diretamente num sistema referente a uma imagem corrigida, quando este sistema deriva de uma projeção

cartográfica. Em nenhum momento é feita uma análise conceitual das diversas fontes de distorção geométrica.

Os modelos de correções independentes analisam cada fonte de distorção isoladamente, procurando modelar seus efeitos para posterior eliminação. As imagens, neste caso, não se ajustam a algum sistema de projeção cartográfica, mas se aproximam da projeção SSP ("Space Strip Perspective" - Perspectiva Espacial por Faixas) criada exatamente para as imagens de sensores remotos orbitais. Posteriormente, a partir de pontos de controle, é possível ajustar a imagem a um sistema de projeção cartográfico.

Os modelos fotogramétricos buscam modelar os efeitos de distorção geométrica de forma integrada, através de um conceito físico representado pelo princípio das equações de colinearidade. A partir destas equações o modelo relaciona um ponto da imagem bruta com um outro sobre uma superfície de referência para a Terra. Esta superfície pode ser um elipsóide, uma esfera ou um plano, sendo mais precisa a adoção de um elipsóide. Após o relacionamento imagem-Terra é possível a transformação dos dados para qualquer sistema de projeção cartográfica, com exceção do caso em que o plano é utilizado como superfície representativa da Terra.

Este trabalho tem, então, por objetivo apresentar, analisar, comparar e avaliar os diversos modelos matemáticos adotados para correção geométrica das imagens do sensor HRV-SPOT nos níveis de processamento 1B, 2A, 2B e 3. O autor foi o responsável pela implementação do processo de correção referente ao nível 1B do Sistema de Processamento de Imagens HRV-SPOT no INPE, estando este nível em fase operacional de produção de imagens. Atualmente o autor coordena a implementação dos níveis 2A e 2B e as pesquisas referentes ao nível 3 para futuras adições destes níveis ao processo operacional de produção de imagens.

Todos os níveis serão avaliados para observação da precisão que cada um fornece, e os resultados serão confrontados com

as especificações da SPOTIMAGE. Esta avaliação é realizada sob diversos critérios a partir de levantamentos de pontos de controle, observados simultaneamente nas imagens e em cartas topográficas. É importante destacar que a avaliação é sempre realizada confrontando o plano imagem com algum sistema de projeção cartográfica.

O INPE usualmente adota transformações polinomiais de primeira ordem no processo de avaliação, envolvendo de três a seis parâmetros a determinar:

- Transformação de corpo rígido: envolve a determinação de dois parâmetros de translação e um de rotação. A escala é preestabelecida.
- Transformação isogonal ou de similaridade: difere da de corpo rígido pela flutuação da escala, que passa a ser um parâmetro a ser determinado, num total de quatro parâmetros.
- Transformação afim ortogonal: mais um grau de liberdade é concedido pois a escala passa a variar de forma diferenciada em duas direções ortogonais. Encerra a determinação de cinco parâmetros.
- Transformação afim: é a transformação de primeiro grau completo com seis parâmetros a determinar: dois de translação, um de rotação, um fator de não ortogonalidade e dois fatores de escala.

Já a SPOTIMAGE adota a determinação de parâmetros específicos, de forma isolada, a fim de compor o seu quadro de precisão interna, por ela denominada geometria intrínseca, e absoluta, denominada geometria extrínseca.

Tais parâmetros são variação de comprimento e anisomorfismo (geometria intrínseca) e precisão de localização (geometria extrínseca). O anisomorfismo analisa a variação de escala entre duas direções ortogonais, enquanto a variação de comprimento avalia variações relativas sobre distâncias medidas na imagem e no

plano de projeção. A precisão de localização é determinada comparando-se diretamente as coordenadas de imagem com as coordenadas de carta.

Para atender os objetivos propostos o trabalho está dividido em sete capítulos.

No Capítulo 2 serão apresentadas as principais características do satélite francês SPOT, juntamente com as principais características do sensor HRV, a bordo deste satélite.

As principais fontes de distorções sistemáticas, responsáveis pela degradação geométrica das imagens, serão abordadas no Capítulo 3. Estas distorções estão associadas ao satélite, ou plataforma, ao sensor responsável pelo imageamento e ao objeto imageado, no caso a Terra.

No Capítulo 4 serão discutidos três modelos de correção geométrica e suas aplicações no sensor HRV-SPOT. Os modelos de correções polinomiais, de correções independentes e fotogramétrico serão, então, comparados para uma primeira análise das vantagens e desvantagens de cada um.

No Capítulo 5 serão apresentados os diversos níveis de processamento da imagem HRV-SPOT, juntamente com os modelos matemáticos de correção associados a cada um. Os níveis abordados irão do nível 0 até o nível 4, cobrindo os aspectos relacionados ao emprego de pontos de controle para refino do modelo fotogramétrico (nível 2B), bem como os aspectos relacionados à utilização de modelos digitais de elevação do terreno (MDET) para imagens obtidas a partir de visadas oblíquas (nível 3). A função do MDET é eliminar as distorções planimétricas causadas pelo relevo.

A avaliação geométrica dos modelos será apresentada no Capítulo 6, através do método usualmente empregado no INPE, e pelo método proposto pela SPOTIMAGE, para avaliação dos seus produtos. Os

resultados encontrados serão, então, comparados com os valores especificados pela SPOTIMAGE para confirmação, ou não, do acerto do modelo de correção adotado.

No Capítulo 7 será feita uma análise geral dos resultados alcançados, possibilitando a apresentação da conclusão do trabalho.

CAPÍTULO 2

O SISTEMA SPOT

O projeto do satélite francês SPOT ("Système Probatoire d'Observation de la Terre" - Sistema Probatório de Observação da Terra) teve seu início em 1976 e previa, inicialmente, o desenvolvimento por parte de países europeus, coordenados pela ESA ("European Space Agency" - Agência Espacial Européia), de uma série de satélites de sensoriamento remoto de 2ª geração. No entanto a França só conseguiu a adesão da Suécia (1978) e, posteriormente, da Bélgica (1979).

O primeiro satélite da série foi lançado, dez anos mais tarde, no dia 22 de fevereiro de 1986, e faz parte de uma série de cinco satélites que vão garantir a existência do projeto pelo menos até 2000 (Arnaud and Leroy, 1988).

Os objetivos principais do sistema SPOT são o de permitir um perfeito levantamento e monitoramento dos recursos naturais, bem como o pleno emprego das imagens nas atividades cartográficas, sejam estas de mapeamento ou de atualização do mapeamento. É o primeiro satélite com vocação para a Cartografia.

2.1 - A PLATAFORMA DO SPOT

A plataforma SPOT-1 está em órbita quase polar, elíptica de baixa excentricidade, heliossíncrona e em fase com a Terra.

Uma órbita heliossíncrona indica que o satélite passa sobre um determinado ponto sempre a mesma hora local. Estar em fase com a Terra significa que após um determinado número de revoluções do satélite, correspondente a um determinado número de revoluções da Terra em torno de seu eixo de rotação, ambos voltam a se encontrar na mesma posição relativa. Este número de revoluções da Terra define o

período, em dias, do ciclo do satélite SPOT (Courtois and Traizet, 1986).

O período nominal de revolução do SPOT é de 101,4 minutos, o que corresponde ao satélite completar $14 + 5/26$ revoluções em torno da Terra por dia. Em 26 dias o ciclo se completa com o SPOT realizando 369 diferentes revoluções (órbitas base).

Utilizando as leis de Kepler para o movimento de um satélite artificial em torno da Terra, pode-se determinar o semi-eixo maior da órbita do satélite. O semi-eixo maior da órbita do satélite SPOT-1 é de 7200,561 km.

A distância máxima entre órbitas base adjacentes ocorre no equador, onde é igual a 108,6 km, diminuindo quando estas se dirigem para os pólos. No paralelo de 45° a distância é de 76,9 km.

O satélite cruza o equador, nas órbitas descendentes, ocorridas durante o dia, às 10 horas e 30 minutos, com uma tolerância de 15 minutos. O ponto de cruzamento sempre se repete com uma precisão de 3 km. No cruzamento com o equador o satélite apresenta uma altitude nominal de 822,145 km e uma velocidade referente ao ponto subsatélite da ordem de 6,657 km/seg.

A Tabela 2.1 resume as principais características do satélite SPOT e de suas órbitas.

O satélite SPOT apresenta como subsistemas principais o controlador de órbita e atitude do satélite, o subsistema para determinação das efemérides (posição e velocidade do satélite), os instrumentos responsáveis pelo imageamento (sensor HRV-SPOT), o computador de bordo e o subsistema de força.

Os três primeiros são os que interessam mais de perto ao processo de correção geométrica, sendo que os instrumentos HRV devem ser destacados já que são a própria razão de ser do satélite.

TABELA 2.1

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SATÉLITE SPOT-1

vida*	fev/1986-
altitude no equador (km)	822,145
período (min)	101,4
inclinação (grau)	98,723
semi-eixo maior (km)	7200,561
excentricidade média	$1,2 \times 10^{-3}$
velocidade do ponto subsatélite no equador (km/seg)	6,657
período do ciclo (dias)	26
número de órbitas base	369
distância entre órbitas base adjacentes no equador (km)	108,6
instante do cruzamento no equador	10h30m $\pm$ 15m
precisão do cruzamento no equador (km)	3

* A vida útil prevista para o satélite SPOT-1 era de 2 anos. O satélite já apresenta uma sobrevida de 6 meses.

2.1.1 - SUBSISTEMA DE CONTROLE DE ÓRBITA E ATITUDE

A atitude do satélite é representada por três ângulos de rotação: rolamento, arfagem e guinada (Figura 2.1), os quais sintetizam os graus de liberdade que o satélite tem de movimento, sem se afastar da sua órbita.

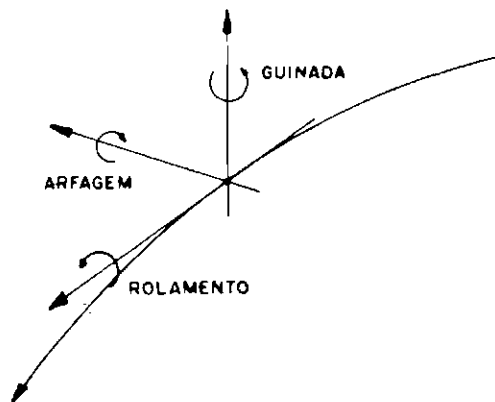


Fig. 2.1 - Atitude do satélite SPOT.

A estabilização deste movimento é conseguida através do sistema de três eixos, utilizando um motor a hidrazina, que garante um apontamento máximo de $0,15^\circ$ para cada um destes ângulos, além de manter os movimentos rotacionais em torno dos eixos com uma taxa máxima de $10^{-3}^\circ/\text{seg}$ (SPOTIMAGE, 1987).

O subsistema de controle de órbita e atitude utiliza vários sensores incluindo giroscópios, sensores de horizonte e sensores solares para garantir um apontamento fino com precisão superior a $0,01^\circ$.

O giroscópio fornece precisamente as diferentes taxas de rotação possibilitando a determinação da atitude a partir da integração destes dados. Pequenos desvios nas leituras do giroscópio são compensadas por correções efetuadas pelos sensores de horizonte (rolamento e arfagem) e solares (guinada) (Courtois and Traizet, 1986).

O satélite transmite os dados de atitude (variação da atitude em relação ao tempo) a uma taxa de oito registros por segundo.

2.1.2 - SUBSISTEMA DE DETERMINAÇÃO DE EFEMÉRIDES

As efemérides (posição e velocidade) do satélite francês SPOT são primariamente determinadas pelo computador de bordo do satélite e transmitidas para o Centro de Controle de Missão, na França.

No Centro de Controle de Missão os dados são pós-processados de modo a se obter uma melhor precisão. Posteriormente os dados são transmitidos para as diversas estações terrenas, via linha telex.

A precisão dos dados de efemérides transmitidos é de 500 metros tangencial, 300 metros normal e 300 metros radial à órbita (Figura 2.2) (SPOTIMAGE, 1987).

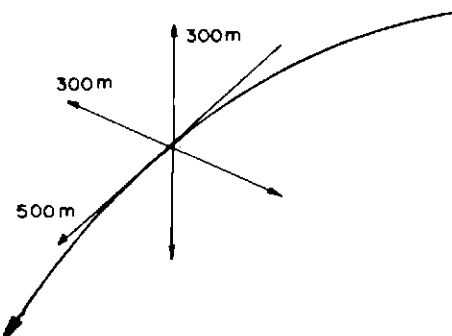


Fig. 2.2 - Precisão das efemérides transmitidas.

Os dados de efemérides estão referenciados ao Sistema Geocêntrico de Greenwich e são transmitidos a uma taxa de um registro a cada minuto.

2.2 - O INSTRUMENTO HRV-SPOT

O satélite SPOT carrega dois instrumentos idênticos denominados HRV ("Haute Resolution Visible" - Alta Resolução no Visível). Cada instrumento por sua vez é dotado de dois sensores: um

multiespectral, com três bandas e outro pancromático. É usual, no entanto, empregar o termo sensor HRV-SPOT ao invés de instrumento HRV-SPOT, sendo que neste caso o sensor engloba tanto o modo multiespectral quanto o pancromático.

As grandes inovações do sensor HRV referem-se ao tipo de detetor e varredura utilizados, bem como à possibilidade de visadas oblíquas, as quais permitem a formação de pares estereoscópicos. Além disso, houve um avanço significativo quanto ao aspecto da resolução espacial.

Quanto às características principais de um sensor multiespectral, o sensor HRV-SPOT não trouxe inovações ou avanços, apresentando um número reduzido de bandas espectrais (apenas três) e cobrindo uma região do espectro eletromagnético do verde ao infravermelho próximo (duas bandas no visível e uma no infravermelho próximo). As três bandas do sensor multiespectral HRV são muito semelhantes às bandas 2, 3 e 4 do sensor TM-LANDSAT.

Ao contrário dos sensores MSS e TM-LANDSAT o sensor HRV-SPOT não apresenta um dispositivo de varredura mecânica, sendo composto por câmaras de CCD ("Charge Coupled Device") do tipo varredura eletrônica onde todos os detetores da barra de CCD, correspondentes a uma varredura, são amostrados simultaneamente. Este dispositivo, como será visto no Capítulo 3, conduz a uma maior confiabilidade da geometria interna da imagem, pois apresenta menor grau de distorção.

A resolução espacial do sensor está associada ao modo de operação: 10 metros no modo pancromático e 20 metros no modo multiespectral. Estes números significam um grande avanço, principalmente, em termos de aplicações cartográficas. Aliás, esta melhoria da resolução espacial aliada a maior estabilidade geométrica das câmaras CCD, possibilitam o emprego das imagens do sensor HRV-SPOT como base para o mapeamento ou atualização do mapeamento sistemático

em escalas até a de 1:50.000 e para mapeamentos temáticos e especiais em escalas até a de 1:25.000 (Guichard, 1983).

Outro aspecto importante a destacar no sensor HRV-SPOT é a possibilidade de visadas oblíquas que proporcionam a definição de pares estereoscópicos e permitem uma maior repetibilidade na aquisição de imagens sobre determinadas regiões de interesse, em detrimento de outras.

A formação de pares estereoscópicos vai permitir que, pela primeira vez, seja possível a confecção de bases cartográficas plani-altimétricas a partir de dados transmitidos por sensores remotos orbitais. A formação destes pares possibilita a restituição plani-altimétrica dos dados.

2.2.1 - O MODO MULTIESPECTRAL

No modo multiespectral, de resolução espacial 20 metros, o sensor HRV apresenta um campo de visada instantânea de $2,4 \times 10^{-5}$ rad, e um campo de visada de $4,13^\circ$, correspondente ao recobrimento de uma faixa de 60 km, quando da visada vertical (Figura 2.3).

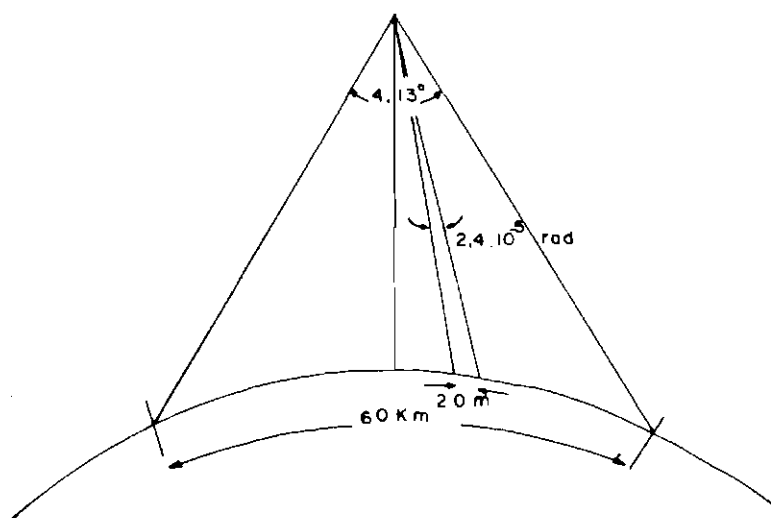


Fig. 2.3 - Campo de visada do sensor HRV-multiespectral.

A resolução espacial de 20 metros é nominal e vale para o detetor que está instantaneamente correspondendo à visada vertical. Para uma imagem tomada na visada vertical esta resolução varia muito pouco, indo de 20 metros a 20,005 metros. As maiores variações ocorrem para as imagens em tomadas oblíquas.

O sensor multiespectral apresenta três bandas, correspondentes ao espectro verde e vermelho, no visível, e ao espectro do infravermelho próximo. A largura das faixas é de aproximadamente 100 nanômetros (Tabela 2.2).

Uma varredura é formada a partir de quatro barretes de 1.500 detetores cada, que são amostrados a cada 1,504 milissegundos. A cada 3,008 milissegundos é transmitida uma varredura composta de 3.000 elementos de imagem, onde cada elemento de imagem é determinado a partir de uma média de quatro amostras de detetores (Figura 2.4). A frequência de varredura é então de 332,447 varreduras por segundo.

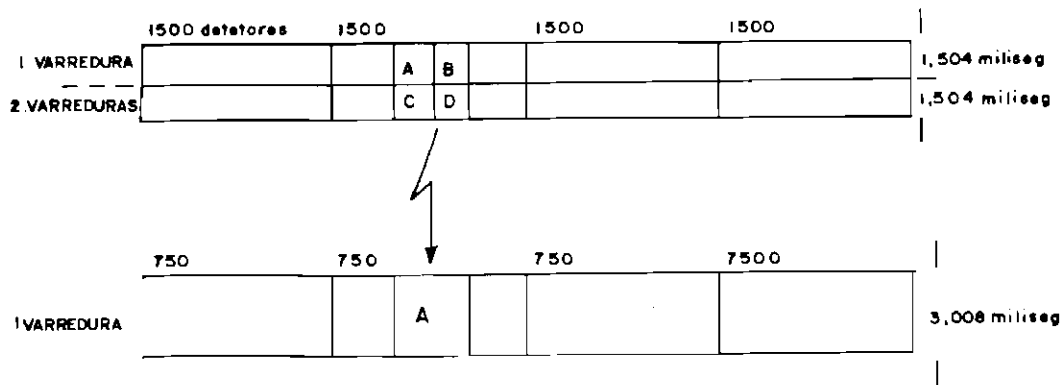


Fig. 2.4 - Formação da varredura multiespectral.

Cada elemento da imagem multiespectral é amostrado, codificado e transmitido em 8 bits (256 níveis de cinza). Assim a taxa de transmissão de dados no modo multiespectral é de aproximadamente 24 Mbits/seg (3 bandas x 3.000 elementos por varredura x 8 bits por

elemento / 3,008 milissegundos por varredura). Na realidade a taxa de transmissão é ligeiramente superior a este valor devido à transmissão de dados auxiliares.

Uma cena multiespectral é formatada em 3.000 linhas (varreduras) de 3.000 pontos (elementos) cada, num total de 27.000.000 de pontos (3 bandas x 3.000 linhas x 3.000 pontos) em 9,024 segundos (3.000 linhas x 3,008 milissegundos por linha) (Figura 2.5).

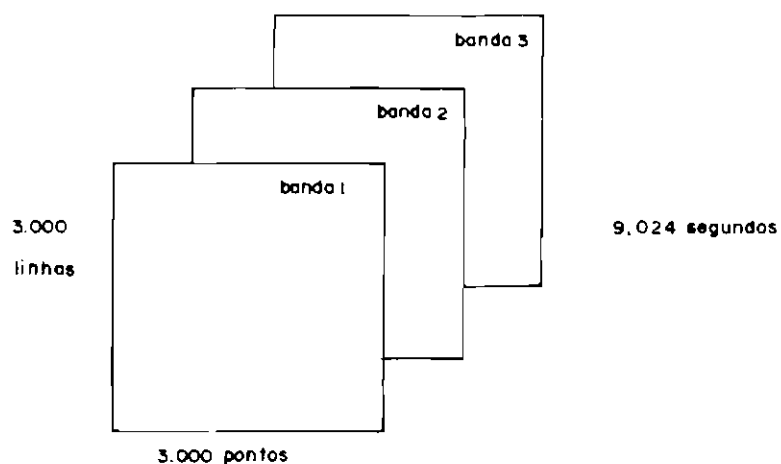


Fig. 2.5 - Formatação da cena multiespectral.

TABELA 2.2

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SENSOR HRV-SPOT MULTIESPECTRAL

Tipo de varredura	eletrônica
Resolução espacial nominal (m)	20
Campo de visada instantânea (rad)	$2,4 \times 10^{-5}$
Campo de visada (grau)	4,13
Largura da faixa imageada (km)	60
Nº de bits por elemento de imagem	8
Nº de níveis de cinza	256
Taxa de transmissão de dados (Mbits/seg)	50
Bandas espectrais (comprimento de onda em μm)	0,490 a 0,590 verde 0,610 a 0,690 vermelho 0,770 a 0,900 infravermelho próximo

2.2.2 - O MODO PANCROMÁTICO

No modo pancromático, de resolução espacial de 10 metros, o sensor HRV apresenta um campo de visada instantânea de $1,2 \times 10^{-5}$ rad, e um campo de visada de $4,13^\circ$, correspondendo também a um recobrimento de 60 km no terreno, quando da visada vertical (Figura 2.6).

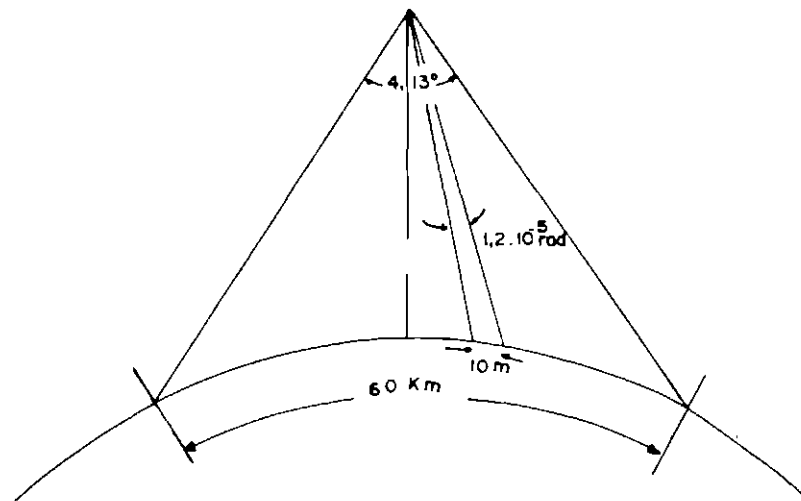


Fig. 2.6 - Campo de visada do sensor HRV-pancromático.

De modo semelhante ao modo multiespectral a resolução espacial de 10 metros é nominal, valendo para o detetor que está instantaneamente correspondendo a visada vertical. Para uma cena obtida com visada vertical a resolução varia de 10 metros a 10,0025 metros. As maiores variações ficam por conta das imagens em visada oblíqua.

A banda pancromática abrange uma faixa do espectro que vai do verde ao infravermelho próximo, com uma largura de aproximadamente 200 nanômetros (Tabela 2.3).

Uma varredura é formada a partir de quatro barretes de 1.500 detetores cada, que são amostrados e transmitidos a cada 1,504 milissegundos. A frequência de varredura é então de 664,894 varreduras por segundo.

Cada elemento da imagem pancromática é amostrado em 8 bits, porém, é codificado e transmitido em 6 bits (64 níveis de cinza). Esta codificação é necessária para manter a taxa de

transmissão em 24 Mbits/seg. (6.000 elementos por varredura x 6 bits por elemento / 1,504 milissegundos por varredura).

Na estação terrena, a imagem após ser recebida e gravada, pode ser decodificada linearmente em 64 níveis de cinza ou, utilizando um código de decodificação, em 256 níveis de cinza.

A lei de codificação (DPCM - "Delta Pulse Code Modulation"), para a imagem SPOT, é a seguinte: para cada conjunto de três elementos de imagem é transmitido o nível de cinza do primeiro elemento, em oito bits e, para os outros dois, são transmitidas, em cinco bits, as diferenças entre os níveis de cinza destes elementos de imagem e a média dos níveis de cinza dos primeiros elementos deste conjunto e do conjunto seguinte. Dessa forma, para cada três elementos de imagem são necessários 18 bits.

Uma cena pancromática é formatada em 6.000 linhas (varreduras) de 6.000 pontos (elementos) cada, num total de 36.000.000 pontos em 9,024 segundos (6.000 varreduras x 1,504 milissegundos por varredura) (Figura 2.7).

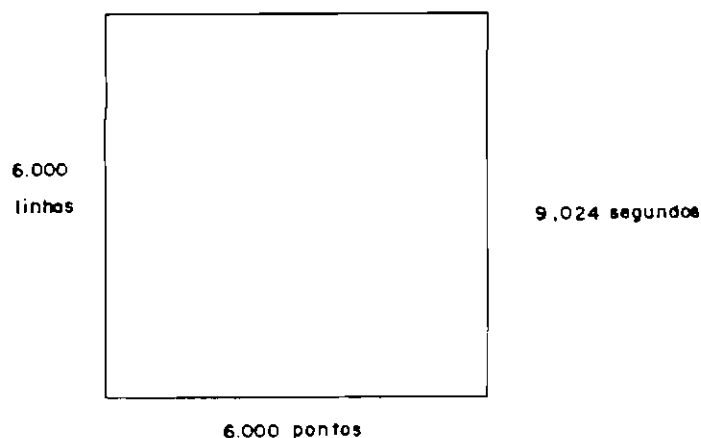


Fig. 2.7 - Formatação da cena pancromática.

TABELA 2.3

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SENSOR HRV-SPOT PANCROMÁTICO

Tipo de varredura	eletrônica
Resolução espacial nominal (m)	10
Campo de visada instantânea (rad)	$1,2 \times 10^{-5}$
Campo de visada (grau)	4,13
Largura da faixa imageada (km)	60
Nº de bits por elemento de imagem	6
Nº de níveis de cinza	64 ou 256 (DPCM)
Taxa de transmissão de dados (Mbits/seg)	50
Bandas espectrais (comprimento de onda em μm)	0,500 a 0,710

2.2.3 - A VISADA OBLÍQUA

Conforme citado anteriormente, o satélite SPOT apresenta a possibilidade de imagens tomadas fora do nadir (visadas oblíquas ou laterais), através do movimento de um espelho em seu sistema ótico (Figura 2.8). Este espelho permite a tomada de imagens com visadas oblíquas de $\pm 27^\circ$, à direita ou à esquerda da visada nadir ou vertical, em passos de $0,6^\circ$ em $0,6^\circ$ (91 posições: da posição 3 (à esquerda) à posição 93 (à direita) (Figura 2.9).

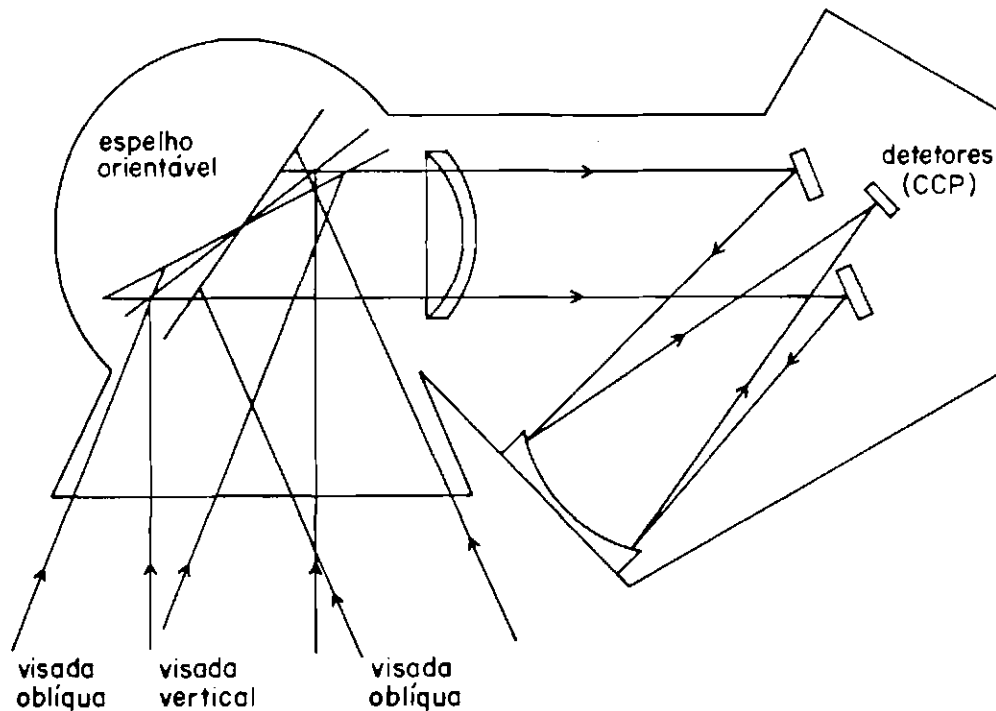


Fig. 2.8 - Concepção da visada lateral do satélite SPOT.

À medida que a visada se afasta do nadir a resolução espacial e a largura da faixa imageada sofrem alterações significativas. Na inclinação máxima, a visada se afasta do nadir de aproximadamente 435 km (Figura 2.9), e neste caso as dimensões do elemento de imagem variam de 20 x 25,16 metros a 20 x 27,63 metros, no modo multiespectral e de 10 x 12,58 metros a 10 x 13,82 metros, no modo pancromático. Em ambos os casos a largura da faixa imageada é de 80 km.

A visada oblíqua permite a formação de pares estereoscópicos, extremamente importante para aplicações cartográficas, principalmente em se tratando de mapeamento de regiões onde inexistam documentos cartográficos. Com as inclinações máximas do espelho à direita e à esquerda é possível a obtenção de uma relação base/altura (B/H) superior a 1 ($2 \times 435 / 822,145$). Esta relação B/H permite uma restituição altimétrica da ordem de 0,5 pixel (10 metros

no modo multiespectral e 5 metros no modo pancromático), totalmente compatível com a precisão planimétrica, em termos de documentos cartográficos (Denis et al., 1986).

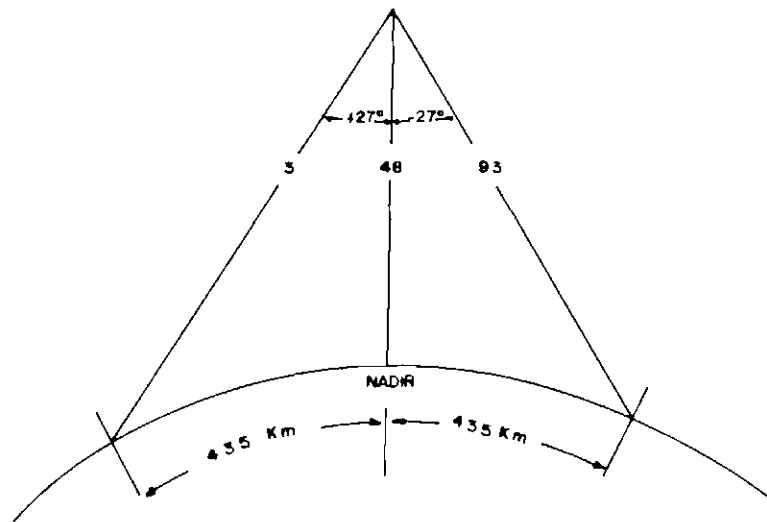


Fig. 2.9 - As possibilidades de movimento do espelho.

A visada oblíqua permite, ainda, que um ponto seja visitado diversas vezes durante um ciclo. No equador o número de visitas possíveis é 7 (1 visita a cada 3,7 dias), aumentando em direção ao pólo, em função da maior proximidade das órbitas base adjacentes. No paralelo 45° é possível se visitar um ponto 11 vezes dentro de um ciclo (1 visita a cada 2,4 dias) (Figura 2.10) (Brachet, 1986).

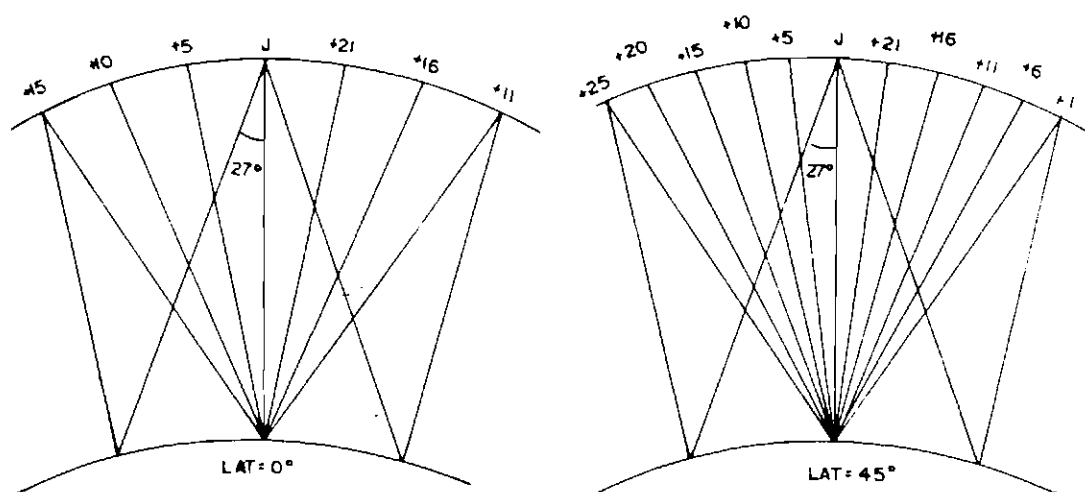


Fig. 2.10 - Repetitividade da visada oblíqua.

Deve, no entanto, ficar claro que o aumento na frequência de imageamento de uma determinada região implica na diminuição da frequência de imageamento de outra, ou de outras regiões.

Para garantir o total recobrimento da Terra em 26 dias (1 ciclo) é necessário que o satélite esteja configurado no modo denominado acoplado (Figura 2.11). Este modo de operação corresponde ao satélite operar o instrumento HRV₁ na posição 45 (1,8° à esquerda do nadir) e o instrumento HRV₂ na posição 51 (1,8° à direita do nadir). Nesta situação os dois instrumentos, de forma conjugada, varrem uma faixa da Terra equivalente a 117 km.

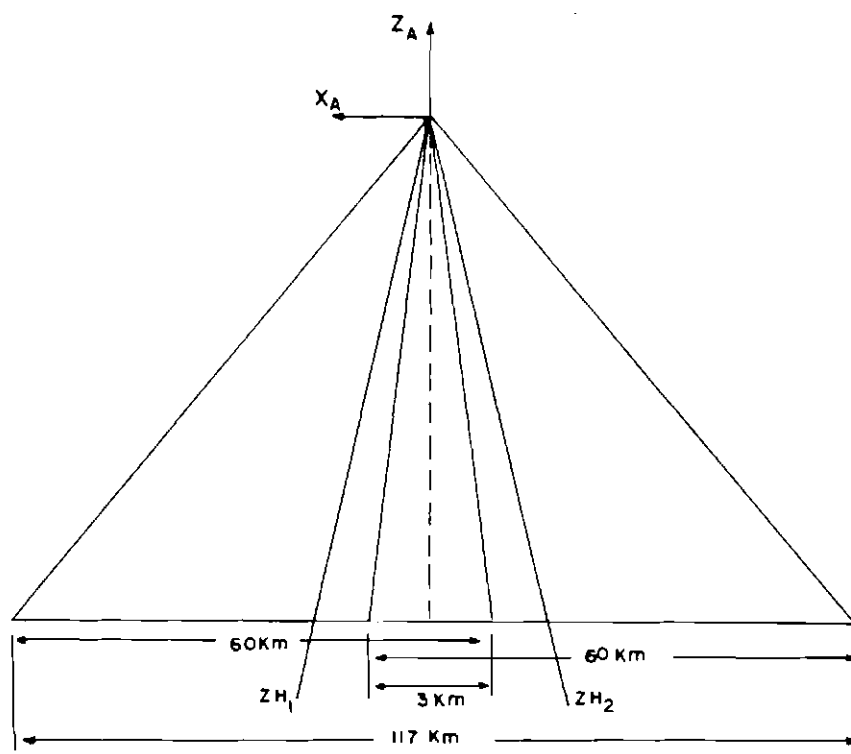


Fig. 2.11 - Configuração acoplada dos instrumentos.

A imagem inclinada avulsa é importante, ainda, para o estabelecimento de uma melhor análise sobre o comportamento espectral dos alvos, sujeitos a influências do relevo e a diferentes ângulos de reflexão solar.

Estes são os principais benefícios advindos da visada oblíqua, não devendo ser incluído neste grupo algo relativo a cobertura de nuvens. O sensor HRV-SPOT não apresenta nenhuma inovação quanto ao problema de cobertura de nuvens.

Associada à inclinação do espelho está o termo incidência, que inclusive aparece nas imagens do sensor HRV. A incidência é definida como o ângulo entre o vetor de visada do satélite, para o ponto central da imagem e a vertical do lugar (Figura 2.12).

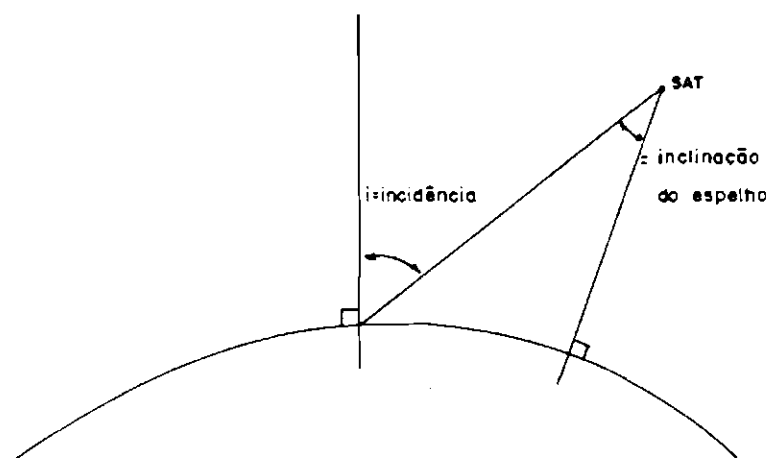


Fig. 2.12 - Ângulo de incidência da tomada de imagem.

2.2.4 - O MODO DE OPERAÇÃO DO SATÉLITE E DOS INSTRUMENTOS

O satélite SPOT tem a capacidade de transmitir apenas duas imagens de cada vez (capacidade de transmissão de 50 Mbits/segundo). Assim, dos quatro sensores (dois por instrumento), apenas dois podem estar ativos, o que indica que existem seis modos de operação dos instrumentos (C_4^2) (Tabela 2.4).

TABELA 2.4

MODOS DE OPERAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

HRV ₁	XS	X		X		X	
	PAN		X		X	X	
HRV ₂	XS	X		X			X
	PAN		X		X		X

Outra variável do sistema é o ângulo de inclinação do espelho, de cada instrumento, que pode assumir 91 diferentes valores.

Sendo assim, o satélite pode ter $91 \times 91 \times 4 + 91 \times 2 = 33.306$ possíveis configurações, combinando modo de operação dos instrumentos e posição do espelho.

Para cada passagem do satélite só é possível configurar o satélite em cinco das possíveis configurações. O tempo máximo de transição entre duas configurações equivale a aproximadamente duas cenas e ocorre para uma mudança do espelho da posição 3 para a 93, ou vice-versa.

2.3 - OS SATÉLITES SPOT - 2, 3, 4 e 5

Os satélites SPOT-2 e 3 foram planejados para dar prosseguimento ao projeto SPOT sem contudo, trazerem inovações; são idênticos ao satélite SPOT-1. O satélite SPOT-2 concluiu sua fase de integração em maio de 1988 e está planejado para ser lançado no início de 1989. A fase industrial do SPOT-3 está em andamento e ele deverá estar pronto para ser lançado no início de 1990.

Já os satélites SPOT-4 e 5 deverão trazer grandes inovações em relação aos três primeiros satélites da série.

O instrumento HRV deverá receber mais uma banda multiespectral no espectro do infravermelho médio (1,580 a 1,750 microns) sendo rebatizado para HRVIR ("Haute Resolution Visible et Infra-Rouge" - Alta Resolução no Visível e no Infra-Vermelho). Isto obrigará a uma codificação dos dados em 6 bits para manter a taxa de transmissão por canal em 25 Mbits/seg (4 bandas x 3.000 elementos por varredura x 6 bits por elemento / 3,008 milissegundos por varredura). Da mesma forma que ocorre atualmente com os dados pancromáticos, os dados multiespectrais transmitidos pelos satélites SPOT-4 e 5 poderão ser decodificados nos Centros de Processamento de Imagens em 256 níveis de cinza (Arnaud and Leroy, 1988).

O modo pancromático será substituído pela possibilidade de transmissão da banda 2 (0,610 a 0,690 microns) simultaneamente em

20 e 10 metros. Isto vai possibilitar o registro automático entre bandas multiespectrais com resoluções espaciais distintas, e imageadas pelo mesmo instrumento. As demais características do instrumento HRV deverão ser preservadas (Tabela 2.5).

TABELA 2.5

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SENSOR HRVIR

Tipo de varredura	eletrônica
Resolução espacial nominal (m)	20
Campo de visada instantânea (rad)	$2,4 \times 10^{-5}$
Campo de visada (grau)	4,13
Largura da faixa imageada (km)	60
Nº de bits por elemento de imagem	6
Nº de níveis de cinza	64 ou 256 (DPCM)
Taxa de transmissão de dados (Mbits/seg)	50
Bandas espectrais (comprimento de onda em μm)	0,490 a 0,590 verde 0,610 a 0,690 vermelho * 0,770 a 0,900 infravermelho próximo 1,580 a 1,750 infravermelho médio

* A banda 2 pode ser amostrada em 10 metros, com um campo de visada instantânea de $1,2 \times 10^{-5}$ rad.

Os satélites SPOT-4 e 5 apresentarão ainda um novo instrumento, denominado VGT ("Vegetation" - Vegetação). Este instrumento foi projetado para otimizar o acompanhamento de recursos naturais e renováveis e de fenômenos que requerem um estudo mais freqüente. Ele é vocacionado, principalmente, para aplicações em vegetação e agricultura e, em segundo plano, para aplicações em oceanografia.

A resolução espacial no nadir será de 1,15 km correspondente a um campo de visada instantâneo de $1,4 \times 10^{-3}$ rad, degradando em direção às extremidades da visada. O campo de visada será de 100° (50° a leste e a oeste em relação ao nadir) e nas bordas da imagem a resolução espacial vai a aproximadamente 4 km. A faixa coberta pelo instrumento será de 2.200 km.

A resolução radiométrica será de 0,1% acarretando numa codificação de cada elemento de imagem em 10 bits (1024 níveis de cinza). A taxa de transmissão de dados será de 1 Mbit/seg (Courtois, 1986).

O sensor VGT será dotado de cinco bandas espectrais, as quatro do sensor HRVIR mais uma banda no espectro relativo ao azul (visível), com comprimento de onda de 0,430 a 0,470 microns.

O satélite terá um gravador com capacidade de gravação de 256 Mbits, o que permite a transmissão dos dados em dois modos: o modo Observação Mundial (OM) e o modo Observação Regional (OR).

No modo OM, os dados sobre determinada região são gravados no gravador de bordo, subamostrados para uma resolução espacial de 4,6 km, a partir da média de um conjunto de 4×4 elementos de imagem. Posteriormente os dados podem ser transmitidos para uma Estação de Recepção de Dados SPOT.

No modo OR, os dados podem ser armazenados no gravador de bordo ou serem transmitidos em tempo real para uma estação terrena. Em ambos os casos os dados são transmitidos com a resolução espacial de 1,15 km.

O instrumento VGT vai permitir a cobertura diária de toda a superfície da Terra. A Tabela 2.6 apresenta as principais características do sensor VGT.

TABELA 2.6

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SENSOR VGT

Tipo de varredura	mecânica
Resolução espacial nominal (km)	1,15
Campo de visada instantânea (rad)	$1,4 \times 10^{-3}$
Campo de visada (grau)	100
Largura da faixa imageada (km)	2.200
Nº de bits por elemento de imagem	10
Nº de níveis de cinza	1024
Taxa de transmissão de dados (Mbits/seg)	1
Bandas espectrais (comprimento de onda em μm)	0,430 a 0,470 azul 0,490 a 0,590 verde 0,610 a 0,690 vermelho 0,770 a 0,900 infravermelho próximo 1,580 a 1,750 infravermelho médio

CAPÍTULO 3

PRINCIPAIS FONTES DE DISTORÇÕES GEOMÉTRICAS

O sistema de formação de imagens de satélite pode ser decomposto em três componentes principais: a plataforma, o sensor remoto ou instrumento e o objeto imageado, no caso a Terra (Friedmann et al., 1983). Associado a cada uma destas componentes existem diversas distorções sistemáticas responsáveis pela degradação da qualidade geométrica das imagens.

Essas distorções devem ser bem conhecidas, inclusive estudando-se a correlação entre elas, de modo a permitir a elaboração de um modelo matemático que permita inverter o processo de degradação com a finalidade de restaurar a fidelidade geométrica da imagem.

A precisão desta restauração está diretamente associada à precisão com que são conhecidos os parâmetros responsáveis pela degradação e ao modelo matemático empregado.

Neste capítulo serão analisadas as principais fontes de distorções sistemáticas, e os efeitos daí decorrentes, enquanto que os modelos matemáticos de restauração serão apresentados no Capítulo 4.

3.1 - DISTORÇÕES INERENTES À PLATAFORMA

As distorções inerentes à plataforma são comuns a todos os sensores, sendo característica do movimento do satélite que apresenta diversos graus de liberdade. Apesar de comuns, a correlação destas distorções com as distorções inerentes ao sensor remoto varia de intensidade em função das características do sensor principalmente quanto ao tipo de varredura: eletrônica ou mecânica. É importante destacar que a formação de uma imagem não é instantânea e o comportamento dinâmico da plataforma tem grande influência quanto à geometria interna da imagem. Esse comportamento dinâmico afeta de forma diferenciada sensores de varredura eletrônica (HRV-SPOT) e

sensores de varredura mecânica (MSS e TM-LANDSAT); e no caso de varredura mecânica, os efeitos são diferentes em função do movimento do espelho ser ativo em apenas um sentido (MSS-LANDSAT) ou nos dois sentidos (TM-LANDSAT).

A liberdade do movimento do satélite, responsável pela degradação geométrica inerente à plataforma, pode ser associada à variação da velocidade e altitude, à atitude e variação da atitude do satélite.

O sistema satélite-sensor é projetado de tal forma que se o satélite conseguisse se manter a uma velocidade constante (velocidade nominal) e a uma altitude constante (altitude nominal) as varreduras adjacentes estariam se formando uma justaposta a outra, e com escala constante. A velocidade nominal é função da frequência e da largura da varredura e da altitude nominal do satélite.

No entanto, pelas próprias características do movimento de um corpo descrevendo uma órbita elíptica, obedecendo às leis de Kepler, tanto a velocidade quanto a altitude sofrem variações. Além disso, as perturbações gravitacionais sofridas pela plataforma contribuem para tornar estas variações mais frequentes.

Tais variações podem ser analisadas a partir da observação dos dados de efemérides (posição e velocidade) transmitidas pelo satélite. A precisão dos dados de efemérides e a taxa de transmissão destes dados variam de satélite para satélite.

Em alguns casos, ao invés das efemérides, o satélite transmite os parâmetros orbitais ou Keplerianos (semi-eixo maior a , excentricidade e , ascensão reta do nodo ascendente Ω , inclinação i , argumento do perigeu ω e anomalia média n), que podem ser, então, convertidos em dados de posição e velocidade (Gordon, 1981).

O satélite, dentro de sua órbita, apresenta ainda três graus de liberdade que correspondem a rotações em torno dos eixos

tangente, normal ou radial à órbita (Figura 2.1). A este conjunto de rotações denomina-se atitude ou orientação do satélite.

A atitude é composta por três ângulos de rotação: rolamento (R), arfagem (A) e guinada (G). O rolamento é definido como a rotação em torno do eixo tangente à órbita, a guinada como a rotação em torno do eixo normal à órbita e a arfagem como a rotação em torno do eixo normal aos dois anteriores (eixo radial).

A atitude e, principalmente a variação da atitude são também fontes de distorções ligadas à plataforma. De forma semelhante às efemérides, os dados de atitude são transmitidos pelo satélite com frequência e precisão que variam de satélite para satélite.

3.1.1 - OS DADOS DE EFEMÉRIDES

Os dados de efemérides do satélite SPOT são transmitidos como dados auxiliares para o Centro de Controle de Missão da França onde são processados e retransmitidos para as estações terrenas SPOT, via linha telex. Eles estão referenciados ao Sistema Geocêntrico de Greenwich e são retransmitidos a uma taxa de um registro de dados (XS, YS, ZS, X'S, Y'S, Z'S) a cada minuto. A precisão das efemérides é de 500 metros ao longo da órbita e de 300 metros transversal e radial à órbita.

Para interpolação dos dados é sugerido utilizar o interpolador de Lagrange de sétima ordem (Bobo, 1983). Neste caso é necessário o conhecimento de oito registros de dados para a interpolação (Figura 3.1).

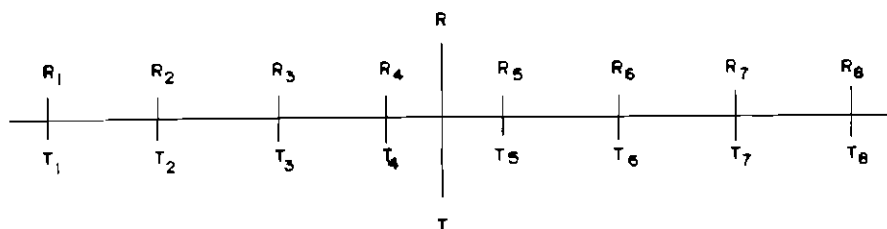


Fig. 3.1 - Interpolação das efemérides.

Na Figura 3.1 $R \in \{XS, YS, ZS, \dot{X}S, \dot{Y}S, \dot{Z}S\}$ e $t_i - t_{i-1} = 1$ minuto.

Para determinação de R tem-se:

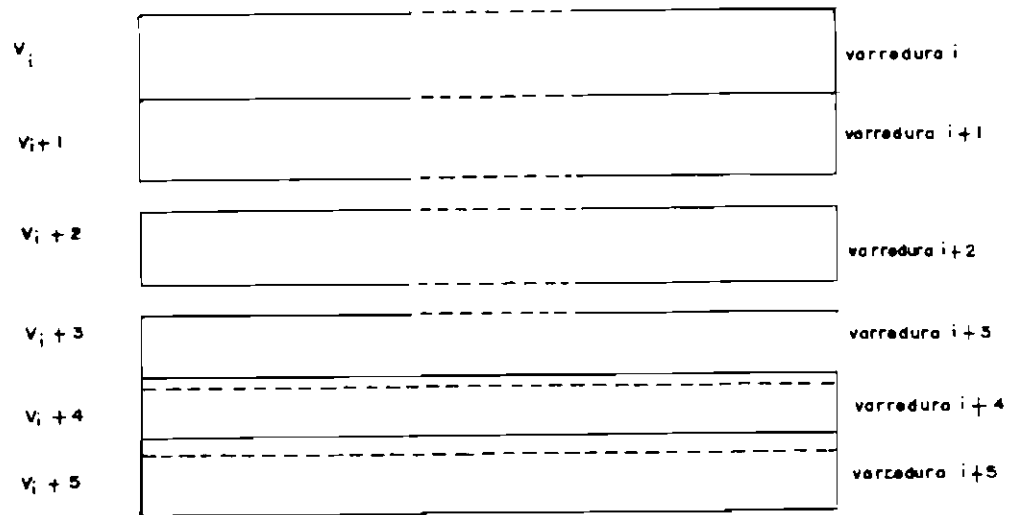
$$R = \sum_{i=1}^8 R_i \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^8 \frac{t - t_j}{t_i - t_j} \quad (3.1)$$

Como o tempo equivalente a uma cena SPOT é de 9,024 segundos, são necessários oito ou nove registros de dados de efemérides para determinação da posição e velocidade do satélite referentes a cada linha da imagem. A variação destes parâmetros responde por parte das degradações geométricas inerentes à plataforma.

3.1.1.1 - VARIAÇÃO DA VELOCIDADE

A variação da velocidade da plataforma ao longo da imagem, em relação à velocidade nominal, provoca superposições negativas ou positivas, entre varreduras consecutivas, provocando uma variação na escala da imagem no sentido transversal à varredura (Figura 3.2). Se a velocidade for menor que a nominal haverá superposição positiva entre as varreduras, com parte da superfície da

Tera sendo imageada duas vezes. No caso da velocidade ser maior que a nominal a superposição será negativa, criando faixas na Terra que não são imageadas. A variação do módulo da velocidade representa uma distorção de média frequência.



$$v_{i+4} = v_{i+5} < v_i = v_{i+1} = v_{\text{nominal}} < v_{i+2} = v_{i+3}$$

Fig. 3.2 - Variação da velocidade.

Neste ponto é importante introduzir o conceito de ponto subsatélite, que vem a ser a projeção normal do satélite sobre a superfície da Terra. Na realidade o que vai definir a justaposição ou não das varreduras adjacentes é a velocidade do ponto subsatélite associada à altitude do satélite, ou seja, o satélite pode ter movimentos conjugados que não alteram a velocidade do ponto subsatélite: aumento ou decréscimo simultâneo da velocidade e altitude do satélite.

Quando ocorre a superposição positiva, as áreas representadas na imagem corrigida correspondem às áreas úteis das varreduras brutas, sendo eliminadas as duplicidades de imageamento. No caso de superposição negativa, as áreas não imageadas são inferidas a partir de interpolação das áreas imageadas.

3.1.1.2 - VARIAÇÃO DA ALTITUDE

A variação da altitude, em relação à altitude nominal provoca um efeito de variação da escala da varredura semelhante a uma fotografia aérea. A variação da escala no sentido transversal à varredura é, no entanto, mascarado pelo sistema, em função da velocidade do satélite. O efeito que fica é o da variação da escala ao longo da varredura (Figura 3.3). Esta distorção é caracterizada por uma variação de média frequência (Meira Filho, 1976).

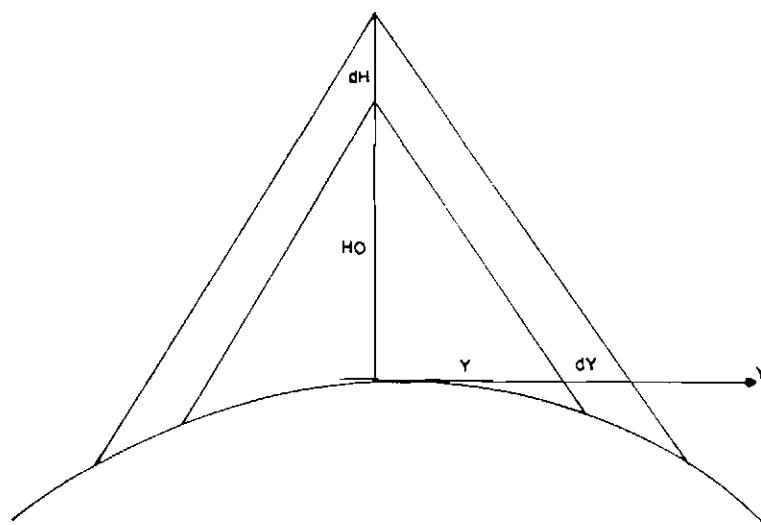


Fig. 3.3 - Variação da altitude.

3.1.2 - OS DADOS DE ATITUDE

Os dados de atitude do satélite SPOT são transmitidos como dados auxiliares juntamente com os dados de imagem, a uma taxa de transmissão de um registro de dados ($\dot{R}, \dot{A}, \dot{G}$) a cada 0,125 segundos. Como citado anteriormente, os dados transmitidos referem-se à variação da atitude em relação ao tempo ($\dot{A} = dA/dt$) e para obtenção da atitude em si é necessário o emprego de um integrador. A constante de integração dos dados de atitude é determinada convencionando-se que a atitude referente ao primeiro registro de dados transmitido é nula. A partir daí, e considerando-se que os dados transmitidos variam linearmente entre os instantes referentes a dois registros consecutivos, pode-se

integrar e obter os dados de atitude, utilizando-se a regra do trapézio (Figura 3.4).

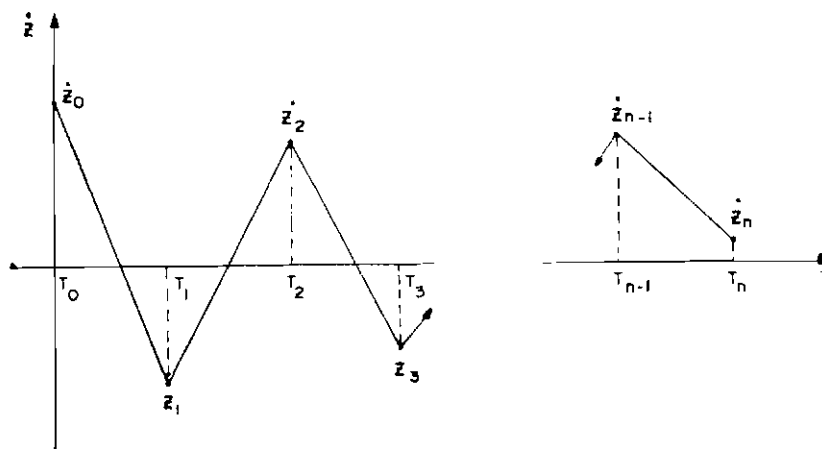


Fig. 3.4 - Integração dos dados de atitude.

$$Z_0 = 0 \quad (3.2)$$

$$Z_n = \left(\sum_{i=1}^{n-1} \dot{Z}_i + \frac{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_n}{2} \right) \cdot \Delta t \quad (3.3)$$

onde $\Delta t = t_{i-1}$ e $Z \in \{R, A, G\}$.

Posteriormente, no processo de correção de cada imagem, considera-se que a atitude no centro da cena é nula e, então, subtraem-se os valores de atitude, resultantes da integração, referentes a cada linha, do valor da atitude do centro da cena.

Para determinação da atitude de um ponto fora do espaço amostral, recomenda-se a interpolação linear a partir dos dois registros de dados mais próximos ao instante desejado.

A variação da atitude nos satélites de varredura eletrônica é menor do que nos satélites de varredura mecânica e, além disso, os dados são conhecidos com melhor precisão, uma vez que a plataforma está isenta das trepidações provocadas pelo movimento do espelho (Guichard, 1983).

3.1.2.1 - DISTORÇÃO PROVOCADA PELO ROLAMENTO

Um ângulo de rolamento (R) constante provoca efeito semelhante a um deslocamento da imagem para a esquerda ou para a direita (na direção da varredura), não afetando, de forma sensível, a geometria interna da mesma. No entanto, a variação deste ângulo ao longo da cena provoca o não alinhamento entre varreduras consecutivas (Figura 3.5). Esta distorção, que afeta a imagem apenas no sentido da varredura, pode ser considerada uma distorção de média frequência. Para imagens em visada oblíqua, o ângulo de rolamento, mesmo quando constante, provoca distorções na geometria interna das imagens.

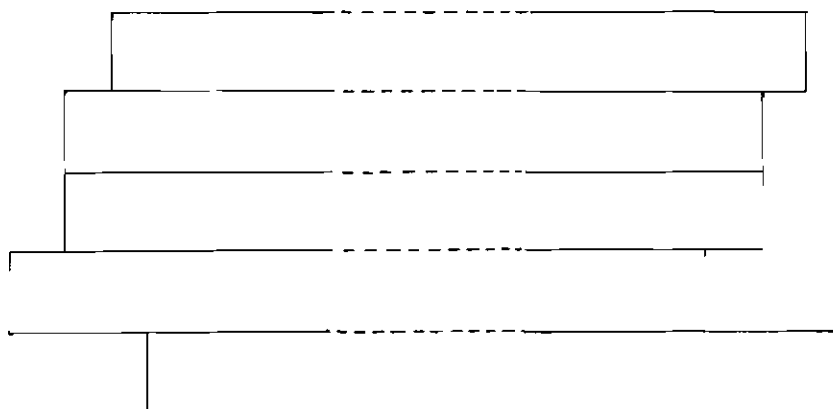


Fig. 3.5 - Variação do ângulo de rolamento.

3.1.2.2 - DISTORÇÃO PROVOCADA PELA ARFAGEM

De forma semelhante ao rolamento, porém, na direção transversal à varredura, um ângulo constante referente à arfagem (A) provoca um efeito de deslocamento da imagem, não afetando de forma sensível a geometria interna da mesma. Já a variação da arfagem ao longo da cena provoca superposições positivas ou negativas entre

varreduras consecutivas, semelhante ao efeito da variação da velocidade. Um aumento no valor absoluto da arfagem provoca superposição negativa enquanto que uma diminuição provoca superposição positiva (Figura 3.6). O efeito provocado pela arfagem atua apenas no sentido transversal à varredura, e é considerado de média frequência.

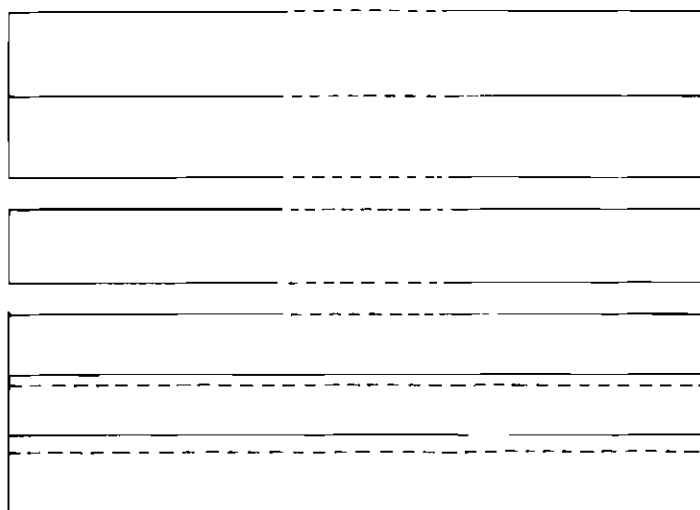


Fig. 3.6 - Variação do ângulo de arfagem.

3.1.2.3 - DISTORÇÃO PROVOCADA PELA GUINADA

Diferentemente das demais componentes da atitude a guinada (G), mesmo quando constante, é responsável por distorções representadas por um não alinhamento das varreduras consecutivas, devido à rotação sofrida por cada uma delas (Figura 3.7.a). A variação do ângulo de guinada provoca superposições positivas e negativas entre as varreduras, resultando um efeito semelhante a um leque (Figura 3.7.b). Estas distorções atuam tanto no sentido da varredura quanto no sentido transversal à varredura, e são, como as demais componentes, distorções de média frequência.

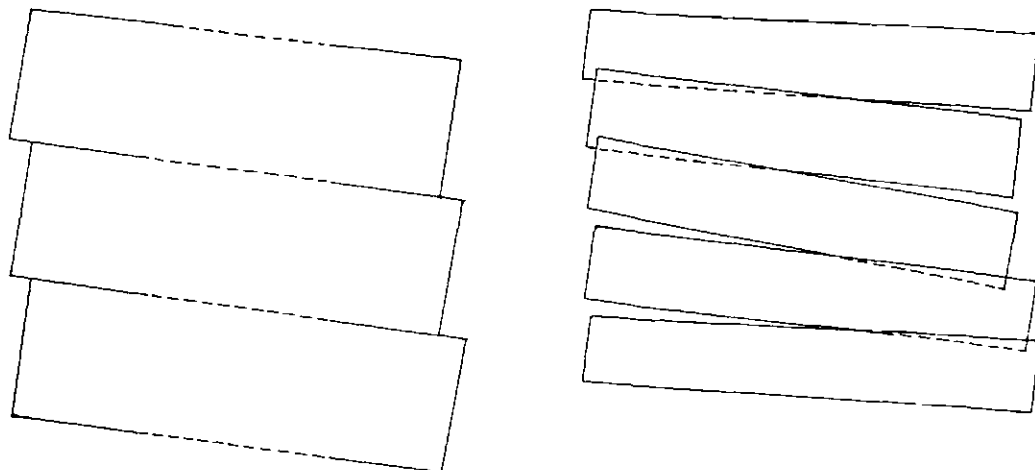


Fig. 3.7 - Guinada: efeito (a) e variação (b).

3.2 - DISTORÇÕES INERENTES AO SENSOR (INSTRUMENTO)

Esta classe de distorções é a que varia de sensor para sensor, formando no entanto, conjuntos comuns para sensores que apresentam características semelhantes. O aspecto que melhor discrimina, quanto à geometria, um sensor do outro é o tipo da varredura.

Os sensores de varredura mecânica têm um conjunto de distorções que diferem do conjunto de distorções associadas aos sensores de varredura eletrônica. A grande diferença entre estes tipos de sensores é que no sistema de varredura eletrônica, característica dos sensores do tipo CCD ("Charge Coupled Device"), todos os pontos de uma varredura são amostrados instantaneamente, de forma semelhante a uma fotografia aérea, enquanto no sistema de varredura mecânica um espelho móvel varre a superfície da Terra imageando-a ponto a ponto.

Com intuito de comparar quanto ao aspecto da fidelidade geométrica, serão apresentadas distorções inerentes a sensores de varredura mecânica (MSS e TM-LANDSAT) e inerentes a sensores de varredura eletrônica (HRV-SPOT). Assim, será possível observar o

avanço que representa sensores de varredura eletrônica quanto ao aspecto de geometria interna da imagem.

3.2.1 - DISTORÇÕES RELATIVAS A UM SENSOR DE VARREDURA MECÂNICA

Nos sensores de varredura mecânica a dinâmica do movimento simultâneo entre plataforma e espelho do sistema de imageamento, aliada ao próprio comportamento do espelho durante seu movimento ativo são fatores que contribuem significativamente para o processo de degradação geométrica da imagem. Apresenta-se a seguir, de forma isolada cada uma das fontes de distorção associadas ao sensor de varredura mecânica.

3.2.1.1 - CISALHAMENTO DA VARREDURA

O cisalhamento da varredura fica caracterizado pelo movimento simultâneo do satélite e do espelho responsável pela varredura. Seu efeito se faz notar como um arrastamento no sentido transversal à varredura (Figura 3.8). A variação deste arrasto é praticamente linear, caracterizando a distorção como de baixa frequência.

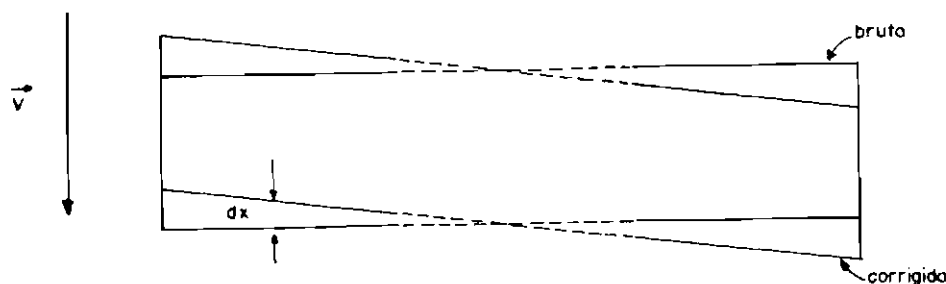


Fig. 3.8 - Cisalhamento da varredura.

3.2.1.2 - VARIAÇÃO DO TEMPO ÚTIL DA VARREDURA

No movimento ativo do espelho responsável pelo imageamento, os parâmetros considerados constantes são o campo de visada (ângulo máximo de abertura) e a taxa de amostragem dos detetores. Assim, a largura da faixa imageada fica amarrada pela constante relativa ao campo de visada. Pode ocorrer, no entanto, que o espelho, no seu movimento de imageamento, sofra variações em relação ao tempo útil de varredura, podendo atrasar ou adiantar. Como a taxa de amostragem de elementos de imagem é constante, ocorre que o número de elementos amostrados pode variar, aumentando quando o espelho atrasa e diminuindo quando o espelho se adianta. Esta distorção é totalmente aleatória e de alta frequência, sendo que sua eliminação deve preceder qualquer tratamento geométrico que a imagem venha sofrer.

A correção pode ser feita através da reamostragem de cada linha levando em consideração uma transformação linear que corrija todas as linhas para um comprimento nominal.

3.2.1.3 - DISTORÇÃO PANORÂMICA

Toda vez que o detetor é ativado e registra, ou amostra, um elemento de imagem, fica associado a este elemento uma porção sobre a superfície da Terra de dimensões preestabelecidas $dx dy$, função da resolução espacial do sensor. Ocorre, entretanto, que o movimento angular do espelho de ponto para ponto faz corresponder variações no terreno que não são uniformes (Figura 3.9), mesmo que a Terra seja considerada plana. Esta distorção é de média frequência e, pelas características de projeção cilíndrica associadas às imagens de sensores remotos de varredura, atua apenas no sentido das varreduras. Ela pode ser modelada uma vez conhecido o comportamento do movimento do espelho.

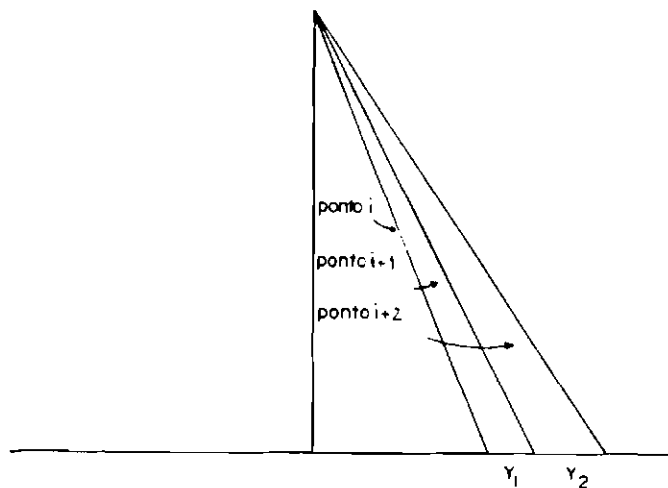


Fig. 3.9 - Distorção panorâmica.

3.2.1.4 - DESLOCAMENTO ENTRE BANDAS

Nos sensores multiespectrais pode ocorrer que, por construção, as diversas bandas multiespectrais não se registrem automaticamente, existindo um deslocamento entre as mesmas (Figura 3.10). Geralmente este deslocamento envolve um número inteiro de elementos de imagem, podendo ser compensado eliminando-se alguns elementos no início e no fim de cada banda, de forma a só ficar a parte comum a todas elas. A partir deste instante o registro entre bandas passa a ser automático.

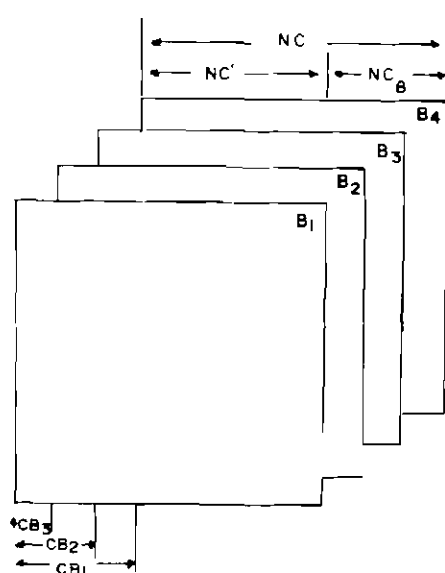


Fig. 3.10 - Deslocamento entre bandas.

3.2.1.5 - DESLOCAMENTO ENTRE DETETORES

Nos sensores de varredura mecânica os detetores são arranjados de tal forma que em cada varredura diversas linhas são imageadas simultaneamente (6 no caso do MSS e 16 no caso do TM), onde cada linha está associada a um detetor. Novamente por construção, pode ocorrer que os detetores não estejam alinhados, havendo deslocamentos entre eles (Figura 3.11). De forma semelhante ao que ocorre entre as bandas espectrais estes deslocamentos geralmente correspondem a um número inteiro de elementos de imagem. Este efeito pode então ser compensado eliminando-se alguns elementos de imagem no início ou no fim de cada linha de modo a que todas as linhas de uma varredura estejam retratando aspectos contínuos do terreno.

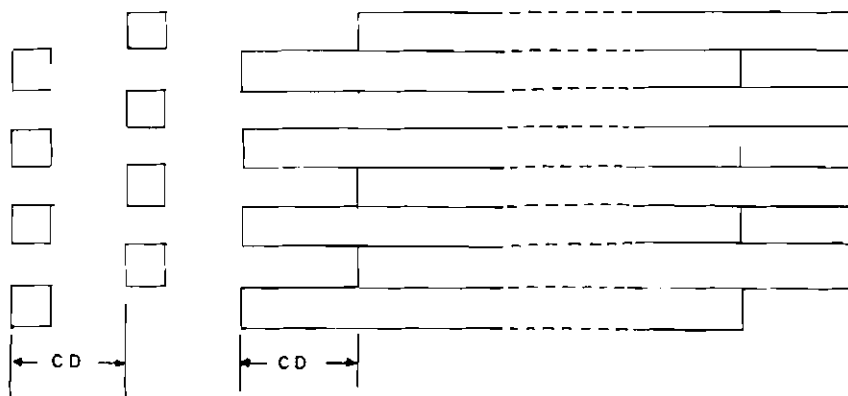


Fig. 3.11 - Deslocamento entre detetores.

3.2.2 - DISTORÇÕES RELATIVAS A UM SENSOR DE VARREDURA ELETRÔNICA

Nos sensores de varredura eletrônica cada varredura se comporta como uma fotografia aérea, onde todos os pontos são amostrados simultaneamente. Neste caso este tipo de sensor não padece dos efeitos de cisalhamento da varredura, variação do tempo útil de varredura e da distorção panorâmica.

De início já se nota que ocorreu um avanço significativo quanto ao aspecto geométrico. A seguir são apresentadas as distorções associadas ao sensor de varredura eletrônica.

3.2.2.1 - DESLOCAMENTO ENTRE BANDAS

Literalmente igual ao caso dos sensores de varredura mecânica. Deve-se, apenas, ressaltar que tal situação ocorre nos sensores MSS e TM-LANDSAT, mas não ocorre no sensor HRV-SPOT. No sensor HRV-SPOT o sistema ótico é construído de tal forma que todas as bandas multiespectrais se registram automaticamente, com precisão da ordem de 0,15 "pixels" (SPOTIMAGE, 1986).

3.2.2.2 - DESLOCAMENTO ENTRE BARRAS DE DETETORES

Similar ao que ocorre nos sensores de varredura mecânica, nos sensores de varredura eletrônica as barras de detetores que compõem uma linha podem, por construção, estar desalinhadas. No caso do sensor HRV-SPOT este desalinhamento é compensado pela leitura de varreduras consecutivas, quando então as varreduras vão se completando naturalmente (Figura 3.12). Uma linha de imagem é composta pela metade de uma varredura eletrônica, com a metade da varredura anterior ou posterior.

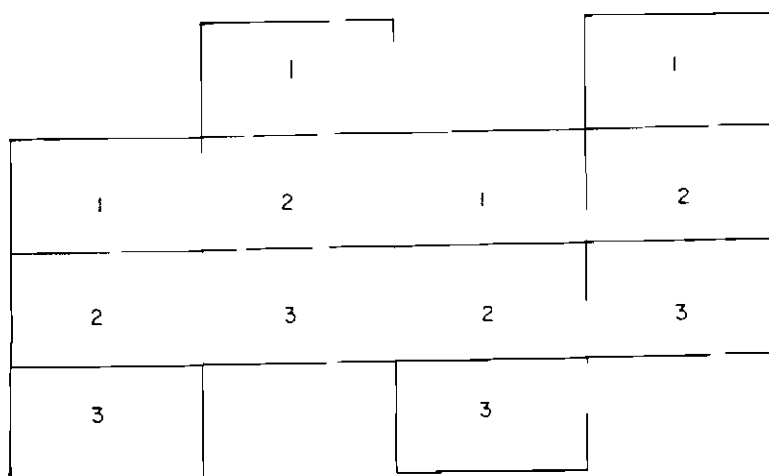


Fig. 3.12 - Deslocamento entre barras de detetores.

3.2.2.3 - DESALINHAMENTO DAS BARRAS DE DETETORES

Além do deslocamento entre os conjuntos das barras de detetores referentes a uma varredura eletrônica existe uma outra fonte de erro difícil de ser quantizada e modelada: é o desalinhamento entre os vários conjuntos de detetores correspondentes a cada banda. Pradines (1986) apresenta resultados de uma estimativa sobre este desalinhamento, concluindo ser ele de pouca significância para a geometria da imagem. A distorção daí decorrente seria inferior a 0,1 "pixel" (Figura 3.13).

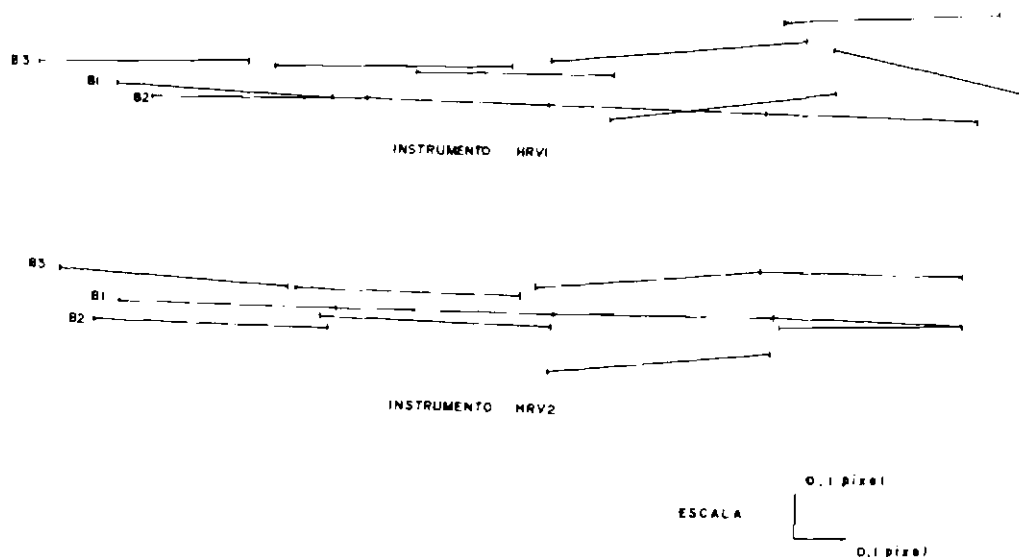


Fig. 3.13 - Desalinhamento das barras de detetores.

3.3 - DISTORÇÕES INERENTES À TERRA

As distorções relativas ao objeto imageado, no caso a Terra, definem o terceiro e último conjunto de distorções do sistema de formação de imagens. É importante definir um modelo de referência para a Terra. Este modelo pode ser um plano, uma esfera ou um elipsóide de revolução. De maneira geral a Terra será representada por um elipsóide de revolução, daqui por diante denominado apenas elipsóide. Em alguns casos especiais será acrescido ao elipsóide um modelo de elevação do terreno para caracterizar o relevo da Terra. Este elipsóide está em movimento em torno do seu eixo de rotação, e este movimento, a curvatura de sua superfície (esfericidade) e o relevo são as fontes de distorção associadas à Terra.

3.3.1 - ROTAÇÃO DA TERRA

Conforme já observado anteriormente, o processo de formação de uma imagem não é instantâneo, sofrendo influências de todos os parâmetros que tenham um comportamento dinâmico, entre os quais a Terra no seu processo de rotação. Esta rotação vai causar descontinuidades entre varreduras consecutivas (Figura 3.14) tanto

maiores quanto menor for a frequência de varredura. Para eliminação deste efeito é necessário o conhecimento da velocidade tangencial da Terra e da frequência de varredura do sensor. Além disso, o comportamento constante da rotação da Terra faz com que esta distorção seja de baixa frequência.

No caso dos sensores de varredura mecânica existe ainda uma outra componente decorrente do movimento simultâneo entre o espelho e a Terra. Esta segunda componente é, porém, de uma ordem de grandeza bem inferior à primeira. As duas componentes atuam no sentido da varredura.

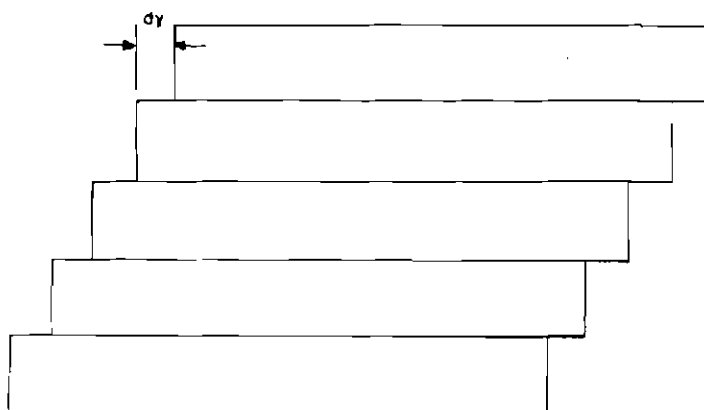


Fig. 3.14 - Rotação da Terra.

3.3.2 - ESFERICIDADE DA TERRA

A esfericidade da Terra é responsável por uma distorção que se acentua à medida que o elemento de imagem se afasta do nadir. Ela faz com que seja associado a cada elemento de imagem porções da Terra de tamanhos diferentes (Figura 3.15). Pela característica de projeção cilíndrica das imagens de sensores de varredura, esta distorção só se faz notar ao longo das varreduras, sendo, ainda de média frequência.

Nos sensores de varredura mecânica esta distorção está intimamente relacionada com a distorção panorâmica. No caso do sensor HRV-SPOT, esta distorção se acentua para as imagens de visada oblíqua ou lateral.

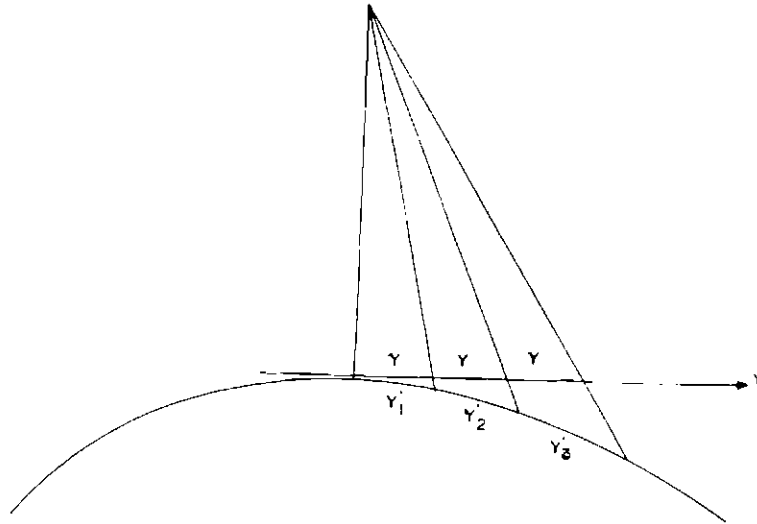


Fig. 3.15 - Esfericidade da Terra.

3.3.3 - RELEVO DA TERRA

O desconhecimento de um modelo de elevação do terreno leva à adoção de modelos de correção geométrica que relacionam pontos da imagem com pontos situados diretamente sobre o elipsóide de referência. Este procedimento implica na introdução de distorções na imagem corrigida, tanto maiores quanto mais acidentado for o relevo (Figura 3.16). Relevos homogêneos ao longo da imagem não provocam grandes deformações, sendo responsáveis, praticamente, por pequenas variações na escala da imagem.

Esta distorção nunca causou maiores problemas devido às elevadas altitudes dos satélites, e às pequenas aberturas dos ângulos de varredura. Com o lançamento do satélite SPOT, onde visadas oblíquas de até 27° são permitidas, e a precisão interna da imagem deve ser maior, em função do maior poder resolutivo, as distorções devido ao relevo devem ser modeladas para possibilitar a sua eliminação.

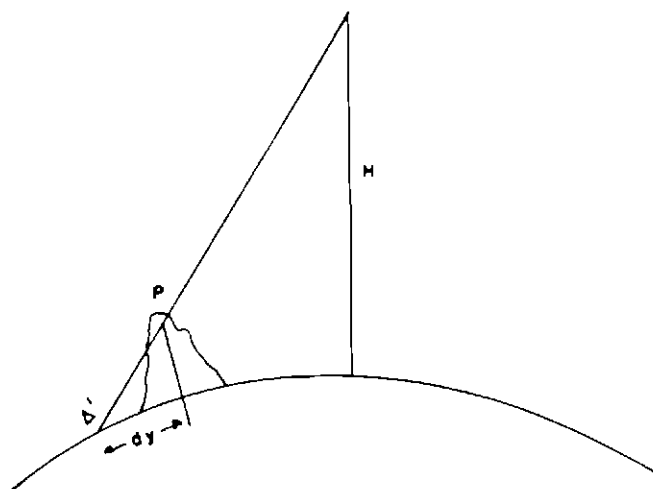


Fig. 3.16 - Deslocamento devido ao relevo.

CAPÍTULO 4

MODELOS DE CORREÇÃO GEOMÉTRICA

As imagens de satélite transmitidas para a Terra e gravadas pelas Estações de Recepção e Gravação de Imagens estão afetadas de diversas distorções geométricas. As principais fontes destas distorções foram apresentadas no capítulo anterior. Neste capítulo será abordada a maneira de eliminar, ou pelo menos, minimizar ao máximo, os efeitos que estas distorções provocam.

Uma imagem com sua geometria comprometida limita as aplicações que delas se podem fazer. Neste caso só seriam possíveis análises qualitativas, impossibilitando as análises quantitativas. As imagens brutas são de tal forma, que cada elemento de imagem representa, no terreno, uma figura geométrica distinta, com áreas também distintas.

O processo de correção geométrica visa eliminar as distorções geométricas, preservando sempre que possível as características radiométricas da imagem. Para isso é necessário que se modele o processo de degradação geométrica da imagem a partir da análise das fontes causadoras de distorções e da correlação existente entre tais fontes. Uma vez modelado, o processo de degradação pode ser invertido de modo a possibilitar a restauração da geometria da imagem.

Posteriormente à correção é possível executar medições de distâncias, ângulos, áreas e perímetros, diretamente sobre a imagem. É claro que a precisão destas medições está diretamente relacionada com a precisão da correção geométrica. Esta, por sua vez, está associada à precisão com que são conhecidos os parâmetros necessários à modelagem matemática do processo de degradação, basicamente: efemérides, atitude, ótica do instrumento e modelo de referência para a Terra.

Através da correção geométrica será possível, ainda, registrar a imagem com documentos cartográficos (cartas topográficas, temáticas ou especiais) e até mesmo entre imagens de um mesmo sensor, obtidas em épocas distintas (registro multitemporal), ou entre imagens de diversos sensores (registro multisensor).

A correção geométrica visa restaurar a geometria interna da imagem, eliminando distorções de forma, área e distâncias, e visa também, a colocação da imagem de forma adequada num determinado sistema de coordenadas. O primeiro objetivo pode ser alcançado sem a contribuição de agentes externos ao sistema de imageamento, tais como pontos de controle de terreno, desde que sejam conhecidos os parâmetros associados ao sistema de formação de imagens. No entanto, a precisão dos dados de efemérides não permite um bom posicionamento da imagem num determinado referencial, sendo então necessário o emprego de pontos de controle para refinar a estimativa do posicionamento. Vale destacar, entretanto, que a garantia de uma boa geometria interna vai permitir tanto as tarefas de medições quanto os registros anteriormente mencionados.

Apesar de nem sempre serem necessários, os pontos de controle podem ter um importante papel no processo de correção geométrica quando utilizados para melhorar a qualidade do produto corrigido. Este procedimento é usualmente denominado de refinamento do modelo por pontos de controle. Alguns métodos de correção, no entanto, necessitam dos pontos de controle já em sua fase inicial, enquanto que outros permitem um sem número de modelos de refinamento, seja para melhorar a geometria interna, seja para possibilitar um melhor posicionamento da imagem.

O processo de correção geométrica pode ser dividido em três fases: o mapeamento direto, o mapeamento inverso e a reamostragem.

Na primeira fase o modelo relaciona, para cada ponto P da imagem bruta de coordenadas (L,C) , um ponto P' da imagem corrigida

de coordenadas (I,J) . Em muitos casos este processo não ocorre diretamente, passando antes pelo modelo de referência para a Terra (Figura 4.1).

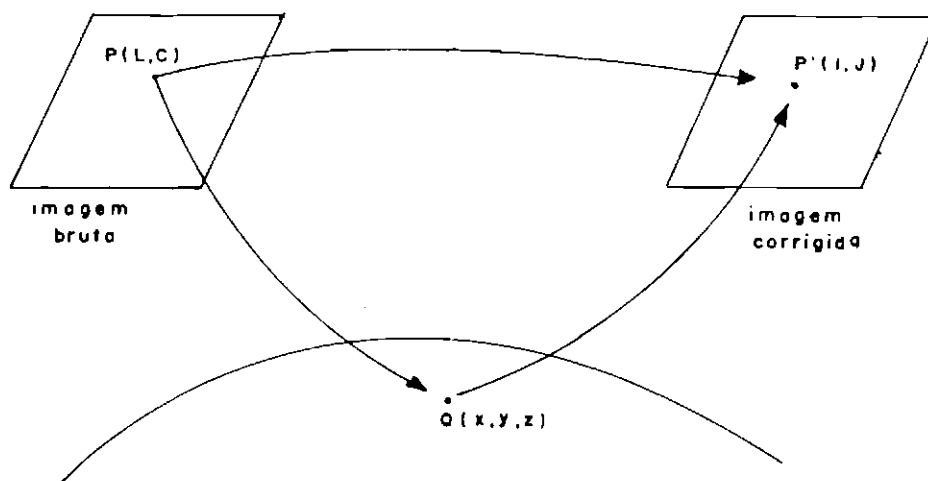


Fig. 4.1 - Mapeamento direto.

Em todo o caso, é no mapeamento direto que se concentra o estudo de conceitos físicos a partir da análise dos diversos parâmetros do sistema de formação de imagens.

Na segunda fase ocorre o processo inverso, e o modelo procura relacionar cada ponto da imagem corrigida com um ponto da imagem bruta. Geralmente esta inversão é realizada a partir da determinação de polinômios cujos coeficientes são calculados em função da amostra obtida no mapeamento direto.

O conceito que envolve a necessidade do mapeamento inverso é que, na primeira fase, um modelo matemático é aplicado para uma grade regular de pontos sobre a imagem bruta, resultando em pontos homólogos na imagem corrigida irregularmente espaçados (Figura 4.2).

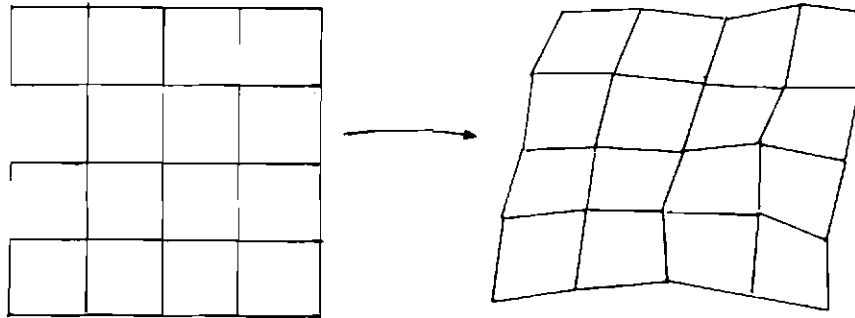


Fig. 4.2 - Distribuição da grade amostral durante o mapeamento direto.

No processo de reamostragem é necessário conhecer para cada ponto da imagem corrigida, seu correspondente na imagem bruta, o que vai possibilitar a definição do nível de cinza dos pontos da imagem corrigida. Para facilitar a tarefa de identificação dos pares homólogos para pontos fora da grade amostral é importante que a grade sobre a imagem corrigida esteja regularmente espaçada (Figura 4.3).

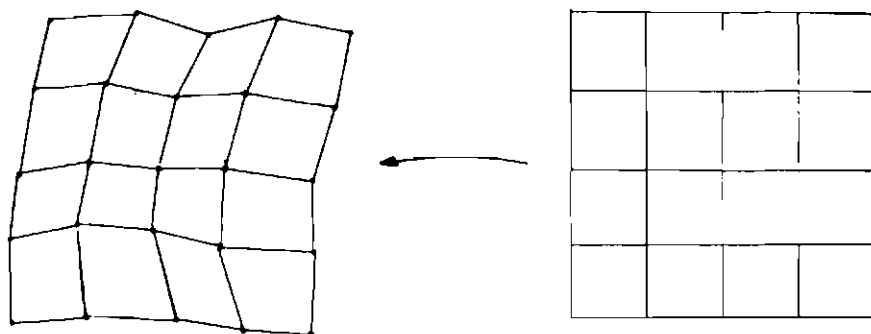


Fig. 4.3 - Distribuição da grade amostral durante o mapeamento inverso.

O emprego de polinômios na etapa referente ao mapeamento inverso apesar de simples nem sempre se apresenta como a solução mais

eficiente. Os polinômios utilizados variam do terceiro ao quinto grau, sendo que normalmente os de quinto grau são necessários. Ocorre que estes polinômios são determinados para um conjunto de pontos (grade do mapeamento direto) e aplicados em outro conjunto de pontos (grade do mapeamento inverso). Quanto maior o grau do polinômio menor é o controle sobre pontos que não estejam na vizinhança daqueles que o originaram. Aliás, os problemas inerentes à aplicação de polinômios nesta fase são os mesmos encontrados no modelo polinomial de correção geométrica, exceto aqueles referentes à distribuição e quantidade de pontos de controle, aqui substituídos pelos nós da grade amostral.

Uma alternativa ao emprego de polinômios é a interpolação por partes, utilizando a transformação projetiva, em função dos quatro nós da grade direta mais próximos ao nó da grade inversa (Figura 4.4).

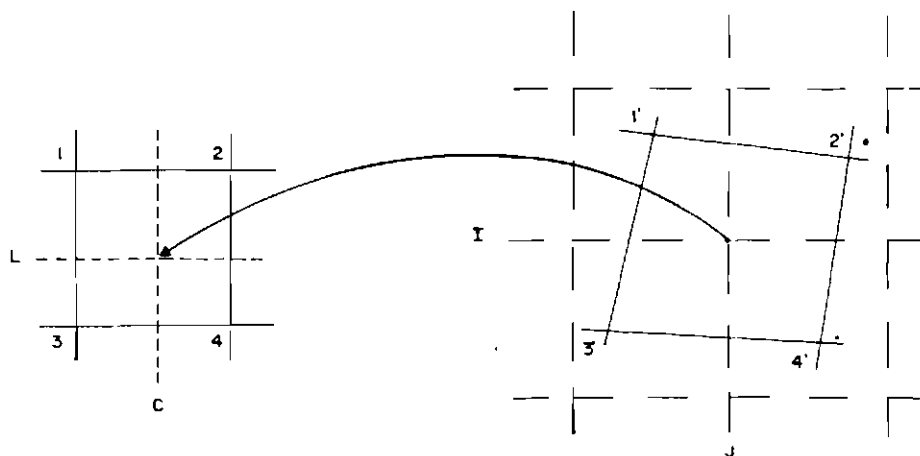


Fig. 4.4 - Interpolação pela transformação projetiva.

Para cada nó da grade inversa, regularmente distribuída sobre a imagem corrigida, procura-se o quadrilátero irregular, definido pelo mapeamento direto, que contém este nó. Associado a este quadrilátero têm-se quatro nós da grade direta, regularmente espaçados sobre a imagem bruta. A partir destes dois quadriláteros, relacionados que são pelo mapeamento direto, é possível definir os parâmetros da

transformação projetiva que leve o quadrilátero irregular da imagem corrigida a casar com o quadrilátero regular da imagem bruta (Figura 4.4). Utilizando os parâmetros desta transformação determinam-se as coordenadas de imagem bruta (L,C) associadas às coordenadas de imagem corrigida (I,J) de cada nó da grade inversa.

Este processo é mais demorado que o polinomial, porém apresenta um grau de confiança maior. Para facilitar o seu emprego o método de interpolação por partes pode ser precedido do polinomial, onde, neste caso, o polinômio serviria para indicar quais quadrículas do mapeamento direto deveriam ser utilizadas na transformação projetiva.

A terceira e última fase do processo de correção geométrica é a reamostragem propriamente dita, onde para cada ponto da imagem corrigida deve-se associar um nível de cinza, em função da imagem bruta. A determinação do nível de cinza, geralmente envolve uma interpolação a partir de vizinhos do ponto, uma vez que o resultado do mapeamento inverso nem sempre fornece um valor inteiro para as coordenadas na imagem original. Bernstein (1976) apresenta três métodos como os mais utilizados, que têm sua precisão diretamente relacionada com o volume de cálculo associado: vizinho mais próximo, interpolação bilinear e convolução cúbica.

Na reamostragem por vizinho mais próximo o nível de cinza do ponto-imagem corrigida é igual ao nível de cinza do ponto-imagem bruta de coordenadas mais próximas às coordenadas obtidas do mapeamento inverso (Figura 4.5).

No caso da interpolação bilinear o nível de cinza do ponto-imagem corrigida é obtido por interpolação bilinear a partir dos quatro vizinhos mais próximos do ponto-imagem original (Figura 4.5).

A convolução cúbica utiliza os dezesseis vizinhos mais próximos do ponto-imagem original para determinação do nível de cinza (Figura 4.5).

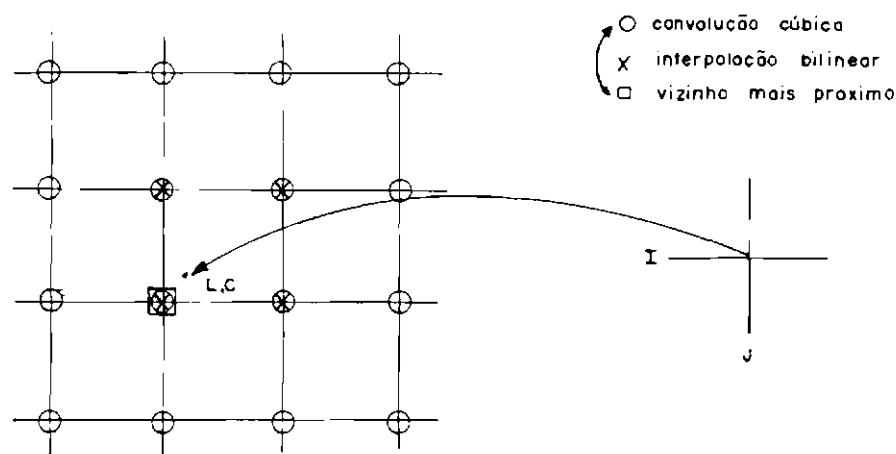


Fig. 4.5 - Interpolação do nível de cinza.

É comum ainda se combinar estes métodos em busca de uma otimização entre precisão e tempo de processamento. Serra (1987) emprega no processo de correção geométrica das imagens TM-LANDSAT o vizinho mais próximo ao longo das colunas e a convolução cúbica ao longo das linhas, aumentando o desempenho do Sistema de Processamento de Imagens do INPE.

O ideal, nesta fase, seria a integração da reamostragem com o filtro restaurador, executando num único passo as correções radiométrica e geométrica.

O trabalho não vai se aprofundar ao nível dos interpoladores de nível de cinza, concentrando-se nas duas primeiras fases do processo de correção geométrica.

Neste capítulo pretende-se discutir alguns dos modelos mais clássicos para correção geométrica de imagens. A literatura apresenta diversos procedimentos, onde se destacam:

- modelo polinomial (Bähr, 1978);
- modelo de correções independentes (Meira Filho, 1976);

- modelo fotogramétrico baseado nas equações de colinearidade (Michail and Paderes) e (Sawada et al., 1987).

Estas três classes de modelos cobrem todos os procedimentos usualmente encontrados para o processo de correção geométrica. Diferem no conceito e serão analisados em separado para posterior comparação de desempenho.

4.1 - MODELO POLINOMIAL

O modelo de ajuste polinomial é o mais simples entre todos os modelos, pois não há necessidade do conhecimento de nenhum parâmetro do satélite, ou do sensor, nem da Terra. Seu princípio básico é relacionar um conjunto de coordenadas de imagem bruta com outro conjunto de coordenadas de terreno, através de polinômios. Tais conjuntos de coordenadas são obtidos a partir do levantamento de pontos de controle (Bähr, 1978).

As coordenadas de imagem bruta linha L e coluna C são então relacionadas com coordenadas geodésicas (latitude ϕ e longitude λ) ou com coordenadas plana-retangulares (XP,YP) referentes a um Sistema de Projeção Cartográfica, através de polinômios de grau n, conforme as Equações 4.1 e 4.2.

$$XP = a_0 + a_1.L + a_2.C + a_3.L^2 + a_4.L.C + a_5.C^2 + \dots + a_m.C^n \quad (4.1)$$

$$YP = b_0 + b_1.L + b_2.C + b_3.L^2 + b_4.L.C + b_5.C^2 + \dots + b_m.C^n \quad (4.2)$$

onde: $m = ((n + 1) \cdot (n + 2) / 2) - 1$.

O relacionamento direto da imagem bruta com um Sistema de Projeção Cartográfica conduz, de forma imediata, a um processo de avaliação geométrica pela comparação das coordenadas do Sistema de Projeção obtidas do ajuste com as equivalentes levantadas de cartas topográficas.

No entanto, o modelo polinomial permite um salto sobre a primeira fase do processo de correção geométrica (mapeamento direto) recaindo-se imediatamente na fase referente ao mapeamento inverso. Para isto é necessário que se transforme as coordenadas do Sistema de Projeção em coordenadas de imagem corrigida, através de um processo de discretização de coordenadas.

Para proceder a esta discretização deve-se conhecer, a priori, o número de linhas (NI) e colunas (NJ) que terá a imagem corrigida, bem como a resolução espacial (re), as coordenadas no sistema de projeção do centro desta imagem $(X, Y)_c$ (geralmente o centro da imagem bruta e corrigida são coincidentes) e a orientação (α) entre o Sistema de Projeção e o Sistema de Referência da Imagem Corrigida. Esta orientação pode ser a da linha central, ou nula, quando a imagem corrigida estará orientada para o Norte geográfico.

Da Figura 4.6 é possível extrair a relação entre os dois sistemas de coordenadas, sintetizadas pelas Equações 4.3 e 4.4.

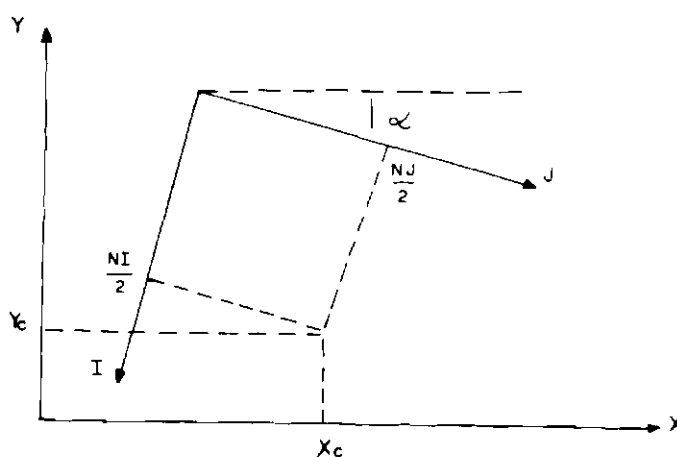


Fig. 4.6 - Relação entre os Sistemas de Projeção e da Imagem corrigida.

$$I = [-(X - X_c) \cdot \text{sen} \alpha - (Y - Y_c) \cdot \text{cos} \alpha] / \text{re} + \text{NI} / 2 \quad (4.3)$$

$$J = [(X - X_c) \cdot \cos \alpha - (Y - Y_c) \cdot \operatorname{sen} \alpha] / re + NJ / 2 \quad (4.4)$$

Uma vez tendo os dois conjuntos de coordenadas de imagem, bruta e corrigida, dos pontos de controle, pode-se então mapear a imagem corrigida na imagem bruta (mapeamento inverso) conforme as Equações 4.5 e 4.6.

$$L = a_0 + a_1.I + a_2.J + a_3.I^2 + a_4.I.J + a_5.J^2 + \dots + a_m.J^n \quad (4.5)$$

$$C = b_0 + b_1.I + b_2.J + b_3.I^2 + b_4.I.J + b_5.J^2 + \dots + b_m.J^n \quad (4.6)$$

Um problema inerente ao modelo polinomial é o de não modelar de forma eficiente as distorções de alta frequência. Assim, é importante, quando se tratar de imagens de sensores de varredura mecânica, semelhante ao MSS e TM-LANDSAT, que a correção de variação do tempo útil de varredura seja realizada antes da aplicação do polinômio. Este procedimento é imprescindível pois coloca todas as linhas com igual número de elementos de imagem, eliminando-se uma distorção de alta frequência. Uma distorção que o modelo polinomial não absorve é a devida ao relevo, de frequência muito intensa, impossível de, em grandes áreas, ser modelada por polinômios. Desta forma, tal modelo não se presta para correção de imagens com visadas oblíquas.

O polinômio mais utilizado neste tipo de correção é o do quinto grau completo (21 coeficientes), devido principalmente ao movimento do espelho (nos sensores de varredura mecânica), à curvatura da Terra e às variações de velocidade e altitude do satélite.

Uma análise estatística em cima dos resultados encontrados pode indicar termos do polinômio cujas ordens de grandeza sejam desprezíveis em relação ao resultado final, ou ainda termos com comportamento constante (coeficientes cuja variação em torno de um valor médio não é significativa). Nestes casos reduz-se o número de parâmetros a determinar, eliminando-se os primeiros, e considerando-se

constante os segundos. Diminui-se, assim, o número de pontos de controle necessários para a solução do sistema.

É imprescindível adotar sistemas sobredeterminados (número de equações maior que o número de parâmetros a determinar), de modo que, através de um processo de ajustamento, os pontos de controle mal identificados ou localizados possam vir a ser eliminados. Uma solução simples e muito utilizada, faz uso do princípio dos mínimos quadrados, no método paramétrico. O sistema de Equações 4.5 e 4.6 na forma matricial pode ser descrito pela Equação 4.7.

$$\begin{bmatrix} 1 & I_1 & J_1 & I_1^2 & I_1 \cdot J_1 & J_1^2 & \cdot & J_1^5 \\ 1 & I_2 & J_2 & I_2^2 & I_2 \cdot J_2 & J_2^2 & \cdot & J_2^5 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & I_N & J_N & I_N^2 & I_N \cdot J_N & J_N^2 & \cdot & J_N^5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \cdot \\ a_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \cdot \\ L_N \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

A

N 21

X

21 1

B

21 1

onde n = número de pontos de controle.

Da Equação Matricial 4.7 tem-se:

$$A \cdot X = B \quad (4.8)$$

$$X = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot (A^T \cdot P \cdot B) \quad (4.9)$$

onde P é a matriz peso dos pontos de controle. Geralmente adota-se uma matriz diagonal para a matriz peso, pelo desconhecimento da correlação entre os pontos de controle. O mesmo procedimento descrito pelas Equações 4.7, 4.8 e 4.9 é utilizado em relação à coluna bruta (C), substituindo-se $B_{i1} = L_i$ por $B_{i1} = C_i$.

É recomendável que se separe os pontos de controle em dois conjuntos. Um primeiro, que será utilizado na determinação dos coeficientes dos polinômios, e um segundo, onde os coeficientes serão aplicados para avaliação da precisão do método. Este procedimento é

interessante pois o modelo apresenta melhores resultados nas regiões próximas aos pontos de controle. Separando-se os pontos de controle em dois conjuntos pode-se avaliar, preliminarmente, o comportamento dos polinômios em relação aos nós da grade amostral. No entanto, este procedimento agrava um dos problemas inerentes ao modelo, qual seja, o de necessitar de um número excessivo de pontos de controle.

Uma forma de minimizar este problema é determinar os coeficientes em dois passos, eliminando-se, após o primeiro, os coeficientes que não influenciaram o resultado final. Com isso é possível eliminar novos pontos de controle, que porventura não tenham apresentado um bom comportamento neste primeiro passo. O teste para identificar os coeficientes a serem eliminados está sintetizado na Equação 4.10.

$$r_i \cdot NI^p \cdot NJ^q < \text{TOLERÂNCIA}, \quad \text{onde } r \in \{a, b\} \quad (4.10)$$

Os pontos de controle selecionados, além de necessitarem de boa identificação, devem estar bem distribuídos ao longo de toda imagem, procurando evitar concentrações em determinadas regiões e, principalmente, vazios em outras. Para países como o Brasil, que apresentam um recobrimento cartográfico deficiente, o problema de localização de pontos de controle tende a se agravar. As redes geodésicas são muito esparsas e o levantamento de pontos de controle por rastreamento de satélite ou métodos astronômicos de precisão são caros e inviabilizam seus usos em procedimentos sistemáticos. Na prática as coordenadas de projeção de pontos de controle são obtidas a partir de cartas topográficas.

Uma análise do modelo polinomial nos revela três vantagens importantes:

- é o modelo de maior simplicidade de execução;

- não necessita o conhecimento de parâmetros ligados ao sistema, tais como: atitude, efemérides, concepção do instrumento e modelo de referência para a Terra;
- evita a fase do mapeamento direto.

Em contrapartida, pode-se afirmar ser este o método que apresenta o maior número, e as mais problemáticas desvantagens, tais como:

- modela deficientemente as distorções de alta frequência;
- não acompanha as distorções nas bordas da imagem, entendendo-se como bordas a região externa aos pontos de controle;
- apresenta melhor comportamento em regiões próximas aos pontos de controle;
- necessita de um número excessivo de pontos de controle, bem identificados e distribuídos ao longo da imagem;
- por não envolver conceito físico fica difícil analisar o resultado para tentar melhorá-lo;
- todos estes fatores tendem a se agravar na razão direta do grau do polinômio utilizado.

Confrontando as vantagens e desvantagens do modelo, conclui-se ser ele mais recomendado para registro multitemporal de janelas de imagem, onde o problema dos pontos de controle reduz-se à identificação de pontos homólogos nas duas janelas (pontos de controle relativos), o que é extremamente mais fácil. Em função da dimensão destas janelas é possível, inclusive, reduzir o grau dos polinômios.

Outra aplicação interessante para os polinômios é a de refinamento de modelos de correção geométrica por pontos de controle. Neste caso o grau do polinômio pode ser bem reduzido, uma vez que a imagem já sofreu um processo de correção geométrica.

4.2 - MODELO DE CORREÇÕES INDEPENDENTES

O modelo de correções independentes se baseia na análise individual de cada distorção, visando gerar o modelo inverso que permita eliminá-la. Parte do princípio de que cada fonte de distorção pode ser analisada e modelada de forma independente, sem levar em consideração a interdependência entre as várias fontes. Parte de um princípio errado, mas o modelo é interessante pois permite quantificar a ordem de grandeza da contribuição de cada uma das fontes de distorção (Meira Filho, 1976).

O modelo pode ser aplicado independente do uso de pontos de controle, e para qualquer ponto da imagem bruta fornece o posicionamento deste na imagem corrigida. Para possibilitar este mapeamento da imagem bruta na imagem corrigida (mapeamento direto) é necessário fazer inicialmente algumas considerações.

O sistema de coordenadas da imagem bruta (L,C) será relacionado com o Sistema de Coordenadas da imagem corrigida (I,J) através de um terceiro Sistema de Coordenadas cartesianas plana-retangulares (X,Y) (Figura 4.7).

Cada ponto da imagem bruta tem um par de coordenadas cartesianas nominais $(X,Y)_n$ a ele associado, o qual é função da resolução espacial do sensor (re) e do número de linhas (NL) e colunas (NC) da imagem bruta. Esta relação está expressa na Equação 4.11.

Cada distorção do sistema estará associada a um par de desvios (dX,dY) , função da posição do ponto na imagem bruta. A coordenada corrigida $(X,Y)_c$ de um ponto será o resultado do somatório da coordenada nominal e de todos os desvios, relativos às diversas distorções de imagem, conforme Equação 4.12.

As coordenadas cartesianas corrigidas são então discretizadas em coordenadas de imagem corrigida (I,J) em função da

resolução espacial do sensor (re) e do número de linhas (NI) e colunas (NJ) da imagem corrigida, conforme Equação 4.13.

Deve-se destacar que as imagens bruta e corrigida têm o mesmo centro, e que este centro é a origem do Sistema Cartesiano. Além disso, os três sistemas mantêm o paralelismo entre seus eixos.

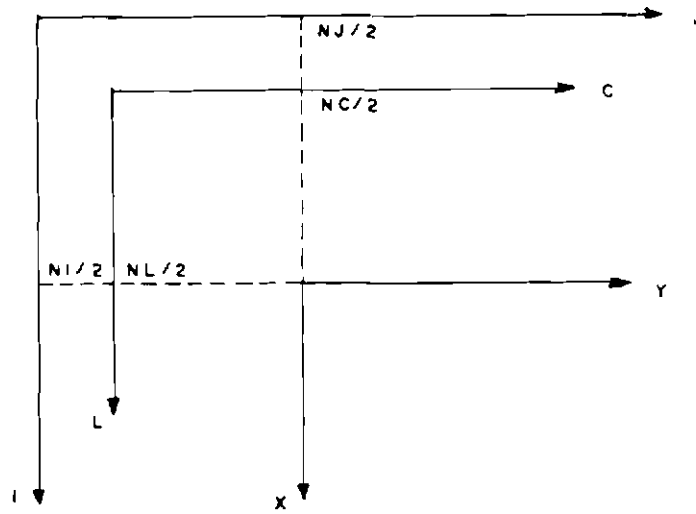


Fig. 4.7 - Relação entre os sistemas de coordenadas de imagens bruta e corrigida.

$$(X, Y)_n = (L - NL/2, C - NC/2) \cdot re \quad (4.11)$$

$$(X, Y)_c = (X, Y)_n + \sum_i \sum_j (dX_{ij}, dY_{ij}) \quad (4.12)$$

$$(I, J) = (X, Y)_c / re + (NI/2, NJ/2) \quad (4.13)$$

O processo de correção é realizado para uma grade amostral, regularmente espaçada ao longo da imagem bruta. Para pontos fora desta grade procede-se à interpolação bilinear para relacionar os pontos da imagem bruta com os homólogos na imagem corrigida.

Os dados necessários à definição dos modelos de correção de cada distorção geométrica são: dados de efemérides ($X_S, Y_S, Z_S, \dot{X}_S, \dot{Y}_S, \dot{Z}_S$) e atitude (R, A, G) do satélite, a frequência de varredura do sensor (FV), o tempo útil de varredura (TUV) ou a taxa de amostragem de elementos de imagem (TA), o tempo referente ao início da imagem (TI) e a equação do movimento do espelho ($\theta = f(C)$).

Por convenção a grade amostral tem $N \times N$ pontos regularmente espaçados ao longo da imagem bruta, onde N é ímpar para garantir que o centro da imagem seja um dos nós da grade (Figura 4.8). $K = (N + 1)/2$ é o índice referente ao centro das linhas ou colunas dos nós da grade.

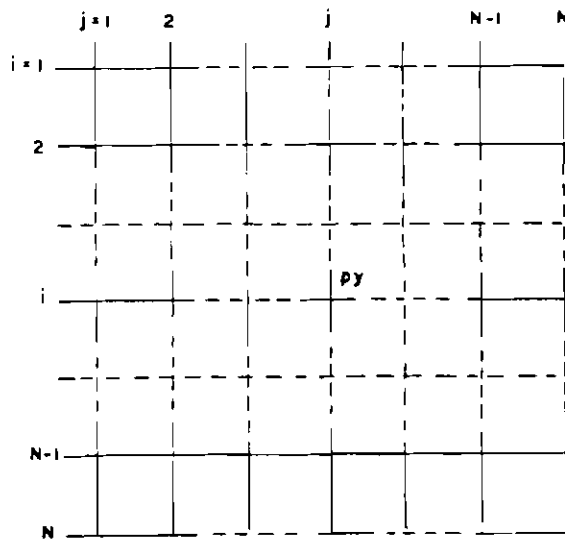


Fig. 4.8 - Grade amostral da imagem bruta.

Um ponto P_{ij} da grade tem coordenadas de imagem bruta (L, C) dados pela Equação 4.14.

$$(L, C)_{ij} = [NL \cdot (i - 1), NC \cdot (j - 1)] / (N - 1) \quad (4.14)$$

Convertendo estas coordenadas para o sistema cartesiano, segundo a Equação 4.11, tem-se:

$$(X, Y)_{ij} = \left[NL \cdot \left(\frac{i-1}{N-1} - \frac{1}{2} \right), NC \cdot \left(\frac{j-1}{N-1} - \frac{1}{2} \right) \right] . re \quad (4.15)$$

As primeiras distorções a serem corrigidas, pela ordem, devem ser: variação do tempo útil de varredura, deslocamento entre bandas e deslocamento entre detetores.

A variação do tempo útil de varredura é corrigida observando-se o tamanho real de cada varredura (NC_{real}) e normalizando-se em função do comprimento nominal NC.

$$C' = C \cdot \frac{NC}{NC_{real}} \quad (4.16)$$

A correção do deslocamento entre bandas é feita eliminando-se elementos de imagem no início e no fim de cada varredura, de forma a que todas as bandas representem exatamente a mesma região (Figura 3.10).

$$C'' = C' - C_{Bi} \quad (4.17)$$

e

$$NC' = NC - NC_B \quad (4.18)$$

Corrigido o deslocamento entre bandas procede-se de forma semelhante para corrigir o deslocamento entre detetores. Elimina-se das linhas pares elementos de imagem no início das linhas, e das linhas ímpares elementos de imagem no fim da linha (ou vice-versa conforme a construção dos detetores) (Figura 3.11). Se a linha for par então:

$$C''' = C'' - CD \quad (4.19)$$

e

$$NC'' = NC' - CD \quad (4.20)$$

A partir deste ponto considera-se $C = C''$ e $NC = NC''$ como os valores primários de coluna e número de colunas da imagem bruta possibilitando, então, o cálculo dos desvios $(dX, dY)_{ij}$ associados a cada fonte de distorção geométrica.

O primeiro passo é determinar o tempo t_{ij} referente a cada nó P_{ij} da grade.

$$t_{ij} = TI + L_{ij} / FV + \frac{TUV}{NC} \cdot C_{ij} \quad (4.21)$$

ou

$$t_{ij} = TI + L_{ij} / FV + TA \cdot C_{ij} \quad (4.22)$$

onde $1/FV$ equivale ao intervalo de tempo entre duas varreduras consecutivas, TUV equivale ao intervalo de tempo entre o primeiro e o último ponto de uma varredura e TA ao intervalo de tempo entre a amostragem de dois elementos consecutivos. No caso de sensores de varredura eletrônica TUV é nulo.

De posse do tempo t_{ij} , interpolam-se os arquivos de efemérides e atitude para obtenção destes dados referentes a todos os nós da grade $(XS, YS, ZS, \dot{X}S, \dot{Y}S, \dot{Z}S)_{ij}$ e $(R, A, G)_{ij}$.

A seguir, sem preocupação com a ordem, determina-se cada desvio $(dX, dY)_{ij}$ causado pelas demais fontes de distorção, de forma a possibilitar o cálculo das coordenadas corrigidas $(X, Y)_{cij}$.

4.2.1 - CORREÇÃO DA VARIAÇÃO DA VELOCIDADE

Neste ponto só serão considerados os desvios causados pela variação da velocidade entre as diversas varreduras, mas não o desvio entre pontos da mesma varredura (cisalhamento).

Dessa forma, a partir dos dados de velocidade $(\dot{X}_S, \dot{Y}_S, \dot{Z}_S)_{iK}$ referentes aos nós da coluna central da grade, determina-se o módulo da velocidade do ponto subsatélite V_{iK} , colocando-os em ordem crescente em relação ao tempo t_{iK} (Figura 4.9).

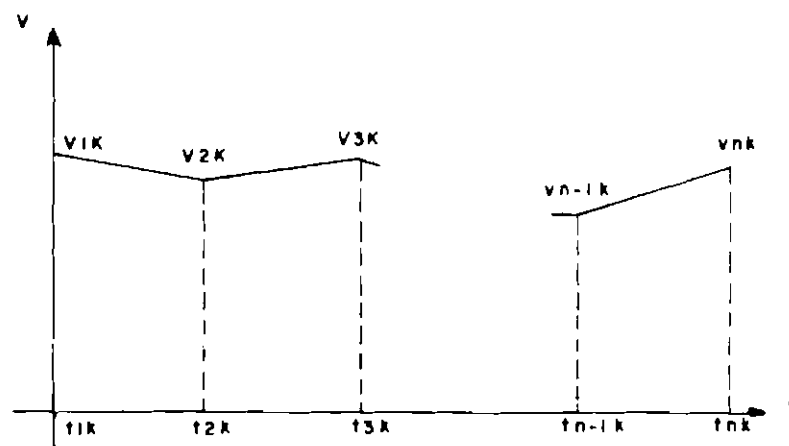


Fig. 4.9 - Velocidade do ponto subsatélite para os nós da coluna central.

Considerando que nestes intervalos o módulo da velocidade varia linearmente, integram-se os dados, tendo o instante referente ao centro da imagem como origem para integração. Lembrando que a variação da velocidade afeta a imagem apenas no sentido transversal às varreduras, o resultado desta integração fornecerá o valor de X_{ciK} corrigido.

$$X_{cij} = \begin{cases} - \left(\sum_{l=i+1}^{K-1} v_{lK} + \frac{v_{iK} + v_{KK}}{2} \right) \cdot \Delta t, & i < K \\ \left(\sum_{l=K+1}^{i-1} v_{lK} + \frac{v_{KK} + v_{iK}}{2} \right) \cdot \Delta t, & i \geq K \end{cases} \quad (4.23)$$

onde Δt equivale ao intervalo de tempo entre os centros de duas linhas consecutivas da grade:

$$\Delta t = \frac{NL}{N-1} \cdot \frac{1}{FV} \quad (4.24)$$

O desvio dX_{ij} é constante para todos os pontos de uma mesma varredura e está representado pela Equação 4.25.

$$dX_{ij} = X_{cij} - X_{nij} \quad (4.25)$$

onde X_{cij} e X_{nij} estão expressos, respectivamente nas Equações 4.23 e 4.15.

4.2.2 - VARIAÇÃO DA ALTITUDE

A variação da altitude só atua no sentido das varreduras, podendo ser modelada pela Equação 4.26. Esta equação é obtida pela semelhança dos triângulos da Figura 3.3.

$$dY_{ij} = Y_{nij} \cdot (H_{ij} / H_0 - 1) \quad (4.26)$$

onde H_{ij} é determinada após a conversão das coordenadas retangulares espaciais $(XS, YS, ZS)_{ij}$ em coordenadas geodésicas $(\alpha, \lambda, H)_{ij}$ e H_0 é a altitude nominal do satélite.

4.2.3 - ROLAMENTO

Esta componente da atitude atua também no sentido das varreduras. De acordo com a Figura 4.10 o desvio causado pelo rolamento pode ser modelado pela equação:

$$dY_{ij} = H_0 \cdot \tan R_{ij} \quad (4.27)$$

Caso R_{ij} seja constante o efeito causado será semelhante a um deslocamento da imagem no sentido transversal à órbita.

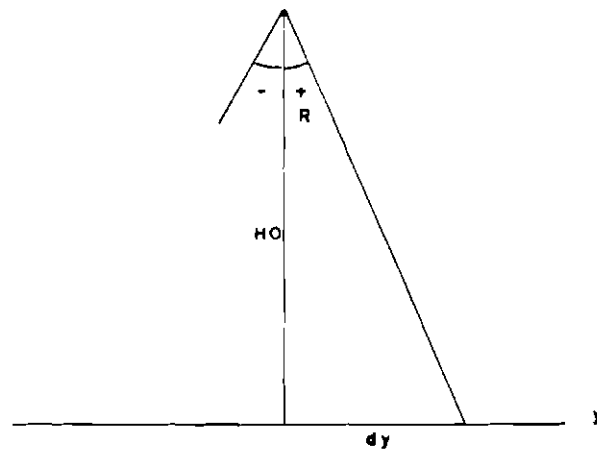


Fig. 4.10 - Deslocamento devido ao rolamento.

4.2.4 - ARFAGEM

O ângulo de arfagem atua apenas no sentido transversal às varreduras, e de acordo com a Figura 4.11 o desvio pode ser modelado pela Equação 4.28.

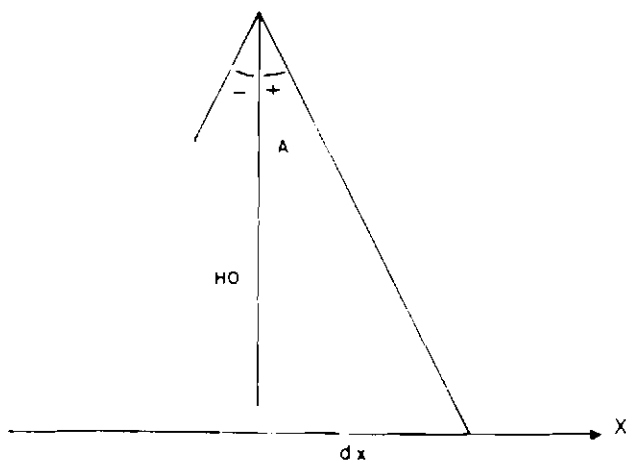


Fig. 4.11 - Deslocamento devido à arfagem.

$$dX_{ij} = H_0 \cdot \tan A_{ij} \quad (4.28)$$

Caso A_{ij} seja constante, o efeito causado será o de deslocamento da imagem ao longo da órbita.

4.2.5 - GUINADA

Diferente das demais componentes da atitude, o ângulo referente à guinada provoca desvios tanto no sentido da varredura, quanto no sentido transversal à varredura (Figura 4.12). O efeito pode ser representado por rotações causadas nas varreduras, em torno de um eixo vertical passando pelo centro da varredura. A Equação 4.29 modela estes desvios.

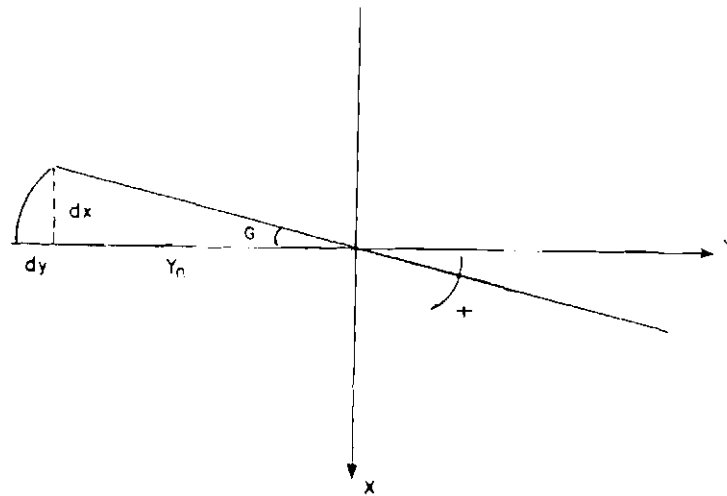


Fig. 4.12 - Deslocamento devido à guinada.

$$(dX, dY)_{ij} = Y_{nij} \cdot (\text{sen} G_{ij}, 1 - \cos G_{ij}) \quad (4.29)$$

4.2.6 - CISALHAMENTO DA VARREDURA

Corresponde ao movimento simultâneo entre satélite e espelho responsável pela varredura, e atua apenas no sentido transversal à varredura. Neste ponto determinam-se os desvios, causados pela velocidade do satélite, entre pontos da mesma varredura.

A partir da velocidade do satélite $(\dot{X}_S, \dot{Y}_S, \dot{Z}_S)_{ij}$ referente aos nós de uma dada linha (i é invariável) determinam-se os módulos da velocidade do ponto subsatélite (V_{ij}) colocando-os em ordem crescente em relação ao tempo t_{ij} .

Procedendo-se de forma semelhante à correção da variação da velocidade, pode-se integrar os dados e obter os valores correspondentes aos desvios dX_{ij} de cada nó, conforme a Equação 4.30.

$$dX_{ij} = \begin{cases} - \left(\sum_{l=j+1}^{K-1} v_{il} + \frac{v_{ij} + v_{iK}}{2} \right) \cdot \Delta t, & j < K \\ \left(\sum_{l=K+1}^{j-1} v_{il} + \frac{v_{iK} + v_{ij}}{2} \right) \cdot \Delta t, & j \geq K \end{cases} \quad (4.30)$$

onde Δt equivale ao intervalo de tempo entre dois nós consecutivos de uma linha:

$$\Delta t = TUV / (N - 1) \quad (4.31)$$

ou

$$\Delta t = TA \cdot NC / (N - 1) \quad (4.32)$$

Esta correção poderia ser integrada à correção devida à variação da velocidade, integrando-se os dados uma única vez. Porém, neste caso, os intervalos de integração não seriam constantes. Além disso, da forma como foram realizadas as correções, é possível quantizar em separado a distorção devida à variação da velocidade e a distorção relativa ao cisalhamento.

4.2.7 - DISTORÇÃO PANORÂMICA

Pelas características de projeção cilíndrica associada às tomadas de imagens de sensores remotos de varredura, o efeito da distorção panorâmica se faz sentir apenas no sentido das varreduras. Da Figura 4.13 é possível determinar o valor da coordenada Y corrigida, em função do ângulo de visada $\theta = f(C)$.

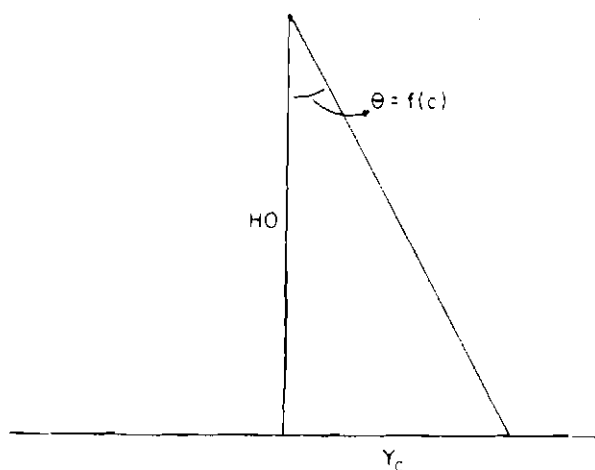


Fig. 4.13 - Distorção panorâmica.

$$Y_{ij} = H0 \cdot \tan \theta_j \quad (4.33)$$

O desvio dY_{ij} é dado então pela diferença entre a coordenada corrigida e a nominal.

$$dY_{ij} = Y_{cij} - Y_{nij} \quad (4.34)$$

onde Y_{cij} e Y_{nij} estão expressos, respectivamente, nas Equações 4.33 e 4.15.

4.2.8 - ROTAÇÃO DA TERRA

O efeito da rotação da Terra atua apenas no sentido das varreduras, provocando descontinuidades entre varreduras consecutivas. Estas descontinuidades podem ser modeladas a partir do conhecimento dos vetores velocidade tangencial da Terra ($\vec{V}_T$) e da frequência de varredura (FV) (Figuras 4.14 e 3.14)

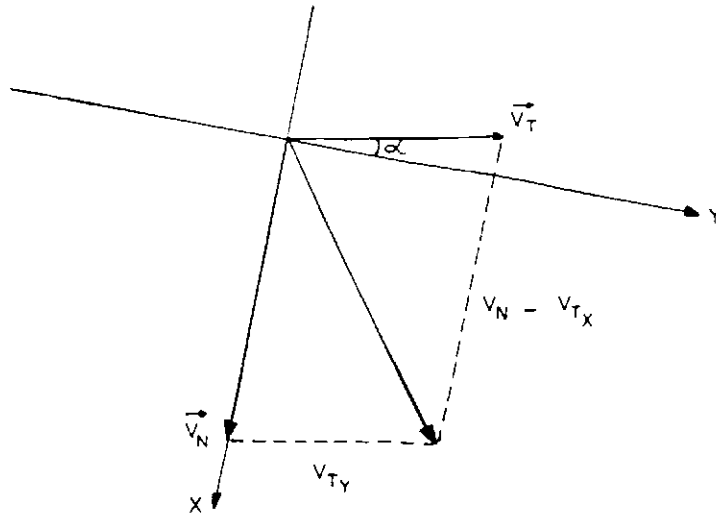


Fig. 4.14 - Efeito da rotação da Terra.

Tal efeito de deslocamento pode ser modelado pela Equação 4.35:

$$dY_{ij} = |\vec{V}_T| \cdot \cos \alpha / FV \quad (4.35)$$

4.2.9 - ESFERICIDADE DA TERRA

O efeito de esfericidade da Terra, conforme observado no capítulo anterior atua apenas no sentido das varreduras. De acordo com a Figura 4.15 é possível determinar Y_{cij} a partir de Y_{nij} . Com estes valores é possível obter dY_{ij} , pela diferença entre Y_{cij} e Y_{nij} .

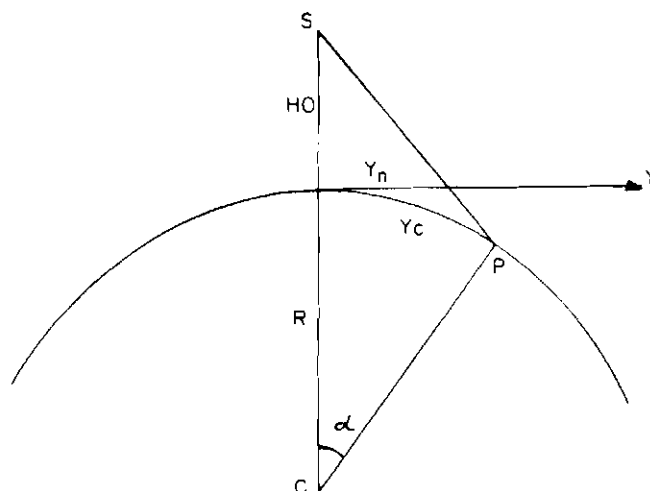


Fig. 4.15 - Efeito da esfericidade da Terra.

Pela lei do seno, no triângulo SPC, tem-se:

$$\frac{R}{\text{sen}\theta} = \frac{R + H_0}{\text{sen}(\theta + \alpha)} \quad (4.36)$$

onde

$$\theta = \tan^{-1}(Y_{nij} / H_0) \quad (4.37)$$

Da Equação 4.36, tem-se:

$$\alpha = \text{sen}^{-1}\left(\text{sen}\theta \cdot \frac{R + H_0}{R}\right) - \theta \quad (4.38)$$

Da Figura 4.15, tem-se:

$$Y_{cij} = R \cdot \alpha \quad (4.39)$$

Das Equações 4.39 e 4.15 pode-se determinar dY_{ij} :

$$dY_{ij} = Y_{cij} - Y_{nij} \quad (4.40)$$

4.2.10 - ANÁLISE DAS VANTAGENS E DESVANTAGENS DO MODELO

As vantagens que o modelo de correções independentes apresenta são poucas, mas algumas são importantes:

- é fácil associar distorções residuais na imagem com as possíveis fontes destas distorções;
- não é necessário o emprego de pontos de controle para aplicação do modelo.

As desvantagens, porém, são inúmeras e tornam desaconselhável o emprego deste modelo:

- não permite geração de produtos em diversas projeções cartográficas;
- trabalha-se o tempo todo sobre um sistema plano-retangular numa projeção não definida, porém próxima da SSP ("Space Strip Perspective" - Perspectiva Espacial por Faixas);
- o modelo não considera a interdependência das diversas distorções;
- é necessária a aproximação sucessiva da Terra por uma esfera.

Quanto ao refinamento do modelo por pontos de controle, só há uma possibilidade: o uso destes para gerar polinômios que reduzam os resíduos entre a imagem e a verdade terrestre. Neste ponto é possível referenciar a imagem a um Sistema de Projeção Cartográfica. Como as distorções são residuais, a ordem destes polinômios pode ser reduzida para primeiro ou segundo graus.

4.3 - MODELO FOTOGRAMÉTRICO

O modelo fotogramétrico é o que apresenta a solução mais elegante para relacionar um ponto P da imagem bruta, através de suas coordenadas (L,C) com um ponto Q situado na superfície do modelo de referência para a Terra, através de suas coordenadas (X,Y,Z) (Mikhail and Paderes, 1980).

Este modelo é o único que envolve um conceito físico, ao mesmo tempo em que modela as distorções sistemáticas de forma global, sem destacar cada uma isoladamente. Deste modo a interdependência das diversas fontes de distorção é levada em consideração pelo modelo.

O modelo fotogramétrico está fundamentado no princípio das equações de colinearidade, largamente empregado na Fotogrametria. Por este princípio, o ponto objeto Q, o ponto imagem P e o centro perspectivo (foco) devem estar alinhados. Uma vez conhecendo-se a posição de dois destes pontos, sendo que um deles deve ser o foco, e a superfície onde se encontra o terceiro, este último fica automaticamente deduzido.

No processo de correção são conhecidas as coordenadas do ponto imagem, do foco e a equação que modela a superfície de referência para a Terra, onde se localiza o ponto objeto a ser determinado.

Para o caso de imagens de sensores remotos orbitais, o princípio foi adaptado. Para cada ponto sobre a imagem bruta associa-se um vetor de visada, função da posição do satélite no instante referente à amostragem do ponto em questão. Este vetor, a posição do satélite e o ponto objeto devem ser colineares. Em outras palavras, o ponto objeto é determinado pela intersecção de uma reta com a superfície da Terra, onde esta reta é determinada pela posição do satélite e pela direção do vetor de visada $\vec{v}(\alpha, \beta, \gamma)$ (Figura 4.16).

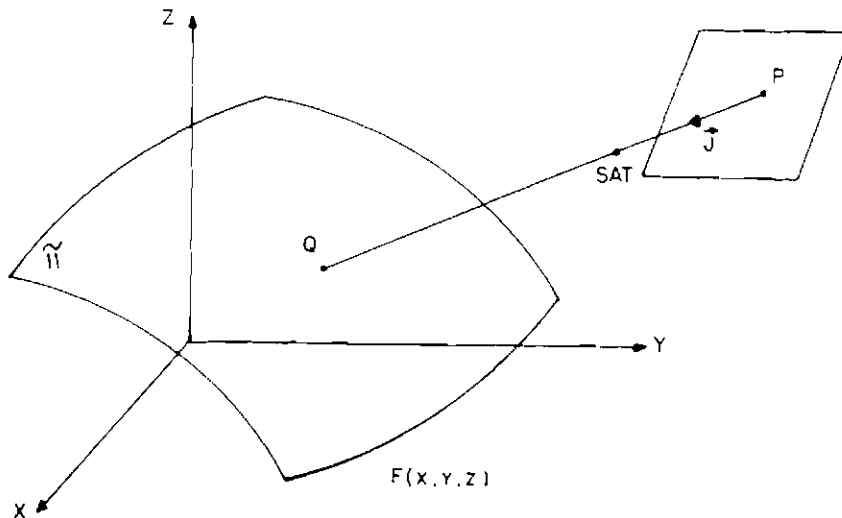


Fig. 4.16 - Princípio da equação de colinearidade.

Por este princípio fica possível, então, relacionar cada ponto da imagem bruta com um ponto sobre uma superfície de referência para a Terra. Esta superfície de referência pode ser um plano, uma esfera ou um elipsóide. No caso da superfície ser uma esfera ou um elipsóide é possível a conversão das coordenadas cartesianas (X,Y,Z) do ponto objeto Q para qualquer Sistema de Projeção Cartográfica desejado.

Os parâmetros necessários para a aplicação do modelo são:

- da plataforma: dados de efemérides (posição $\vec{R}$ (XS,YS,ZS) e velocidade $\vec{V}$ (XS,YS,ZS) e atitude (rolamento (R), arfagem (A) e guinada (G)). Os dados de efemérides podem ser substituídos, com prejuízo para a qualidade final da imagem, pelos parâmetros orbitais ou keplerianos do satélite.
- do instrumento: equação que relaciona posição do ponto na imagem bruta com o ângulo de visada ($\theta = f(C)$), de modo a possibilitar a definição do vetor de visada. Frequência de varredura (FV) para atualização dos instantes referentes ao início de cada

varredura. Taxa de amostragem de elementos de imagem (TA) ou tempo útil de varredura (TUV) para atualização dos instantes referentes a cada elemento de imagem dentro da varredura. Orientação entre o Sistema de Referência do Instrumento (SRI) e o Sistema de Referência do Sensor Atitude (SRA), obtida a partir dos ângulos de "boresight" (b_x, b_y, b_z).

- do modelo de referência para a Terra:

Caso 1: elipsóide - parâmetros que definem a forma (semi-eixo maior a e achatamento f), a posição (coordenadas do centro do elipsóide (X_0, Y_0, Z_0) no Sistema Geocêntrico de Greenwich (SGG) e a orientação entre os eixos do elipsóide e os eixos do SGG (ângulos δ, ξ, η).

Caso 2: esfera - caso particular de um elipsóide de achatamento nulo ($f=0$).

Caso 3: plano - coordenadas de um ponto pertencente ao plano (X_P, Y_P, Z_P) e as componentes do vetor normal ao mesmo (U_1, U_2, U_3) .

Para as aplicações de Sensoriamento Remoto a nível orbital, onde as imagens são tomadas a grande altitude e o poder resolutivo dos sensores é algumas ordens de grandeza inferior ao das câmeras aéreas, é comum considerar que o elipsóide (ou esfera) está centrado na origem do SGG e com seus eixos alinhados com os do referido sistema. Este procedimento simplifica os cálculos sem perda significativa da precisão do sistema.

De posse destes dados é possível então elaborar o modelo matemático baseado nas equações de colinearidade, conhecido como modelo fotogramétrico.

4.3.1 - MODELO MATEMÁTICO

Dado um ponto $P(L,C)$ sobre uma imagem bruta deseja-se determinar o ponto objeto $Q(X,Y,Z)$ sobre a superfície de referência da Terra.

O primeiro passo é determinar o instante t referente a tomada do ponto P , em função do tempo de início da imagem (TI), da frequência de varredura (FV) e da taxa de amostragem de elementos de imagem (TA) (ou do tempo útil de varredura TUV), conforme as Equações 4.21 e 4.22.

Em seguida interpolam-se os dados de efemérides e atitude do satélite para este instante t , obtendo-se $(XS, YS, ZS, \dot{X}S, \dot{Y}S, \dot{Z}S, R, A, G)$.

Neste ponto são conhecidos o modelo de referência para a Terra ($F(X,Y,Z)$) e a posição do satélite (XS,YS,ZS) , faltando determinar, apenas, as componentes do vetor de visada $\vec{v}(\alpha,\beta,\gamma)$.

A equação $\theta = f(C)$ possibilita a definição do vetor de visada referente ao SRI. Acontece que os dados de efemérides e a equação que modela a Terra encontram-se referidos ao Sistema Geocêntrico de Greenwich⁽¹⁾, ocorrendo, então, uma incompatibilidade entre os dados.

(1) *Os dados de efemérides podem ser transmitidos referidos a um Sistema Geocêntrico Inercial (SGI). Neste caso, antes de iniciar o processo de correção geométrica é interessante que estes dados sejam convertidos para o SGG, em função do tempo sideral associado a cada registro de dados.*

É necessário então, transformar as componentes do vetor de visada $\vec{v}_I(\alpha, \beta, \gamma)$ do SRI para o SGG, processo este realizado em três etapas.

Por construção, os Sistema de Referência do Instrumento (SRI) e o Sistema de Referência do Sensor Atitude (SRA) não são coincidentes. Os ângulos de "boresight" (b_x, b_y, b_z), estimados antes do lançamento do satélite, fornecem a orientação entre os dois sistemas (Figura 4.17) e permitem relacioná-los, conforme mostra a Equação 4.41.

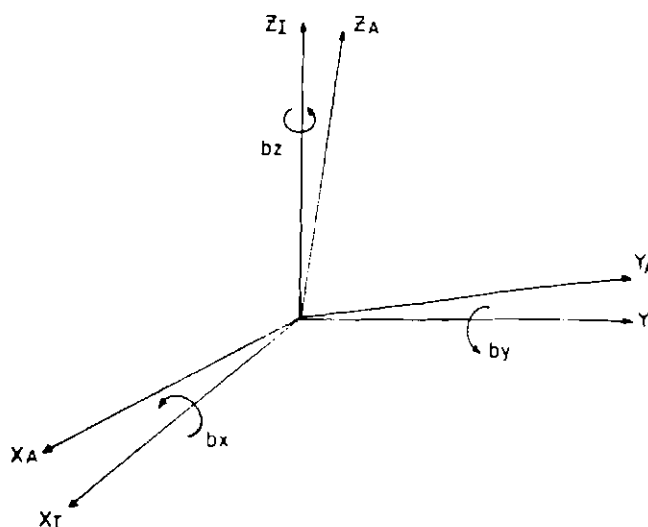


Fig. 4.17 - Orientação entre o SRI e o SRA.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SRA} = \begin{bmatrix} \text{matriz} \\ \text{de} \\ \text{boresight} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SRI} = MB \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SRI} \quad (4.41)$$

onde

$$MB = R_{b_x}^x \cdot R_{b_y}^y \cdot R_{b_z}^z \quad (4.42)$$

e R_{α}^s representa a matriz de rotação de um ângulo α em torno do eixo s .

O SRA foi projetado para olhar o centro da Terra, orientado pela direção do movimento do satélite. No entanto, devido aos movimentos rotacionais (atitude) sofridos pela plataforma, este sistema se afasta da situação projetada inicialmente. À situação projetada denomina-se de Sistema de Referência da Órbita (SRO), o qual se relaciona com o SRA através dos ângulos de atitude (R,A,G) (Figura 4.18).

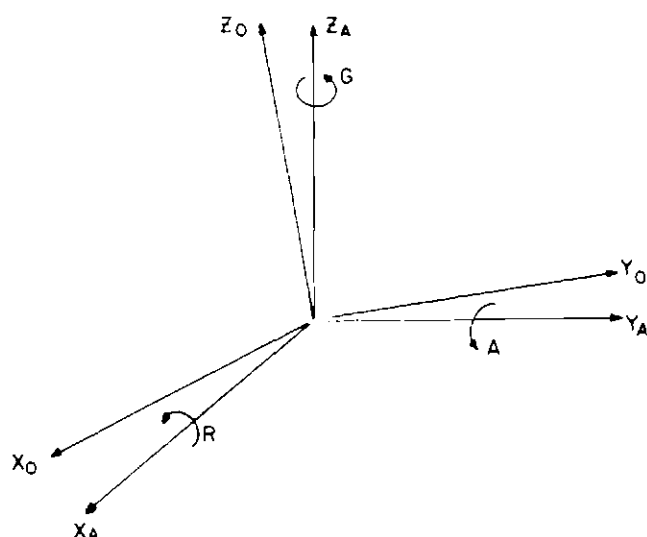


Fig. 4.18 - Orientação entre o SRA e o SRO.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SRO} = \begin{bmatrix} \text{matriz} \\ \text{de} \\ \text{atitude} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SRA} = MA \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SRA} \quad (4.43)$$

onde

$$MA = R_R^x \cdot R_A^y \cdot R_G^z \quad (4.44)$$

No terceiro e último passo convetem-se as coordenadas do SRO para o SGG utilizando-se uma matriz de orientação função dos dados de efemérides da plataforma (Figura 4.19), negligenciando-se, no entanto, as translações existentes entre os dois sistemas. Não há problema em se tomar esta medida, uma vez que serão convertidos apenas vetores referentes a direções

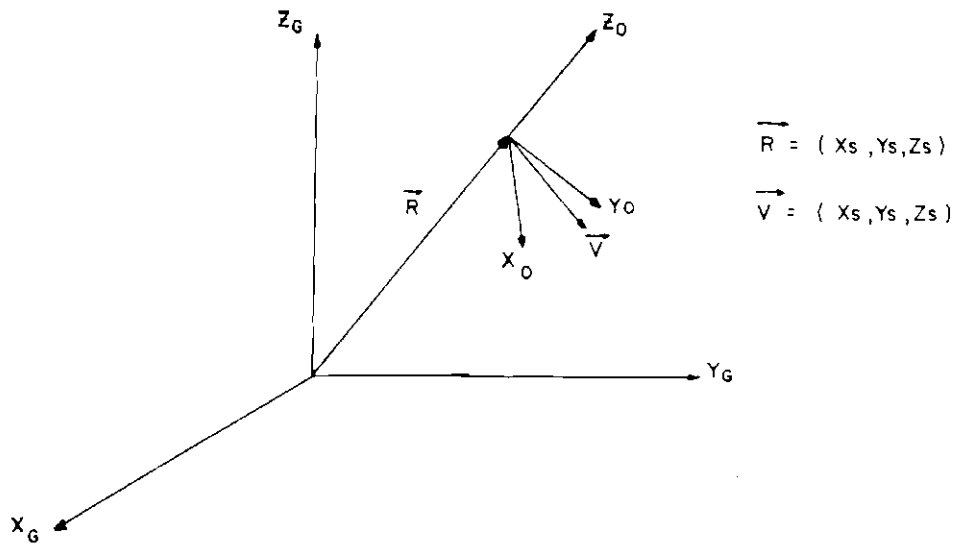


Fig. 4.19 - Orientação entre o SRO e o SGG.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SGG} = \begin{bmatrix} \text{matriz} \\ \text{de} \\ \text{efemérides} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SRO} = ME \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SRO} \quad (4.45)$$

Na Figura 4.19 $\vec{R}$, $\vec{V}$, $\vec{X}_0$ e $\vec{Z}_0$ são coplanares. O vetor unitário $\vec{R}'$ ($\vec{R}' = \vec{R}/|\vec{R}|$) no SGG corresponde ao vetor unitário $\vec{k} = (0,0,1)$ no SRO. O vetor unitário $\vec{R}' \wedge \vec{V}'$ ($\vec{V}' = \vec{V}/|\vec{V}|$) no SGG corresponde ao vetor unitário $\vec{j} = (0,1,0)$ no SRO. Finalmente, o vetor unitário $(\vec{R}' \wedge \vec{V}') \wedge \vec{R}'$ no SGG corresponde ao vetor unitário $\vec{i} = (1,0,0)$ no SRO. Reproduzindo estas correspondências através da Equação 4.44, tem-se:

$$\frac{1}{|\vec{R}|} \begin{bmatrix} XS \\ YS \\ ZS \end{bmatrix}_{SGG} = ME \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{SRO} \quad (4.46)$$

$$\frac{1}{|\vec{R}| \cdot |\vec{V}|} \cdot \begin{bmatrix} YS \cdot ZS - ZS \cdot YS \\ ZS \cdot XS - XS \cdot ZS \\ XS \cdot YS - YS \cdot XS \end{bmatrix}_{SGG} = ME \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_{SRO} \quad (4.47)$$

$$\frac{1}{|\vec{R}|} \cdot \begin{bmatrix} m_{22} \cdot ZS - m_{32} \cdot YS \\ m_{32} \cdot XS - m_{12} \cdot ZS \\ m_{12} \cdot YS - m_{22} \cdot XS \end{bmatrix}_{SGG} = ME \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{SRO} \quad (4.48)$$

onde

$$ME = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

e resolvendo as equações 4.45 a 4.47 tem-se respectivamente:

$$\begin{bmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{bmatrix} = \frac{1}{|\vec{R}|} \cdot \begin{bmatrix} XS \\ YS \\ ZS \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

$$\begin{bmatrix} m_{12} \\ m_{22} \\ m_{32} \end{bmatrix} = \frac{1}{|\vec{R}| \cdot |\vec{V}|} \cdot \begin{bmatrix} YS \cdot ZS - ZS \cdot YS \\ ZS \cdot XS - XS \cdot ZS \\ XS \cdot YS - YS \cdot XS \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

$$\begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{21} \\ m_{31} \end{bmatrix} = \frac{1}{|\vec{R}|} \cdot \begin{bmatrix} m_{22} \cdot ZS - m_{32} \cdot YS \\ m_{32} \cdot XS - m_{12} \cdot ZS \\ m_{12} \cdot YS - m_{22} \cdot XS \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

Das Equações 4.41, 4.43 e 4.45 obtem-se a equação matricial fundamental do sistema, que relaciona o SRS com o SGG:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SGG} = ME \cdot MA \cdot MB \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SRI} \quad (4.53)$$

Uma vez obtido o vetor unitário da visada $\bar{v}_G(\alpha, \beta, \gamma)$ no SGG o problema se reduz à determinação da intersecção da reta r passando pelo ponto posição do satélite, e com orientação dada pelo vetor de visada, com a superfície de referência F(X,Y,Z).

Equação da reta r:

$$\frac{X - XS}{\alpha} = \frac{Y - YS}{\beta} = \frac{Z - ZS}{\gamma} = p \quad (4.54)$$

ou na forma paramétrica:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \cdot p + \begin{bmatrix} XS \\ YS \\ ZS \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

Equação da superfície de referência para a Terra (F(X,Y,Z)=0):

Caso 1: Elipsóide

$$F(X, Y, Z) = (1 - e^2) \cdot (X^2 + Y^2) + Z^2 - a^2 \cdot (1 - e^2) = 0 \quad (4.56)$$

Substituindo-se a Equação 4.55 na Equação 4.56, tem-se:

$$(1 - e^2) \cdot [(\alpha \cdot p + XS)^2 + (\beta \cdot p + YS)^2] + (\gamma \cdot p + ZS)^2 - a^2 \cdot (1 - e^2) = 0 \quad (4.57)$$

$$\begin{aligned} & [(1 - e^2) \cdot (\alpha^2 + \beta^2) + \gamma^2] \cdot p^2 + \\ & 2 \cdot [(1 - e^2) \cdot (\alpha \cdot XS + \beta \cdot YS) + \gamma \cdot ZS] \cdot p + \\ & (1 - e^2) \cdot (XS^2 + YS^2 - a^2) + ZS^2 = 0 \end{aligned} \quad (4.58)$$

fazendo

$$A = (1 - e^2) \cdot (\alpha^2 + \beta^2) + \gamma^2 \quad (4.59)$$

$$B = 2 \cdot [(1 - e^2) \cdot (\alpha \cdot XS + \beta \cdot YS) + \gamma \cdot ZS] \quad (4.60)$$

$$C = (1 - e^2) \cdot (XS^2 + YS^2 - a^2) + ZS^2 = 0 \quad (4.61)$$

e substituindo na Equação 4.58, tem-se:

$$A \cdot p^2 + B \cdot p + C = 0 \quad (4.62)$$

Resolvendo a equação do segundo grau em p obtem-se duas raízes p_1 e p_2 , correspondentes às duas intersecções da reta com o elipsóide: uma no lado visível do satélite e a outra do lado não visível (Figura 4.20).

$$p_1 = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A} \quad (4.63)$$

$$p_2 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A} \quad (4.64)$$

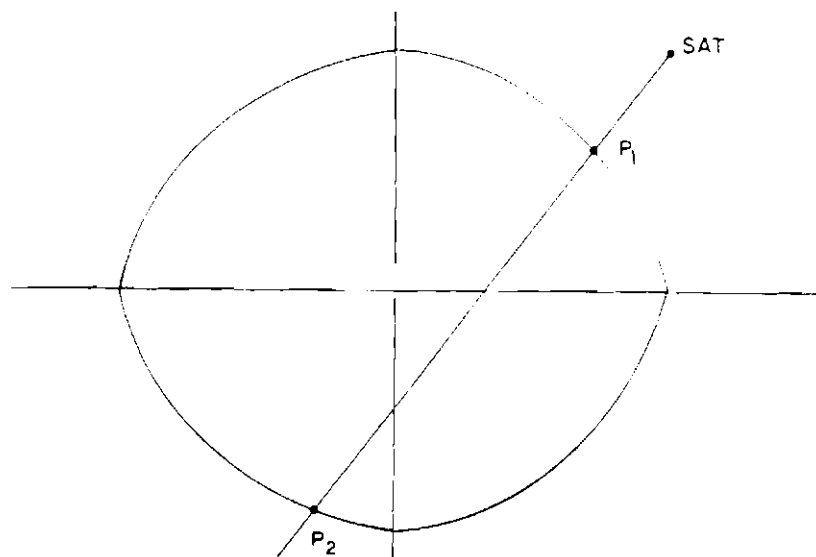


Fig. 4.20 - Intersecção da visada com o elipsóide.

Substituindo o valor de p_1 , correspondente ao ponto visível na Equação 4.55 obtem-se as coordenadas (XQ, YQ, ZQ) do ponto-objeto Q sobre o elipsóide.

Estas coordenadas cartesianas são então convertidas para coordenadas geodésicas (latitude ϕ e longitude λ), segundo as Equações 4.65 a 4.67.

$$X = N \cdot \cos \phi \cdot \cos \lambda \quad (4.65)$$

$$Y = N \cdot \cos \phi \cdot \sin \lambda \quad (4.66)$$

$$Z = N \cdot (1 - e^2) \cdot \sin \phi \quad (4.67)$$

onde

$$N = a / (1 - e^2 \cdot \sin^2 \phi)^{1/2} \quad (4.68)$$

Das Equações 4.65 a 4.67 pode-se extrair os valores de latitude e longitude:

$$\lambda = \tan^{-1}(Y/X) \quad (4.69)$$

$$\phi = \tan^{-1}(Z / ((X^2 + Y^2)^{1/2} \cdot (1 - e^2))) \quad (4.70)$$

Finalmente as coordenadas geodésicas podem ser convertidas em coordenadas plana-retangulares (X,Y) de qualquer sistema de Projeção Cartográfica.

A cadeia apresentada na Figura 4.21 sintetiza o mapeamento direto a partir do emprego do modelo fotogramétrico.

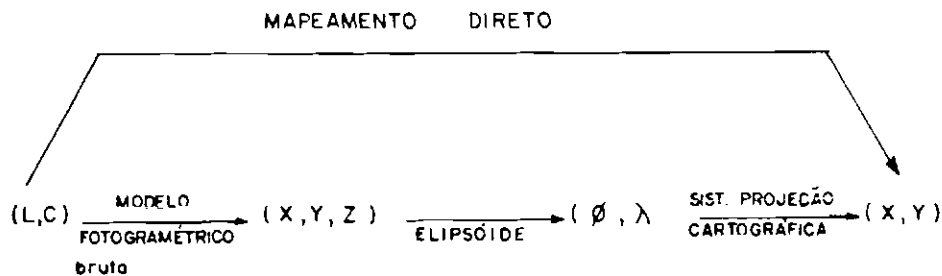


Fig. 4.21 - Fluxo das tarefas do modelo fotogramétrico.

Caso 2: Esfera - caso particular do elipsóide ($f = e = 0$)

Equações 4.59, 4.60 e 4.61 se reduzem a:

$$A = \alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 \quad (4.71)$$

$$B = 2 \cdot (\alpha \cdot XS + \beta \cdot YS + \gamma \cdot ZS) \quad (4.72)$$

$$C = XS^2 + YS^2 + ZS^2 - a^2 \quad (4.73)$$

As Equações 4.65, 4.66 e 4.67 se reduzem a:

$$X = a \cdot \cos \phi \cdot \cos \lambda \quad (4.74)$$

$$Y = a \cdot \cos \phi \cdot \sin \lambda \quad (4.75)$$

$$Z = a \cdot \sin \phi \quad (4.76)$$

A Equação 4.70 se reduz a:

$$\phi = \tan^{-1}(Z / (X^2 + Y^2)^{1/2}) \quad (4.77)$$

Neste caso as coordenadas geodésicas (ϕ, λ) podem, também, ser convertidas para qualquer Sistema de Projeção Cartográfica desejado.

Caso 3: Plano

$$F(X, Y, Z) = U_1 \cdot (X - X_T) + U_2 \cdot (Y - Y_T) + U_3 \cdot (Z - Z_T) = 0 \quad (4.78)$$

onde $\vec{U} = (U_1, U_2, U_3)$ é um vetor normal ao plano e (X_T, Y_T, Z_T) são as coordenadas do ponto de tangência entre o plano e o elipsóide de referência para a Terra.

Substituindo a Equação 4.55 na Equação 4.78, tem-se:

$$U_1 \cdot (\alpha \cdot p + X_S - X_T) + U_2 \cdot (\beta \cdot p + Y_S - Y_T) + U_3 \cdot (\gamma \cdot p + Z_S - Z_T) = 0 \quad (4.79)$$

Da Equação 4.79 tem-se:

$$p = \frac{U_1 \cdot (X_S - X_T) + U_2 \cdot (Y_S - Y_T) + U_3 \cdot (Z_S - Z_T)}{U_1 \cdot \alpha + U_2 \cdot \beta + U_3 \cdot \gamma} \quad (4.80)$$

Substituindo o valor de p na Equação 4.55 obtém-se as coordenadas (X_Q, Y_Q, Z_Q) do ponto-objeto Q sobre o plano de referência.

As coordenadas retangulares espaciais são convertidas para um sistema plano-retangular disposto sobre o plano de referência,

possibilitando, então, a discretização destas em coordenadas de imagem corrigida.

4.3.2 - ANÁLISE DAS VANTAGENS E DESVANTAGENS DO MODELO

O modelo fotogramétrico, baseado nas equações de colinearidade, é o conceitualmente mais correto e, que por isso mesmo, apresenta diversas vantagens sobre os demais modelos, onde as principais são:

- elimina praticamente todas as distorções presentes na imagem, sejam estas ligadas à plataforma, ao sistema sensor ou à Terra; ou ainda, de baixa ou de alta frequência. Está inerente ao modelo a interdependência de todas as distorções, que são eliminadas globalmente, sem necessidade de uma análise individual, detalhada, de cada fonte de distorção.
- o modelo permite a representação da imagem corrigida em qualquer Sistema de Projeção Cartográfica desejado.
- não necessita de pontos de controle, muito embora um pequeno número destes permita um bom refinamento da imagem.

O modelo fotogramétrico apresenta, ainda, uma potencialidade muito grande quanto ao refinamento por pontos de controle.

A maneira mais simples consiste em definir um polinômio que ajuste as coordenadas plana-retangulares, determinadas pelo modelo, com as coordenadas obtidas a partir de um levantamento. Em seguida aplica-se o polinômio às coordenadas de modelo dos nós da grade direta.

De forma mais elegante, pode-se utilizar a equação matricial fundamental do modelo (Equação 4.53) para refinar parâmetros cujos dados não tenham precisões necessárias à finalidade do sistema, ou cujos conhecimentos não sejam plenamente satisfatórios. Dois casos

clássicos referem-se ao refinamento dos dados de atitude (Caron and Simon, 1975) e efemérides (d'Alge et al., 1988) do satélite. Da Equação 4.53 é possível explicitar tanto a matriz de atitude, quanto a matriz de efemérides.

$$MA = ME^{-1} \cdot V_{SGG} \cdot V_{SRI}^T \cdot (MB \cdot V_{SRI} \cdot V_{SRI}^T)^{-1} \quad (4.81)$$

$$ME = V_{SGG} \cdot V_{SRI}^T \cdot (MA \cdot MB \cdot V_{SRI} \cdot V_{SRI}^T)^{-1} \quad (4.82)$$

Com auxílio de pontos de controle é possível determinar uma ou outra matriz, parametrizando os dados em função do tempo. Para determinar os parâmetros das funções temporais pode-se empregar o Princípio dos Mínimos Quadrados, ou o filtro estocástico de Kalman para refinar estimativas a priori realizadas sobre os dados primários transmitidos.

O modelo fotogramétrico possibilita também a análise individual de cada fonte de distorção. Como o modelo é integrado é possível estimar a influência de cada fonte de distorção, deixando que as demais flutuem naturalmente.

Para estudo da influência da variação da altitude, converte-se os dados referentes à posição do satélite (XS,YS,ZS) para coordenadas geodésicas (ϕ, λ, H). Substitui-se a componente da altitude pelo valor da altitude nominal e convertem-se os dados novamente para coordenadas retangulares no SGG. Dessa forma, todos os dados de efemérides terão altitude constante.

Para analisar a influência da atitude basta zerar uma ou mais componentes na matriz de atitude. Pode-se ainda adicionar valores constantes às componentes para avaliar os efeitos provocados.

O cisalhamento pode ser estudado considerando-se constante os dados de efemérides para todos os pontos de uma varredura (para o caso de sensores de varredura mecânica).

A distorção panorâmica é analisada a partir da consideração que a tangente do ângulo de visada varia linearmente com a posição do ponto na varredura bruta (coluna C).

Utilizando-se o modelo fotogramétrico sobre o plano pode-se avaliar o efeito da esfericidade da Terra.

O efeito da rotação da Terra é determinado quando se empregam dados de efemérides referentes a um Sistema Geocêntrico Inercial (SGI). Como o elipsóide é de revolução, centrado na origem do SGI e com os eixos coincidentes com este sistema, a equação do elipsóide de referência para a Terra permanece inalterada.

CAPÍTULO 5

O PROCESSAMENTO DAS IMAGENS SPOT

A SPOTIMAGE estabeleceu uma série de produtos padrões para a imagem HRV-SPOT, que diferem quanto ao nível de processamento dos seus dados. Estes produtos referem-se a processamento de cena inteira e apresentam tratamento radiométrico e geométrico diferenciado.

Todas as estações terrenas de processamento de imagens SPOT devem estar aptas a oferecer aos usuários os produtos padrões que vão desde a imagem sem correção geométrica (nível 1A) até a restituição de pares estereoscópicos HRV-SPOT (nível 4). Além destes níveis, completam a lista de produtos padrões imagens com nível de processamento 1B (correção geométrica de sistema monodimensional), nível 2A (correção geométrica de sistema bidimensional), nível 2B (nível 2A refinado por pontos de controle), nível 3 (nível 2B refinado pelo emprego de modelos de elevação do terreno, para imagens com visada oblíqua) e nível S (registro multitemporal entre imagens no mesmo modo de operação - XS com XS ou PAN com PAN).

A SPOTIMAGE especificou critérios de qualidade geométrica para cada nível de processamento, que devem ser rigorosamente cumpridos. O modelo de correção adotado é o fotogramétrico, que possibilita alcançar os níveis de precisão estabelecidos para cada nível de processamento.

Para o processo de correção geométrica, objetivo deste trabalho, são necessários parâmetros que incluem desde os dados básicos do sistema de formação de imagens (plataforma, instrumento e Terra) até dados auxiliares como pontos de controle e modelos de elevação do terreno.

Neste capítulo serão apresentadas as características principais de cada nível de processamento, sendo que os modelos de

correção geométrica inerentes ao processo serão vistos de forma detalhada. Antes, porém, serão apresentadas as características geométricas do instrumento, e da imagem, imprescindíveis para a aplicação do modelo fotogramétrico.

5.1 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO SISTEMA DE FORMAÇÃO DE IMAGENS

Os modelos de correção geométrica que serão apresentados servem tanto para a imagem no modo multiespectral (XS), quanto no modo pancromático (PAN), do mesmo modo que podem ser aplicados às imagens dos instrumentos HRV₁ ou HRV₂. Dessa forma apresentam-se diversos parâmetros associados a um e outro modo de operação, bem como aos diferentes instrumentos, de modo que os modelos de correção possam ser apresentados de forma genérica.

5.1.1 - PARÂMETROS DIFERENCIADORES DOS INSTRUMENTOS HRV₁ E HRV₂

Por construção a orientação entre os Sistemas de Referência dos Instrumentos HRV₁ e HRV₂ e o Sistema de Referência da Atitude (SRA) é dada pelos ângulos de "boresight", conforme a Figura 5.1.

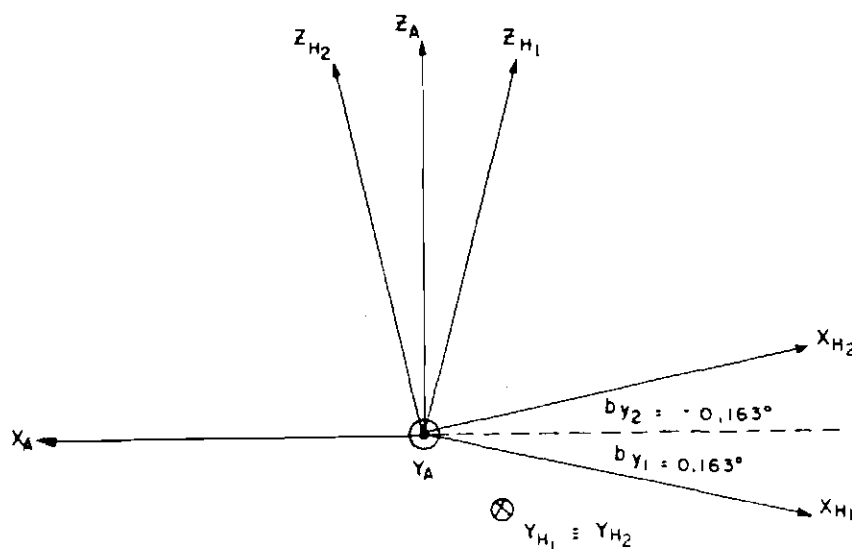


Fig. 5.1 - Orientação entre SRH_i e SRA.

De acordo com a Figura 5.1 os ângulos de "boresight" para o instrumento HRV₁ são: bx₁ = 0°, by₁ = 0,163° e bz₁ = 180°. Dessa forma a matriz de orientação entre o SRH₁ e o SRA (matriz de "boresight") é dada por:

$$MB_1 = R_{0^\circ}^x \cdot R_{0,163^\circ}^y \cdot R_{180^\circ}^z \quad (5.1)$$

$$MB_1 = I \cdot \begin{bmatrix} \cos 0,163^\circ & 0 & -\text{sen}0,163^\circ \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}0,163^\circ & 0 & \cos 0,163^\circ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos 180^\circ & \text{sen}180^\circ & 0 \\ -\text{sen}180^\circ & \cos 180^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$MB_1 = \begin{bmatrix} -\cos 0,163^\circ & 0 & -\text{sen}0,163^\circ \\ 0 & -1 & 0 \\ -\text{sen}0,163^\circ & 0 & \cos 0,163^\circ \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

e

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{SRA}} = MB_1 \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{SRH}_1} \quad (5.4)$$

ou

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{SRA}} = \begin{bmatrix} -X \cdot \cos 0,163^\circ - Z \cdot \text{sen}0,163^\circ \\ -Y \\ -X \cdot \text{sen}0,163^\circ + Z \cdot \cos 0,163^\circ \end{bmatrix}_{\text{SRH}_1} \quad (5.5)$$

Ainda na Figura 5.1 os ângulos de "boresight" para o instrumento HRV₂ são bx₂ = 0°, by₂ = -0,163° e bz₂ = 180°. De forma análoga ao instrumento HRV₁ tem-se para a matriz de "boresight" do instrumento HRV₂.

$$MB_2 = \begin{bmatrix} -\cos 0,163^\circ & 0 & \text{sen}0,163^\circ \\ 0 & -1 & 0 \\ \text{sen}0,163^\circ & 0 & \cos 0,163^\circ \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

e

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SRA} = \begin{bmatrix} -X \cdot \cos 0,163^\circ + Z \cdot \sin 0,163^\circ \\ -Y \\ X \cdot \sin 0,163^\circ + Z \cdot \cos 0,163^\circ \end{bmatrix}_{SRH_2} \quad (5.7)$$

5.1.2 - PARÂMETROS DIFERENCIADORES DO MODO MULTIESPECTRAL E DO MODO PANCROMÁTICO

Conforme apresentado no Capítulo 2, a imagem HRV-SPOT bruta apresenta 3.000 linhas (NL) de 3.000 pontos (NC) cada ou 6.000 linhas (NL) de 6.000 pontos (NC) cada, respectivamente nos modos XS e PAN. A resolução espacial (re) destes pontos é de 20 metros (XS) e 10 metros (PAN) e o período de varredura é de 3,008 milissegundos (XS) e 1,504 milissegundos (PAN).

Os sensores multispectral e pancromático estão dispostos em relação ao SRH_1 de tal forma que influenciam a determinação do vetor de visada $\vec{v}(x, \beta, \gamma)$ (Figura 5.2).

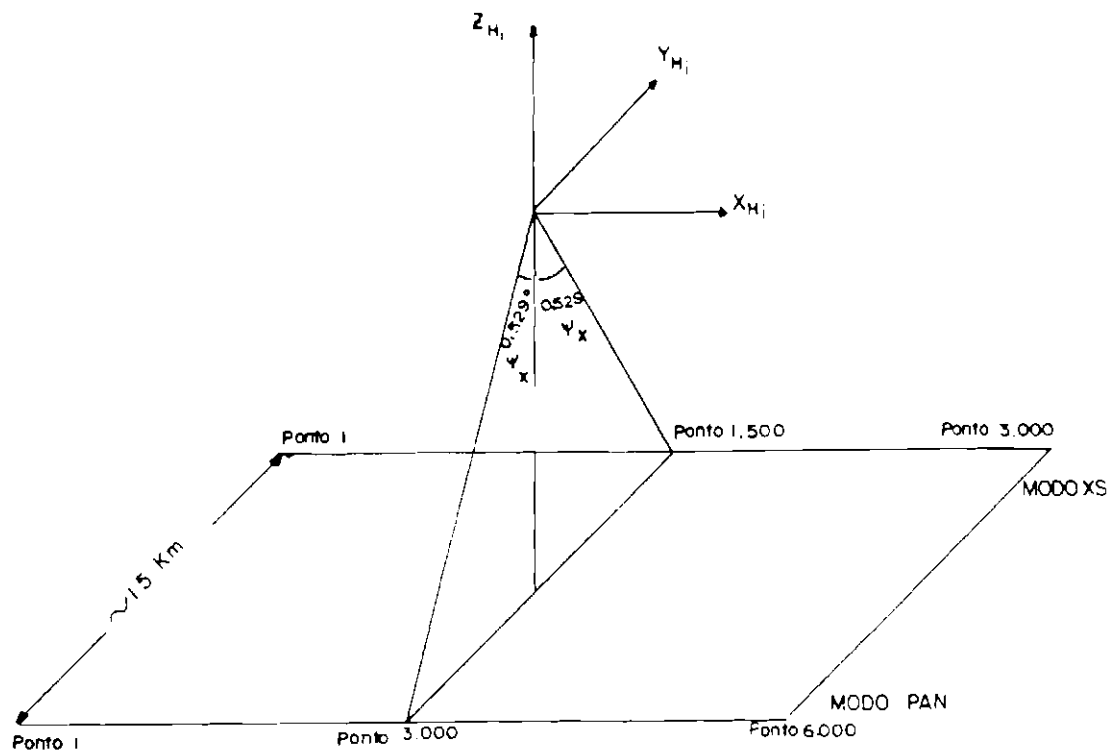


Fig. 5.2 - Disposição dos barretes dos modos XS e PAN em relação ao SRH_i .

A Figura auxiliar 5.3 permite observar o vetor de visada $\vec{v}$, referente a cada elemento (C) de imagem bruta, independente do modo de operação.

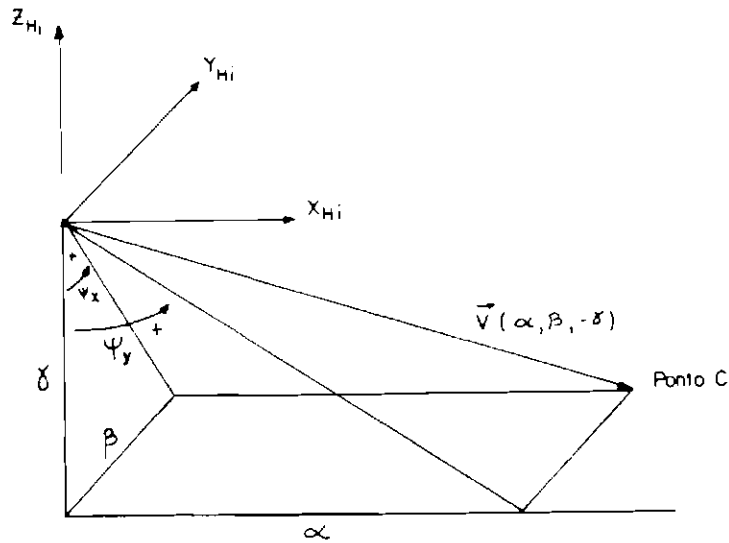


Fig. 5.3 - O vetor de visada $\vec{v}$.

Observando a Figura 5.3 pode-se concluir que o vetor de visada $\vec{v} (\alpha, \beta, \gamma)$ é função dos ângulos Ψ_x e Ψ_y . O ângulo Ψ_x é constante, tendo seu sinal definido pelo modo de operação do instrumento: XS ou PAN.

$$\Psi_x = \begin{cases} 0,529^\circ & \text{XS} \\ -0,529^\circ & \text{PAN} \end{cases} \quad (5.8)$$

O ângulo Ψ_y é função do detetor (coluna C) e do modo de operação do instrumento, e sua equação é dada por:

$$\Psi_y = \begin{cases} \tan^{-1}[(C - 1500) \cdot 2,4 \cdot 10^{-5}] & \text{XS} \\ \tan^{-1}[(C - 3000) \cdot 1,2 \cdot 10^{-5}] & \text{PAN} \end{cases} \quad (5.9)$$

Da Figura 5.3, considerando o vetor de visada como unitário, tem-se:

$$\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1 \quad (5.10)$$

$$\tan \Psi_y = \alpha / \gamma \quad (5.11)$$

ou

$$\alpha = \gamma \cdot \tan \Psi_y \quad (5.12)$$

$$\tan \Psi_x = \beta / \gamma \quad (5.13)$$

ou

$$\beta = \gamma \cdot \tan \Psi_x \quad (5.14)$$

Substituindo as Equações 5.12 e 5.14 em 5.10, tem-se:

$$\gamma^2 \cdot \tan^2 \Psi_y + \gamma^2 \cdot \tan^2 \Psi_x + \gamma^2 = 1 \quad (5.15)$$

ou

$$\gamma = 1 / (1 + \tan^2 \Psi_x + \tan^2 \Psi_y)^{1/2} = 1 / Q \quad (5.16)$$

Substituindo 5.16 em 5.12 e 5.14 tem-se:

$$\alpha = \tan \Psi_y / Q \quad (5.17)$$

$$\beta = \tan \Psi_x / Q \quad (5.18)$$

Assim tem-se, para as coordenadas do vetor de visada $\vec{v}$ ($\alpha, \beta, -\gamma$):

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} \tan \Psi_y \\ \tan \Psi_x \\ -1 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{(1 + \tan^2 \Psi_x + \tan^2 \Psi_y)^{1/2}} \quad (5.19)$$

É fácil observar pela Figura 5.3 a coerência do sinal de cada componente de $\vec{v}$.

Considerando a possibilidade de rotação do espelho para tomadas de cenas oblíquas é interessante incorporar esta rotação no vetor de visada (Figura 5.4), ao invés de se criar mais um sistema de referência. Dessa forma, as coordenadas do vetor de visada sofrerão mudanças provocadas por uma rotação em torno do eixo Y_H .

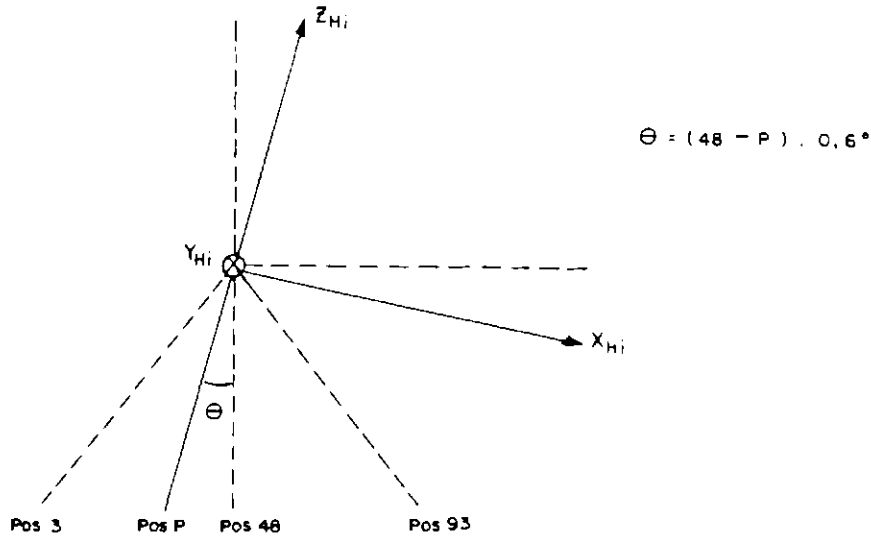


Fig. 5.4 - Influência da posição do espelho na visada.

$$\vec{v}_f = R_\theta^y \cdot \vec{v} \quad (5.20)$$

$$\vec{v}_f = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tan \Psi_y \\ \tan \Psi_x \\ -1 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{(1 + \tan^2 \Psi_x + \tan^2 \Psi_y)^{1/2}} \quad (5.21)$$

$$\vec{v}_f = \begin{bmatrix} \tan \Psi_y \cdot \cos \theta + \sin \theta \\ \tan \Psi_x \\ \tan \Psi_y \cdot \sin \theta - \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{(1 + \tan^2 \Psi_x + \tan^2 \Psi_y)^{1/2}} \quad (5.22)$$

Levantadas as diferenças de tratamento entre os modos de operação multispectral e pancromático (números de linhas e colunas por cena, resolução espacial, período de varredura e ângulo de visada) e entre os instrumentos HRV₁ e HRV₂ (ângulos de "boresight") pode-se, de

agora em diante, referir-se de forma genérica aos parâmetros NL, NC, re, PV, $\theta = f(C)$, bx, by e bz.

5.2 - NÍVEL 0

O nível 0 retrata a imagem HRV-SPOT no seu estado bruto, sem tratamento de espécie alguma. Os dados são exatamente os transmitidos pelo satélite, apenas formatados para representarem uma imagem HRV-SPOT, quer no modo multispectral, quer no modo pancromático.

Este nível de processamento não é disponível ao usuário, não constando, portanto, das listas de produtos padrões da imagem HRV-SPOT.

5.3 - NÍVEL 1A

Este é o nível de processamento mais simples que o usuário pode dispor. Neste nível a imagem sofre correções radiométricas que visam às calibrações relativa e absoluta dos seus detetores. Nenhum tratamento geométrico é executado ainda. Neste caso a imagem no nível 1A se presta somente para análises qualitativas. Este nível é de especial importância para aplicações envolvendo restituição de pares estereoscópicos ou para estudos básicos de radiometria.

5.4 - NÍVEL 1B

Neste nível a correção radiométrica já se apresenta de modo completo, envolvendo tanto as calibrações relativa e absoluta encontradas no nível 1A, quanto as deconvoluções ao longo das linhas e das colunas. As deconvoluções têm a função de restaurar a qualidade radiométrica dos dados, eliminando as degradações radiométricas causadas, principalmente, pelo sistema ótico do instrumento e pelo meio físico que separa o instrumento do objeto imageado (atmosfera).

No nível 1B aparece o primeiro modelo de correção geométrica que, de forma simplificada, relaciona monodimensionalmente um ponto da imagem corrigida, com um ponto da imagem bruta, conforme as Equações 5.23 a 5.25.

$$L = f(I) \quad (5.23)$$

$$C = g(J) \quad (5.24)$$

$$\Delta J = h(J) \quad (5.25)$$

Estas funções representam uma simplificação da função $F: I^2 \rightarrow R^2$ que estabelece o mapeamento inverso entre a imagem corrigida (I, J) e a imagem bruta (L, C) .

$$(L, C) = F(I, J) \quad (5.26)$$

ou

$$(L, C) = (F_1(I, J), F_2(I, J)) \quad (5.27)$$

A adoção de um modelo de correção geométrica monodimensional representa uma grande economia no custo computacional do processo de reamostragem da imagem corrigida. Neste caso todos os pontos de uma linha corrigida estão relacionados com uma única linha da imagem bruta (Equação 5.23). Todas as linhas corrigidas têm o mesmo comprimento, garantido pela Equação 5.24, variando apenas o número de "pixels negros" à direita e à esquerda de cada linha (Equação 5.25), usualmente denominados "pixels de skew".

O modelo físico adotado, então, para o mapeamento direto, é o modelo fotogramétrico sobre um plano tangente ao elipsóide de referência para a Terra. O ponto de tangência é o correspondente, no elipsóide, ao ponto central da imagem bruta. Ou seja, para determinação do ponto de tangência é necessário aplicar o modelo

fotogramétrico sobre o elipsóide de referência para o ponto central da imagem bruta ($L=NL/2$, $C=NC/2$).

Pelas características de tomada de cena por uma câmara do tipo CCD todos os pontos de uma mesma linha são amostrados no mesmo instante t . Isto implica em que todos os vetores referentes às visadas destes pontos sejam coplanares. A intersecção do plano formado por este feixe de vetores com o plano de referência para a Terra (Figura 5.5) é uma reta, o que valida o caráter monodimensional da Equação 5.23.

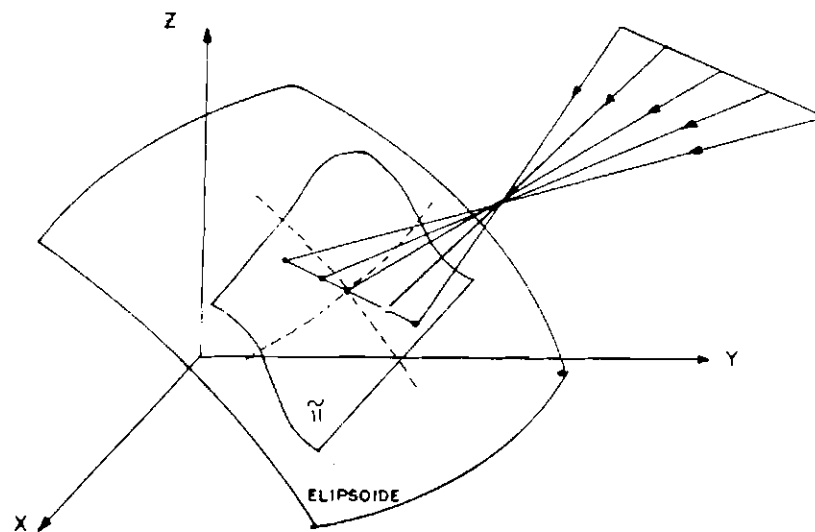


Fig. 5.5 - Intersecção do feixe de visadas com o plano de referência para a Terra.

Deve-se ressaltar que a direção desta reta é função da direção da velocidade do satélite e do ângulo referente à guinada do satélite, podendo variar de linha para linha. Na realidade, o que ocorre na prática é justamente a variação destes parâmetros de linha para linha.

Por outro lado, os pontos pertencentes a uma dada coluna bruta são amostrados em instantes distintos, submetidos a diferentes efeitos de atitude (aqui importa principalmente o ângulo de rolamento) e direções de velocidade. Além destes, o efeito da rotação da Terra

vem também contribuir para a ocorrência de descontinuidades entre linhas consecutivas. Estas descontinuidades estão representadas pela Equação 5.25.

As funções f , g e h foram especificadas como polinômios do 3º grau. Para determinação dos coeficientes ($\{f_i\}$, $\{g_i\}$ e $\{h_i\}$) destes polinômios é necessária a aplicação do modelo físico apenas sobre uma linha e uma coluna da imagem bruta.

Definida a linha corrigida I associada a um ponto de uma linha bruta L , toda a linha L já terá seu destino definido. Assim, amostrando pontos ao longo da coluna central pode-se definir os coeficientes do polinômio f . Essa amostra da coluna central, obtida em instantes distintos, sujeita a variações de atitude, direção de velocidade e rotação da Terra permite, ainda, a determinação dos coeficientes do polinômio h .

O polinômio g é determinado a partir de uma amostra obtida sobre uma determinada linha bruta, que vai permitir associar uma coluna bruta C com uma corrigida J , a menos das descontinuidades fornecidas por h .

Assim, a determinação dos coeficientes dos polinômios f , g e h é realizada a partir da aplicação do modelo fotogramétrico sobre o plano, para uma amostra de 61 pontos regularmente espaçados ao longo da linha central ($\{g_i\}$) e outros tantos ao longo da coluna central ($\{f_i\}$ e $\{h_i\}$) (Figura 5.6). Neste caso, ao invés de uma grade, tem-se uma cruz amostral.

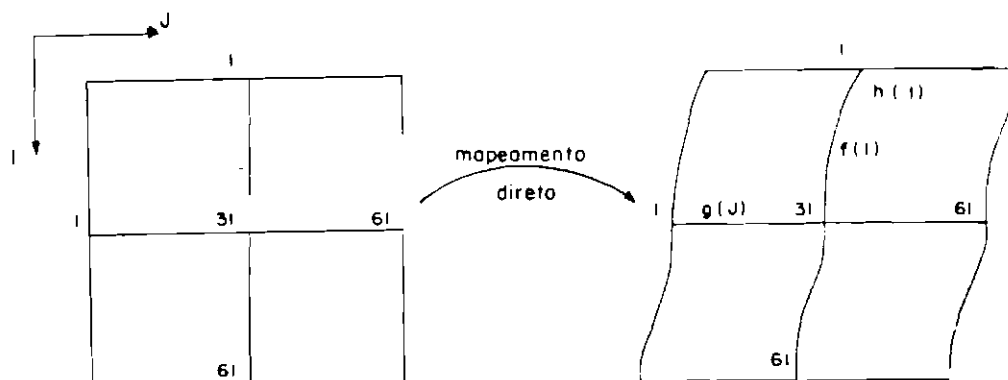


Fig. 5.6 - Mapeamento direto entre imagem bruta e imagem corrigida.

A escolha de polinômios para o mapeamento inverso no nível 1B tem como razão principal a economia no volume de dados a serem armazenados na base de dados SPOT, uma vez que obter a cruz inversa por interpolação da cruz direta é simples e mais preciso.

Ocorre que para todas as cenas gravadas pela estação terrena SPOT, são calculados e armazenados os parâmetros necessários à correção geométrica no nível 1B. Este procedimento facilita a linha de produção de imagens, pois quando um usuário solicita uma cena nível 1B não é mais necessário extrair dados auxiliares e determinar os parâmetros de correção geométrica. Basta consultar a base de dados e acessar os parâmetros associados àquela cena. Armazenando-se os coeficientes de polinômios de terceiro grau necessita-se de um espaço para doze informações (quatro coeficientes para cada polinômio). No caso de armazenar a cruz inversa necessitar-se-ia de um campo para cento e vinte e duas informações referentes a linha e coluna bruta de cada nó da amostra regular sobre a imagem corrigida. Há, dessa forma, uma grande economia no volume de dados optando-se pelos polinômios.

O nível de processamento 1B é o de maior procura, principalmente em função do custo. É o nível básico para fotointerpretação e análise temática. As especificações da SPOTIMAGE quanto à qualidade geométrica são: variação de comprimento inferior a 10^{-2} , para distâncias superiores a 500 metros; anisomorfismo inferior a 10^{-3} e precisão de localização de 1.500 metros para imagens verticais e de 1.800 metros para imagens oblíquas (Begni and Henry, 1988). Análise realizada pela SPOTIMAGE sobre 51 cenas HRV-SPOT apresentaram resultados satisfatórios. Em média as cenas apresentaram variação de comprimento de $1,5 \times 10^{-3}$, um anisomorfismo entre $0,8 \times 10^{-3}$ e $1,6 \times 10^{-3}$, e uma precisão de localização de 830 metros.

5.4.1 - MAPEAMENTO DIRETO NO NÍVEL 1B

Deseja-se realizar o mapeamento direto para uma amostra de N pontos ao longo da linha central (P_j) e N pontos ao longo da coluna central (P_i) de uma cena HRV-SPOT. São conhecidos o número de linhas (NL) e colunas (NC) da imagem bruta, a resolução espacial (re), o período de varredura (PV), o tempo inicial da cena (TI), a equação do ângulo de visada $\Psi_y = f(C)$, o modo de operação, o número do instrumento, a posição do espelho, além dos dados de atitude (R,A,G) e efemérides (XS, YS, ZS, $\dot{X}S$, $\dot{Y}S$, $\dot{Z}S$).

Para aplicação do modelo para cada ponto da amostra é necessário determinar a posição do satélite, o vetor de visada $\vec{v}$ e a equação do plano de referência para a Terra. É importante notar que a equação do plano é a mesma para qualquer ponto da amostra.

5.4.1.1 - POSIÇÃO DO SATÉLITE REFERENTE A UM PONTO DA AMOSTRA

A posição do satélite (XS,YS,ZS) é determinada a partir da interpolação dos dados de efemérides em função do tempo t associado a cada ponto da amostra. Este tempo t é calculado em função do tempo inicial da cena (TI), do período de varredura (PV) e da linha (L) onde foi coletada a amostra.

$$t = TI + L.PV \quad (5.28)$$

Para os pontos da linha central, tem-se:

$$L_j = NL/2 \quad (\text{constante}) \quad (5.29)$$

e o tempo referente a cada ponto desta linha é dado por:

$$t_j = TI + L_j.PV \quad (5.30)$$

ou

$$t_j = TI + NL.PV/2 \quad (\text{constante}) \quad (5.31)$$

O tempo t_j é constante, como não poderia deixar de ser, já que todos os pontos pertencem a uma mesma linha e são amostrados instantaneamente. O tempo associado à linha central é, também, conhecido como tempo do centro da cena (t_c).

Para os pontos da coluna central, tem-se:

$$L_i = \frac{NL}{(N-1)} \cdot (i - 1) \quad (5.32)$$

e

$$t_i = TI + \frac{NL}{(N-1)} \cdot (i - 1).PV \quad (5.33)$$

De posse do tempo t interpola-se o arquivo de efemérides obtendo-se os dados relativos à posição e velocidade do satélite para cada ponto da amostra.

Linha Central: $(XS_j, YS_j, ZS_j, \dot{X}S_j, \dot{Y}S_j, \dot{Z}S_j)$ ou
 $(XS_c, YS_c, ZS_c, \dot{X}S_c, \dot{Y}S_c, \dot{Z}S_c)$,

já que $t_j = t_c$.

Coluna Central: $(XS_i, YS_i, ZS_i, \dot{X}S_i, \dot{Y}S_i, \dot{Z}S_i)$

A interpolação deve seguir as recomendações apresentadas no Capítulo 3.

5.4.1.2 - VETOR DE VISADA REFERENTE A CADA PONTO DA AMOSTRA

De acordo com a Equação 5.22 o vetor de visada $\vec{v}_H$ fica definido no Sistema de Referência do Instrumento pelos ângulos Ψ_x (constante cujo sinal é dado pelo modo de operação do instrumento), $\Psi_y=f(C)$ e θ (função da posição do espelho).

Para linha central, tem-se:

$$C_j = NC / (N - 1) \cdot (j - 1) \quad (5.34)$$

$$\Psi_{yj} = f(C_j) \quad (5.35)$$

e

$$\vec{v}_{Hj} = \begin{bmatrix} \tan \Psi_{yj} \cdot \cos \theta + \operatorname{sen} \theta \\ \tan \Psi_x \\ \tan \Psi_{yj} \cdot \operatorname{sen} \theta - \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{(1 + \tan^2 \Psi_x + \tan^2 \Psi_{yj})^{1/2}} \quad (5.36)$$

Para coluna central, tem-se:

$$c_i = NC / 2 \quad (5.37)$$

$$\Psi_{yi} = 0^\circ \quad (5.38)$$

e

$$\vec{v}_{Hi} = \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \tan \Psi_x \\ -\cos \theta \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{(1 + \tan^2 \Psi_x)^{1/2}} \quad (5.39)$$

donde se conclui que $\vec{v}_{Hi}$ é constante no SRH_i , para todos os pontos da coluna central.

Para converter as coordenadas do vetor de visada do SRH para o Sistema Geocêntrico de Greenwich são necessárias as matrizes de "boresight" (MB), de efemérides (ME) e de atitude (MA), conforme a equação fundamental do modelo fotogramétrico (Equação 4.53).

A matriz de "boresight" está explicitada nas Equações 5.3 e 5.6. A matriz de efemérides pode ser determinada observando-se a Figura 5.7.

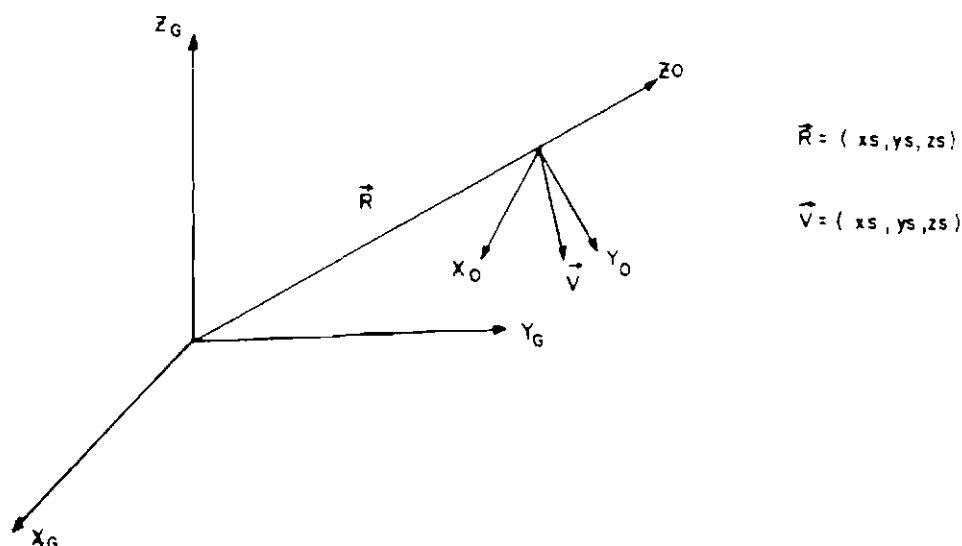


Fig. 5.7 - Orientação entre o SR0 e o SGG.

Para a linha central, a matriz de efemérides é constante para todos os pontos, variando de ponto para ponto na coluna central.

Na Figura 5.7, $\vec{R}$, $\vec{V}$, $\vec{Y}_0$ e $\vec{Z}_0$ são coplanares. O vetor unitário $\vec{R}'$ no SGG corresponde ao vetor unitário $\vec{k} = (0,0,1)$ no SR0, o vetor unitário $\vec{V}' \wedge \vec{R}'$ no SGG corresponde ao vetor unitário $\vec{i} = (1,0,0)$

no SRO e o vetor unitário $\vec{R}' \wedge (\vec{V}' \wedge \vec{R}')$ no SGG corresponde ao vetor unitário $\vec{j} = (0,1,0)$ no SRO. As diferenças entre a descrição da matriz de efemérides para o SPOT e a matriz de efemérides apresentada no Capítulo 4 (Equações 4.45 a 4.52) devem-se a convenções de Sistemas de Referência da Órbita distintas. No sistema apresentado no Capítulo 4 o eixo $\vec{X}_0$ era coplanar aos vetores $\vec{V}$ e $\vec{R}$ e o eixo $\vec{Y}_0$ normal a esses dois vetores, completando o triedro direto. A SPOTIMAGE convenceu que o eixo $\vec{Y}_0$ seria coplanar aos vetores $\vec{V}$ e $\vec{R}$ e o eixo $\vec{X}_0$, normal a esses dois vetores, completaria o triedro direto. Assim, para o SPOT, pode-se escrever que:

$$[\vec{R}']_{SGG} = ME \cdot [\vec{k}]_{SRO} \quad (5.40)$$

$$[\vec{V}' \wedge \vec{R}']_{SGG} = ME \cdot [\vec{i}]_{SRO} \quad (5.41)$$

$$[\vec{R}' \wedge (\vec{V}' \wedge \vec{R}')]_{SGG} = ME \cdot [\vec{j}]_{SRO} \quad (5.42)$$

fazendo:

$$ME = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (5.43)$$

tem-se, das Equações 5.40 a 5.42, que:

$$\begin{bmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{bmatrix} = \frac{1}{|\vec{R}|} \begin{bmatrix} XS \\ YS \\ ZS \end{bmatrix} \quad (5.44)$$

$$\begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{21} \\ m_{31} \end{bmatrix} = \frac{1}{|\vec{V}| \cdot |\vec{R}|} \begin{bmatrix} YS \cdot ZS - ZS \cdot YS \\ ZS \cdot XS - XS \cdot ZS \\ XS \cdot YS - YS \cdot XS \end{bmatrix} \quad (5.45)$$

$$\begin{bmatrix} m_{12} \\ m_{22} \\ m_{32} \end{bmatrix} = \frac{1}{|\underline{R}|} \cdot \begin{bmatrix} YS \cdot m_{31} - ZS \cdot m_{21} \\ ZS \cdot m_{11} - XS \cdot m_{31} \\ XS \cdot m_{21} - YS \cdot m_{11} \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

Para determinação da matriz de atitude é necessário a interpolação dos dados de atitude a partir do instante t referente a cada ponto da amostra.

Para a linha central ($t_j = t_c$) a atitude é considerada nula e para os pontos da coluna central a atitude final é igual a atitude interpolada subtraída da atitude do centro da cena.

$$\begin{bmatrix} R \\ A \\ G \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} R \\ A \\ G \end{bmatrix}_{\text{interpolado}} - \begin{bmatrix} R \\ A \\ G \end{bmatrix}_c \quad (5.47)$$

A atitude do centro da cena $(R, A, G)_c$ é calculada interpolando-se o arquivo de atitude em função do tempo referente ao centro da cena t_c . A interpolação deve ser feita segundo as recomendações do Capítulo 3.

Para cada ponto da coluna central interpola-se, em função do tempo t_j , o arquivo de dados de atitude. Observando-se a Figura 5.8 é possível montar a matriz de atitude MA.

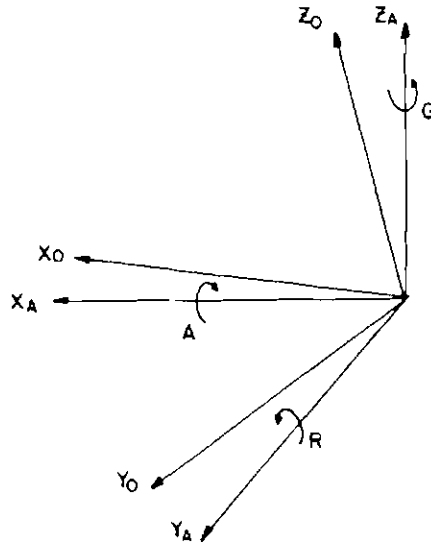


Fig. 5.8 - Orientação entre o SRA e o SRO.

$$MA_i = R_{R_i}^x \cdot R_{A_i}^y \cdot R_{G_i}^z \quad (5.48)$$

$$MA_i = \begin{bmatrix} \cos R_i & 0 & -\sin R_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin R_i & 0 & \cos R_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A_i & \sin A_i \\ 0 & -\sin A_i & \cos A_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos G_i & \sin G_i & 0 \\ -\sin G_i & \cos G_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.49)$$

$$MA_i = \begin{bmatrix} cR_i \cdot cG_i - sR_i \cdot sA_i \cdot sG_i & cR_i \cdot sG_i + sR_i \cdot sA_i \cdot cG_i & -sR_i \cdot cA_i \\ -cA_i \cdot sG_i & cA_i \cdot cG_i & sA_i \\ sR_i \cdot cG_i + cR_i \cdot sA_i \cdot sG_i & sR_i \cdot sG_i - cR_i \cdot sA_i \cdot cG_i & cR_i \cdot cA_i \end{bmatrix} \quad (5.50)$$

$$MA_j = I \quad (\text{Matriz de Identidade}) \quad (5.51)$$

De posse das três matrizes de orientação (MB, ME e MA) procede-se à conversão do vetor de visada $\vec{v}_H$ do SRH para o SGG $\vec{v}_G$ (α, β, γ).

$$\vec{v}_G = (\alpha, \beta, \gamma) = ME \cdot MA \cdot MB \cdot \vec{v}_H \quad (5.52)$$

5.4.1.3 - EQUAÇÃO DO PLANO DE REFERÊNCIA PARA A TERRA

O plano de referência para a Terra é tangente ao elipsóide no ponto-objeto correspondente ao ponto-imagem central da imagem bruta. É necessário definir as coordenadas deste ponto (X_T, Y_T, Z_T) para possibilitar a determinação da equação do plano.

Para o centro da cena já foram determinados a posição do satélite $(XS, YS, ZS)_c$ e o vetor de visada $\vec{v}_{Gj}$ ou $\vec{v}_{Gi}$ $(\alpha, \beta, \gamma)_c$ para $i = j = (N+1)/2$. Pode-se, então, determinar a equação da reta suporte do vetor de visada.

$$r_c = \frac{X - XS_c}{\alpha_c} = \frac{Y - YS_c}{\beta_c} = \frac{Z - ZS_c}{\gamma_c} = p \quad (5.53)$$

ou, na forma paramétrica:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}_c \cdot p + \begin{bmatrix} XS \\ YS \\ ZS \end{bmatrix}_c \quad (5.54)$$

Interceptando esta reta com o elipsóide de referência

$$(1 - e^2) \cdot (X^2 + Y^2) + Z^2 - a^2 \cdot (1 - e^2) = 0 \quad (5.55)$$

obtem-se as coordenadas (X_T, Y_T, Z_T) do ponto-objeto desejado.

Substituindo X, Y, Z da Equação 5.54 na Equação 5.55 tem-se uma equação do segundo grau em p .

$$\begin{aligned} & [(1 - e^2) \cdot (\alpha_c^2 + \beta_c^2) + \gamma_c^2] \cdot p^2 + \\ & 2 \cdot [(1 - e^2) \cdot (\alpha_c \cdot XS_c + \beta_c \cdot YS_c) + \gamma_c \cdot ZS_c] \cdot p + \\ & (1 - e^2) \cdot (XS_c^2 + YS_c^2 - a^2) + ZS_c^2 = 0 \end{aligned} \quad (5.56)$$

Conforme estudado no Capítulo 4 é possível determinar o parâmetro p_1 (raiz que fornece o ponto no lado visível da Terra), e substituindo p_1 na Equação 5.54 obtém-se as coordenadas do ponto tangente (X_T, Y_T, Z_T) .

Conhecido um ponto do plano fica faltando definir as coordenadas de um vetor $\vec{U}(U_1, U_2, U_3)$ normal ao plano para a completa determinação de sua equação. Este vetor pode ser justamente o vetor normal ao elipsóide no ponto de tangência (Figura 5.9).

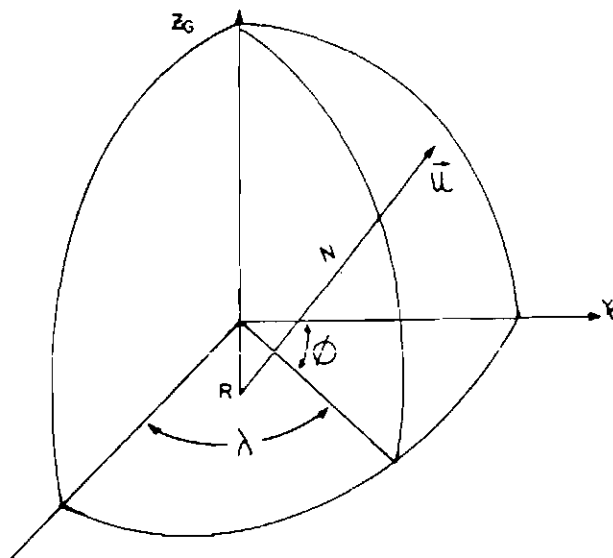


Fig. 5.9 - Vetor normal ao elipsóide.

Conhecidas as coordenadas (X_T, Y_T, Z_T) do ponto tangente, pode-se determinar as coordenadas de R $(0, 0, -N \cdot e^2 \cdot \sin \phi)$, onde N é a grande normal ao elipsóide para o ponto tangente, dada pela Equação 4.68. Para definição de ϕ utiliza-se a relação entre coordenadas retangulares e geodésicas dada pelas Equações 4.69 e 4.70.

O vetor $\vec{U}'$ normal ao plano é o vetor unitário de $\vec{RQ}$, onde:

$$\vec{RQ} = (X_T, Y_T, Z_T + N \cdot e^2 \cdot \sin \phi) \quad (5.57)$$

e

$$\vec{U}' = (U_1, U_2, U_3) = \vec{RQ}' = \vec{RQ} / |\vec{RQ}| \quad (5.58)$$

Definido $\vec{U}'$ pode-se então escrever a equação do plano tangente:

$$U_1 \cdot (X - X_c) + U_2 \cdot (Y - Y_c) + U_3 \cdot (Z - Z_c) = 0 \quad (5.59)$$

5.4.1.4 - DETERMINAÇÃO DO PONTO OBJETO

Conhecidos o vetor de visada $\vec{v}_G$ e a posição do satélite (XS,YS,ZS) para um ponto da amostra, pode-se escrever a equação da reta suporte da visada, já na forma paramétrica.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \cdot p + \begin{bmatrix} XS \\ YS \\ ZS \end{bmatrix} \quad (5.60)$$

Interceptando esta reta com o plano tangente de referência para a Terra (Equação 5.59), determina-se as coordenadas do ponto objeto, no SGG.

$$U_1 \cdot (\alpha \cdot p + XS - X_c) + U_2 \cdot (\beta \cdot p + YS - Y_c) + U_3 \cdot (\gamma \cdot p + ZS - Z_c) = 0 \quad (5.61)$$

donde

$$p = \frac{U_1 \cdot (XS - X_c) + U_2 \cdot (YS - Y_c) + U_3 \cdot (ZS - Z_c)}{U_1 \cdot \alpha + U_2 \cdot \beta + U_3 \cdot \gamma} \quad (5.62)$$

Substituindo-se p na Equação 5.60 obtém-se as coordenadas do ponto-objeto Q, correspondente a cada ponto-imagem da amostra selecionada.

5.4.1.5 - DETERMINAÇÃO DO PLANO IMAGEM CORRIGIDA

As coordenadas associadas aos pontos-objeto Q_i e Q_j referem-se ao SGG, sendo portanto coordenadas tridimensionais. Para converter estas coordenadas para coordenadas de imagem corrigida (I,J) é necessário, num passo intermediário, torná-las planas.

O sistema de coordenadas de projeção é definido então, conforme a Figura 5.10, onde o eixo $\vec{Z}_p$ é normal ao elipsóide no ponto de tangência (Q_T), o eixo $\vec{Y}_p$ tem a direção da intersecção do feixe de visadas da linha central com o plano tangente e orientado de tal forma que $(\vec{Y}_p \wedge \vec{Z}_p) \cdot \vec{V} > 0$ e o eixo $\vec{X}_p$ completa o triedro direto. A origem deste sistema é o ponto de tangência Q_T . Neste sistema de coordenadas todos os pontos-objetos terão coordenadas $Z_p = 0$.

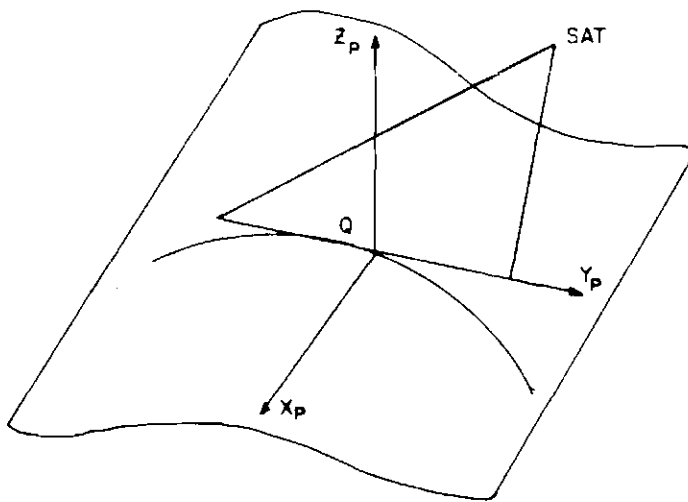


Fig. 5.10 - Sistema de projeção normal ao plano de referência.

Para relacionar os dois sistemas deve-se determinar um vetor na direção de $\vec{Y}_p$. Este vetor fica definido por dois pontos distintos Q_{j1} e Q_{j2} , sendo que se $j_2 > j_1$, então:

$$\vec{Q}_{j1} \vec{Q}_{j2} = \frac{(Q_{j2} - Q_{j1})}{|Q_{j2} - Q_{j1}|} \quad (5.63)$$

O vetor unitário $\vec{Q}_{j1}\vec{Q}_{j2}'$ será denominado de $\vec{\Delta Q}$.

Agora é só observar que o vetor unitário $\vec{U}'$, normal ao elipsóide no ponto de tangência, no SGG equivale ao vetor unitário $\vec{k} = (0,0,1)$ no Sistema de Projeção. O vetor unitário $\vec{\Delta Q}$ no SGG equivale ao vetor unitário $\vec{j} = (0,1,0)$ no Sistema de Projeção. Finalmente o vetor unitário $\vec{\Delta Q} \wedge \vec{U}'$ no SGG equivale ao vetor unitário $\vec{i} = (1,0,0)$ no Sistema de Projeção.

Pode-se, então, escrever a equação que relaciona os dois sistemas (SGG e SP).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SGG} = MR \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SP} + \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} \quad (5.64)$$

fazendo:

$$MR = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (5.65)$$

tem-se:

$$[\vec{U}']_{SGG} = MR \cdot (0, 0, 1)_{SP} \quad (5.66)$$

donde

$$(m_{13}, m_{23}, m_{33}) = \vec{U}' \quad (5.67)$$

$$[\vec{\Delta Q}]_{SGG} = MR \cdot (0, 1, 0) \quad (5.68)$$

donde

$$(m_{12}, m_{22}, m_{32}) = \vec{\Delta Q} \quad (5.69)$$

$$[\vec{\Delta Q} \wedge \vec{U}']_{SGG} = MR \cdot (1, 0, 0) \quad (5.70)$$

donde

$$(m_{11}, m_{21}, m_{31}) = \vec{\Delta Q} \wedge \vec{U}' \quad (5.71)$$

Invertendo a Equação 5.64 pode-se explicitar o SP em função do SGG.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SP} = MR^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SGG} - MR^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} \quad (5.72)$$

Após a conversão das coordenadas, de todos os pontos Q_i e Q_j das amostras ao longo da coluna central e da linha central, respectivamente, do SGG para o SP tem-se as coordenadas num sistema cartesiano plano-retangular, uma vez que $Z_p = 0$, qualquer que seja o ponto sobre o plano de referência.

O próximo passo é discretizar as coordenadas $(X_p, Y_p)_i$ e $(X_p, Y_p)_j$ em coordenadas de imagem corrigida (I, J) . Essa discretização segue a orientação da Figura 5.11, onde os eixos do sistema de projeção são paralelos aos eixos do sistema de coordenadas corrigidas.

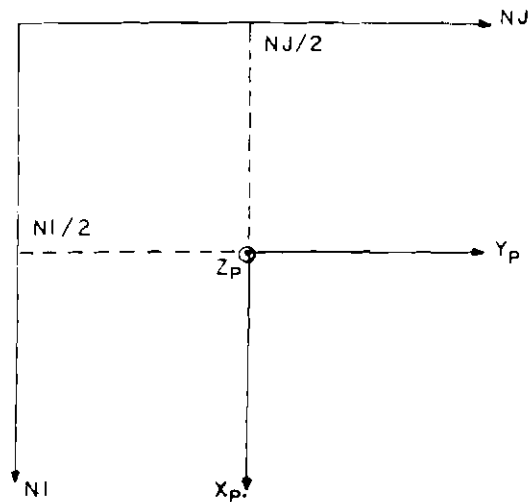


Fig. 5.11 - Orientação entre o SP e o Sistema de Coordenadas de imagem corrigida.

Da Figura 5.11 tem-se:

$$I = X_p / re + NI / 2 \quad (5.73)$$

$$J = Y_p / re + NJ / 2 \quad (5.74)$$

Neste ponto completa-se a cadeia referente ao mapeamento direto que relaciona cada ponto da imagem bruta, a partir de suas coordenadas (L,C), com um ponto da imagem corrigida, através de suas coordenadas (I,J).

5.4.2 - MAPEAMENTO INVERSO NO NÍVEL 1B

O mapeamento inverso, no nível 1B, conforme visto anteriormente, é apresentado pelas Equações 5.23 a 5.25. Os coeficientes dos polinômios f e h são determinados a partir da amostra sobre a coluna central (P_i), enquanto que os coeficientes do polinômio g são determinados a partir da amostra sobre a linha central (P_j).

Partindo-se das coordenadas de imagem bruta dos pontos da coluna central $P(L,C)_i$ aplica-se o modelo fotogramétrico sobre o plano de referência e obtém-se as coordenadas retangulares espaciais $Q(X,Y,Z)_i$ referentes ao SGG. Em seguida convertem-se as coordenadas espaciais de Q_i em coordenadas planas sobre o plano de projeção $(X_p,Y_p)_i$. No último passo discretizam-se as coordenadas cartesianas planas em coordenadas de imagem corrigida $(I,J)_i$.

Os deslocamentos ΔJ_i são obtidos a partir da subtração entre cada J_i e J_N ($\Delta J_i = J_i - J_N$). Obtidos três conjuntos de coordenadas $\{L_i\}$, $\{I_i\}$ e $\{J_i\}$, é possível determinar os coeficientes dos polinômios f e h , que relacionam I_i e L_i e I_i e ΔJ_i :

$$L_i = f_0 + f_1 \cdot I_i + f_2 \cdot I_i^2 + f_3 \cdot I_i^3 \quad (5.75)$$

$$\Delta J_i = h_0 + h_1 \cdot I_i + h_2 \cdot I_i^2 + h_3 \cdot I_i^3 \quad (5.76)$$

Colocando a Equação 5.75 na forma matricial, e utilizando o princípio dos mínimos quadrados, no método paramétrico, tem-se:

$$\begin{array}{c} \begin{bmatrix} 1 & I_1 & I_1^2 & I_1^3 \\ 1 & I_2 & I_2^2 & I_2^3 \\ 1 & I_3 & I_3^2 & I_3^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & I_N & I_N^2 & I_N^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ \vdots \\ L_N \end{bmatrix} \\ \begin{array}{ccc} \text{A} & \text{X} & \text{B} \\ \text{N} \times 4 & 4 \times 1 & \text{N} \times 1 \end{array} \end{array} \quad (5.77)$$

$$A \cdot X = B \quad (5.78)$$

Considerando a matriz peso igual à identidade ($P = I$), já que todas as coordenadas são de modelo, tem-se:

$$X = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot B \quad (5.79)$$

Para determinação de $\{h_i\}$ procede-se de forma análoga, onde a matriz B é formada pelos ΔJ_i e a matriz X é formada pelos $\{h_i\}$.

A determinação dos coeficientes $\{g_i\}$ parte da aplicação do modelo fotogramétrico sobre a amostra disposta na linha central $P(L,C)_j$, sofrendo o mesmo processo executado sobre os pontos da coluna central, até se chegar a $P(I,J)_j$. Neste ponto relacionam-se as coordenadas de imagem corrigida J_j com as coordenadas de imagem bruta C_j , conforme a Equação 5.80:

$$C_j = g_0 + g_1 \cdot J_j + g_2 \cdot J_j^2 + g_3 \cdot J_j^3 \quad (5.80)$$

Colocando o sistema na forma matricial, e aplicando o princípio dos mínimos quadrados é possível determinar os coeficientes $\{g_i\}$ do polinômio g , conforme observado para os coeficientes dos polinômios f e h .

5.5 - NÍVEL 2A

A correção radiométrica no nível 2A é idêntica à correção radiométrica do nível 1B (calibrações relativa e absoluta e deconvoluções ao longo das linhas e das colunas).

Quanto ao aspecto geométrico, a correção já se apresenta no modo bidimensional, com o mapeamento inverso respeitando as Equações 5.26 e 5.27. Neste nível, ainda, as correções geométricas são de sistema, não fazendo uso de dados auxiliares, tais como pontos de controle e modelos digitais de elevação do terreno.

O modelo matemático adotado para o mapeamento direto é o modelo fotogramétrico sobre um elipsóide de referência para a Terra. Este procedimento vai permitir a geração de imagens HRV-SPOT nível 2A em qualquer Sistema de Projeção Cartográfica, escolhido pelo usuário.

As etapas neste processo são:

- aplicação do modelo fotogramétrico para uma grade amostral de $N \times N$ pontos (N ímpar) $P(L,C)_{ij}$ regularmente espaçados sobre a imagem bruta, fornecendo as coordenadas retangulares espaciais, referentes ao SGG, para os correspondentes pontos-objeto $Q(X,Y,Z)_{ij}$.
- conversão das coordenadas retangulares espaciais $Q(X,Y,Z)_{ij}$ para coordenadas geodésicas $Q(\phi,\lambda)_{ij}$
- conversão das coordenadas geodésicas $Q(\phi,\lambda)_{ij}$ para coordenadas plana-retangulares, num determinado Sistema de Projeção Cartográfica $Q'(X_P,Y_P)_{ij}$.
- discretização das coordenadas cartesianas de projeção em coordenadas de imagem corrigida $P'(I,J)_{ij}$.
- aplicação do mapeamento inverso para definição da grade regularmente espaçada sobre a imagem corrigida.

Quanto ao mapeamento inverso bidimensional pode-se adotar polinômios (solução clássica), ou então utilizar interpolações por partes a partir de transformações projetivas.

Qualquer processamento referente à imagem nível 2A só é realizado quando ocorre o pedido de um usuário. Os dados necessários para a correção não são armazenados em uma base de dados. Dessa forma a única preocupação, ao estipular-se o modelo matemático de correção geométrica, é o de otimizar a relação custo computacional frente à precisão do modelo.

É importante destacar que o tempo consumido nas etapas de mapeamento direto e inverso é, geralmente, muito menor que o tempo necessário para realizar a reamostragem da imagem corrigida. De toda forma alguns parâmetros, como as dimensões da grade direta e o grau do polinômio representativo do mapeamento inverso, serão analisados visando comparar tempo de processamento com precisão do modelo.

O modelo fotogramétrico é aplicado a uma grade amostral de $N \times N$ pontos. No caso da determinação das coordenadas de projeção associadas a um ponto fora da grade é necessária a interpolação bilinear a partir dos quatro nós da grade mais próximos ao ponto em questão. Quanto mais densa for a grade amostral menor será o intervalo para interpolação, resultando em dados interpolados mais precisos. Por outro lado, um aumento na densidade da grade resulta num aumento do esforço computacional. É importante procurar definir uma dimensão ótima para a grade amostral.

Outro parâmetro a ser estudado é o grau do polinômio representativo do mapeamento inverso. Serão analisados polinômios de diversos graus, inclusive analisando o grau do polinômio frente a diferentes tamanhos de grade amostral. Dependendo do grau do polinômio adotado pode não ser necessário um maior adensamento da grade, ou vice-versa.

Caso o mapeamento inverso seja realizado por interpolações por partes, é certo que quanto mais densa for a grade direta, mais precisa será a grade inversa.

Os parâmetros referentes à geometria das imagens no nível 2A diferem dos parâmetros das imagens do nível 1B quanto aos aspectos relacionados à geometria interna. Uma vez que o nível 2A não faz uso de pontos de controle a precisão de localização permanece em 1.500 metros. A variação de comprimento deve ser inferior a 10^{-2} e o anisomorfismo inferior a 10^{-3} . Além disso, a precisão interna deve ser inferior a 0,5 "pixel". Estes valores só são atingidos para imagens em tomadas verticais ou próximas a verticais. As imagens com visadas oblíquas devem ser processadas conforme o nível 3, que elimina as distorções relativas ao relevo e permite alcançar as especificações estabelecidas para as imagens do nível 2A.

5.5.1 - MAPEAMENTO DIRETO NO NÍVEL 2A

O mapeamento direto pressupõe o conhecimento dos mesmos parâmetros do sistema necessários à correção geométrica no nível 1B: número de linhas (NL) e colunas (NC) da imagem bruta e número de linhas (NI) e colunas (NJ) da imagem corrigida, a resolução espacial (re), o período de varredura (PV), o tempo inicial da cena (TI), a equação do ângulo de visada $\Psi_y = f(C)$, o modo de operação, o número do instrumento, a posição do espelho, além dos dados de atitude (R,A,G) e efemérides (XS, YS, ZS, $\dot{X}S$, $\dot{Y}S$, $\dot{Z}S$).

O modelo fotogramétrico é aplicado para uma grade de NxN pontos P_{ij} sobre a imagem bruta, cujas coordenadas de imagem são:

$$L_{ij} = \frac{NL}{(N-1)} \cdot (i - 1) \quad (5.81)$$

$$C_{ij} = \frac{NC}{(N-1)} \cdot (j - 1) \quad (5.82)$$

O tempo associado a cada ponto P_{ij} é função apenas da linha L_{ij} , ou seja, de i , e é dado por:

$$t_i = TI + L_{ij} \cdot PV \quad (5.83)$$

De posse do tempo t_i é possível interpolar os dados de efemérides (XS, YS, ZS, $\dot{X}S$, $\dot{Y}S$, $\dot{Z}S$) e atitude (R,A,G) $_{ij}$ do satélite, para cada ponto P_{ij} . Vale lembrar que estes dados são constantes para todos os pontos de uma mesma linha.

O vetor de visada $\vec{v}_{Hj}$ no SRH é função apenas da coluna C_{ij} , logo de j , da posição do espelho e do modo de operação do instrumento.

Combinando-se a variação de efemérides e atitude em função da Linha L_{ij} e a variação do vetor de visada em função da coluna

C_{ij} , obtém-se para cada ponto P_{ij} um vetor de visada $\vec{v}_{Gij}$ distinto, referente ao SGG.

$$\vec{v}_{Gij} = ME_i \cdot MA_i \cdot MB \cdot \vec{v}_{Hj} \quad (5.84)$$

Conhecidas as componentes do vetor de visada $\vec{v}_{Gij}$ no SGG e as coordenadas da posição do satélite $(XS,YS,ZS)_{ij}$, para cada ponto P_{ij} da grade amostral, determina-se a equação da reta suporte do vetor de visada (r_{ij}). A intersecção da reta r_{ij} com o elipsóide de referência fornece as coordenadas retangulares espaciais dos pontos objeto $Q(X,Y,Z)_{ij}$ (Figura 5.12).

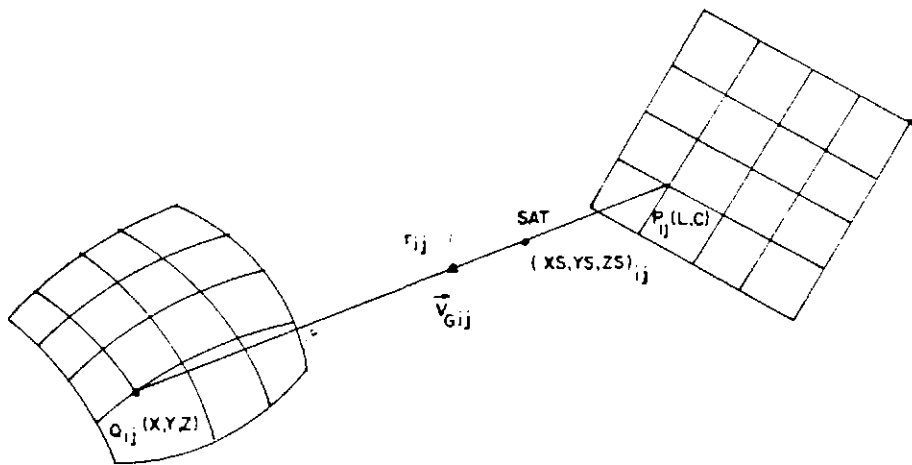


Fig. 5.12 - Mapeamento direto no nível 2A.

As coordenadas cartesianas $(X,Y,Z)_{ij}$ são, então, convertidas em coordenadas geodésicas $(\phi,\lambda)_{ij}$ conforme as Equações 4.69 e 4.70. Em função da projeção cartográfica escolhida pelo usuário, converte-se as coordenadas geodésicas em coordenadas plana-retangulares de projeção $(XP,YP)_{ij}$.

As imagens no nível 2A devem estar orientadas para o norte geográfico. Dessa forma, o Sistema de Coordenadas de Imagem Corrigida e o Sistema de Projeção Cartográfica têm seus eixos

paralelos. Para realizar a discretização das coordenadas cartesianas (XP,YP) em coordenadas de imagem corrigida (I,J), basta conhecer as coordenadas cartesianas do nó central da grade (XP,YP)_{KK} (K=(N+1)/2), a resolução espacial (re) e o número de linhas (NI) e colunas (NJ) da imagem corrigida (Figura 5.13).

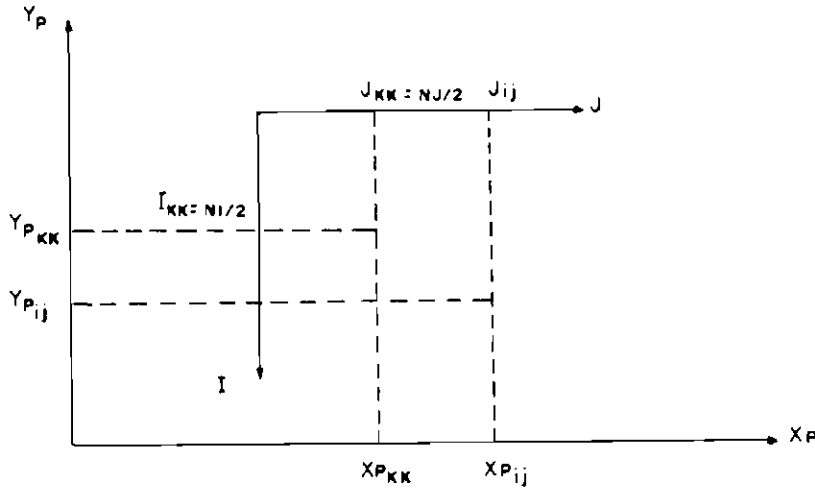


Fig. 5.13 - Discretização das coordenadas de projeção no nível 2A.

$$I_{ij} = (Y_{P_{KK}} - Y_{P_{ij}}) / re + NI / 2 \quad (5.85)$$

$$J_{ij} = (X_{P_{ij}} - X_{P_{KK}}) / re + NJ / 2 \quad (5.86)$$

Dessa forma completa-se o ciclo referente ao mapeamento direto.

5.5.2 - MAPEAMENTO INVERSO NO NÍVEL 2A

Uma vez concluído o mapeamento direto, tem-se uma grade regular de pontos $P(L,C)_{ij}$ sobre a imagem bruta, associada a uma grade irregular de pontos $P'(I,J)_{ij}$ sobre a imagem corrigida. A partir da informação destas grades deseja-se estabelecer uma relação entre a imagem corrigida e a imagem bruta através da associação de uma grade regular sobre a imagem corrigida com uma grade irregular sobre a

imagem bruta. Serão apresentados dois procedimentos para esta inversão: o polinomial e o de interpolação por partes.

5.5.2.1 - MODELO POLINOMIAL PARA INVERSÃO DA GRADE

Um dos procedimentos mais comum para o mapeamento inverso faz uso de polinômios de grau n para relacionar a imagem corrigida com a imagem bruta.

$$L = a_0 + a_1 \cdot I + a_2 \cdot J + a_3 \cdot I^2 + a_4 \cdot I \cdot J + a_5 \cdot J^2 + \dots \quad (5.87)$$

$$C = b_0 + b_1 \cdot I + b_2 \cdot J + b_3 \cdot I^2 + b_4 \cdot I \cdot J + b_5 \cdot J^2 + \dots \quad (5.88)$$

Para determinação dos coeficientes destes polinômios utilizam-se os parâmetros $(L,C)_{ij}$ e $(I,J)_{ij}$ resultantes do mapeamento direto. Escrevendo as Equações 5.87 e 5.88 na forma matricial e utilizando o princípio dos mínimos quadrados, na forma paramétrica, pode-se determinar os coeficientes $\{a_i\}$ e $\{b_i\}$.

$$\begin{bmatrix} 1 & I_{11} & J_{11} & I_{11}^2 & I_{11} \cdot J_{11} & J_{11}^2 & \dots \\ 1 & I_{12} & J_{12} & I_{12}^2 & I_{12} \cdot J_{12} & J_{12}^2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & I_{1N} & J_{1N} & I_{1N}^2 & I_{1N} \cdot J_{1N} & J_{1N}^2 & \dots \\ 1 & I_{21} & J_{21} & I_{21}^2 & I_{21} \cdot J_{21} & J_{21}^2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & I_{2N} & J_{2N} & I_{2N}^2 & I_{2N} \cdot J_{2N} & J_{2N}^2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & I_{N1} & J_{N1} & I_{N1}^2 & I_{N1} \cdot J_{N1} & J_{N1}^2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & I_{NN} & J_{NN} & I_{NN}^2 & I_{NN} \cdot J_{NN} & J_{NN}^2 & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{12} \\ \vdots \\ L_{1N} \\ L_{21} \\ \vdots \\ L_{2N} \\ \vdots \\ L_{N1} \\ \vdots \\ L_{NN} \end{bmatrix} \quad (5.89)$$

$$A \cdot X = B \quad (5.90)$$

$$X = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot B \quad (5.91)$$

Para determinação dos coeficientes $\{b_i\}$ substitui-se a matriz $B = \{L_{ij}\}$ por $B = \{C_{ij}\}$.

Após a determinação dos coeficientes dos polinômios representativos do mapeamento inverso, aplicam-se tais polinômios a uma grade regular $N \times N$ pontos $(P'(I,J)_{ij})$ sobre a imagem corrigida. As coordenadas de imagem corrigida são dadas por:

$$I_{ij} = \frac{NI}{(N-1)} \cdot (i-1) \quad (5.92)$$

$$J_{ij} = \frac{NJ}{(N-1)} \cdot (j-1) \quad (5.93)$$

A grade irregular sobre a imagem bruta $P(L,C)_{ij}$ terá coordenadas dadas pelos polinômios $\{a_i\}$ e $\{b_i\}$:

$$L_{ij} = a_0 + a_1 \cdot I_{ij} + a_2 \cdot J_{ij} + a_3 \cdot I_{ij}^2 + a_4 \cdot I_{ij} \cdot J_{ij} + a_5 \cdot J_{ij}^2 + \dots \quad (5.94)$$

$$C_{ij} = b_0 + b_1 \cdot I_{ij} + b_2 \cdot J_{ij} + b_3 \cdot I_{ij}^2 + b_4 \cdot I_{ij} \cdot J_{ij} + b_5 \cdot J_{ij}^2 + \dots \quad (5.95)$$

Para pontos fora da grade utiliza-se a interpolação bilinear a partir dos quatro nós da grade mais próximos do ponto em questão.

No processo de avaliação dos modelos serão testados polinômios de graus variados, inclusive estudando uma relação entre o grau do polinômio e o tamanho da grade.

5.2.2.2 - INVERSÃO DA GRADE POR PARTES

O modelo polinomial apresenta algumas vantagens para justificar sua aplicação no mapeamento inverso: sua simplicidade e a possibilidade de armazenar um número reduzido de dados (os coeficientes do polinômio) numa base de dados de imagens do sensor.

Porém, no processamento de imagens SPOT nível 2A nenhum dado é armazenado e pode-se, então, pensar em utilizar critérios mais rigorosos para inversão da grade de mapeamento. Um desses critérios é a inversão por partes através de transformações projetivas.

Ao final do mapeamento direto, tem-se dois conjuntos de coordenadas de imagem, um referente à imagem bruta $(L,C)_{ij}$ e regularmente espaçado, e outro referente à imagem corrigida $(I,J)_{ij}$ e irregularmente espaçado. Cria-se, então, um terceiro conjunto de coordenadas, este sobre a imagem corrigida e regularmente espaçado $(I',J')_{ij}$. Deseja-se saber, para cada $(I',J')_{ij}$ quais as coordenadas de imagem bruta $(L',C')_{ij}$ correspondentes.

No processo de inversão por transformação projetiva, para cada par $(I',J')_{lm}$ determina-se o quadrilátero da grade irregular, do mapeamento direto, que contém este ponto (Figura 5.14) e então calcula-se os parâmetros da transformação projetiva a partir dos nós dos quadriláteros homólogos.

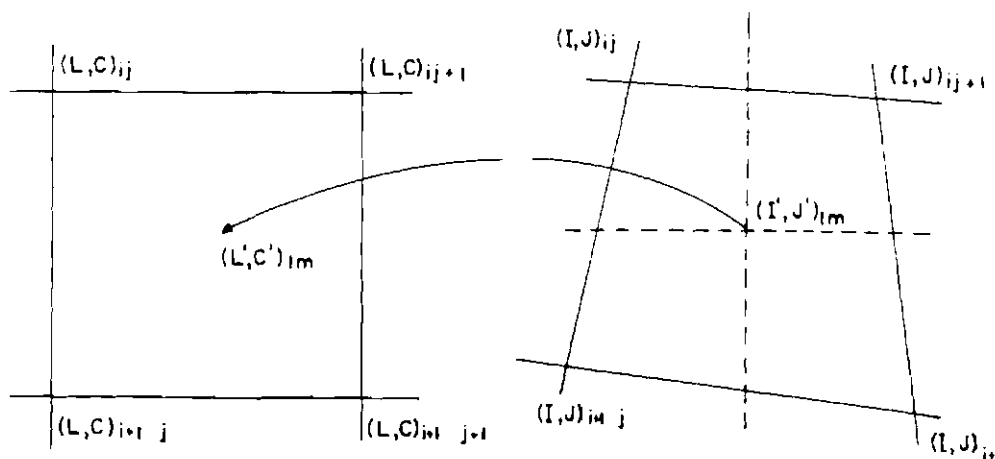


Fig. 5.14 - Inversão da grade pela transformação projetiva.

A transformação projetiva é aquela que relaciona dois quadriláteros quaisquer. Ela pode ser representada pelas Equações 5.96 e 5.97.

$$L = \frac{a_1 \cdot I + a_2 \cdot J + a_3}{a_4 \cdot I + a_5 \cdot J + 1} \quad (5.96)$$

$$C = \frac{a_6 \cdot I + a_7 \cdot J + a_8}{a_4 \cdot I + a_5 \cdot J + 1} \quad (5.97)$$

Para determinação dos parâmetros $\{a_i\}$ aplicam-se as Equações 5.96 e 5.97 aos quatro nós dos quadriláteros, compondo um sistema de oito equações a oito incógnitas. Colocando o sistema na forma matricial tem-se:

$$\begin{bmatrix} I_{11} & J_{11} & 1 & -I_{11} \cdot L_{11} & -J_{11} \cdot L_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_{11} \cdot C_{11} & -J_{11} \cdot C_{11} & I_{11} & J_{11} & 1 \\ I_{12} & J_{12} & 1 & -I_{12} \cdot L_{12} & -J_{12} \cdot L_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_{12} \cdot C_{12} & -J_{12} \cdot C_{12} & I_{12} & J_{12} & 1 \\ I_{21} & J_{21} & 1 & -I_{21} \cdot L_{21} & -J_{21} \cdot L_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_{21} \cdot C_{21} & -J_{21} \cdot C_{21} & I_{21} & J_{21} & 1 \\ I_{22} & J_{22} & 1 & -I_{22} \cdot L_{22} & -J_{22} \cdot L_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_{22} \cdot C_{22} & -J_{22} \cdot C_{22} & I_{22} & J_{22} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} \\ C_{11} \\ L_{12} \\ C_{12} \\ L_{21} \\ C_{21} \\ L_{22} \\ C_{22} \end{bmatrix} \quad (5.98)$$

A
 $8 \quad 8$

X
 $8 \quad 1$

B
 $8 \quad 1$

$$A \cdot X = B \quad (5.99)$$

$$X = A^{-1} \cdot B \quad (5.100)$$

Uma vez determinados os coeficientes da transformação projetiva $\{a_i\}$ aplica-se esta transformação ao ponto $(I', J')_{lm}$ da grade regular obtendo-se o correspondente na imagem bruta $(L', C')_{lm}$.

$$L'_{lm} = \frac{a_1 \cdot I'_{lm} + a_2 \cdot J'_{lm} + a_3}{a_4 \cdot I'_{lm} + a_5 \cdot J'_{lm} + 1} \quad (5.101)$$

$$C'_{lm} = \frac{a_6 \cdot I'_{lm} + a_7 \cdot J'_{lm} + a_8}{a_4 \cdot I'_{lm} + a_5 \cdot J'_{lm} + 1} \quad (5.102)$$

É importante destacar que este processo será realizado N^2 vezes, uma para cada ponto da grade corrigida regular.

Para determinação do quadrilátero da grade irregular, que contém cada ponto da grade regular na imagem corrigida, pode-se recorrer ao uso de polinômios, conforme visto na seção anterior. Para determinado par $(I', J')_{lm}$ aplica-se o polinômio de mapeamento inverso e obtém-se o par $(L', C')_{lm}$. Situar $(L', C')_{lm}$ dentro de uma grade regular é simples e fica fácil determinar i e j tal que:

$$L_{ij} = L_{i+1j} < L'_{lm} < L_{i+1j+1} = L_{i+1j+1} \quad (5.103)$$

$$C_{ij} = C_{i+1j} < C'_{lm} < C_{i+1j+1} = C_{i+1j+1} \quad (5.104)$$

O quadrilátero homólogo $(I, J)_{i \rightarrow i+1, j \rightarrow j+1}$ será o quadrilátero que contém $(I', J')_{lm}$.

5.6 - NÍVEL 2B

O nível 2B de processamento é uma extensão do nível 2A, quanto ao aspecto geométrico, mantendo as mesmas características quanto ao tratamento radiométrico.

Conforme citado no Capítulo 4, a precisão das efemérides não possibilita, no processo de correção geométrica de sistema, um bom resultado quanto ao erro de posicionamento da imagem, em relação a um determinado referencial.

Para garantir uma boa precisão no posicionamento da imagem é necessário, então, utilizar pontos de controle no terreno, de forma a refinar o modelo de correção, e melhorar o resultado final da mesma.

As especificações da SPOTIMAGE quanto à qualidade geométrica interna das imagens do nível 2B são as mesmas para a imagem

no nível 2A. O que muda é a especificação para a precisão absoluta, que vai melhorar a partir da otimização do posicionamento destas imagens. Para este nível é especificada uma precisão absoluta de 50 metros. Resultados de estudo realizados pela SPOTIMAGE apresentaram um valor médio de 30 metros (SPOTIMAGE, 1986).

Os pontos de controle podem ser usados somente para refinar o produto quanto à sua geometria externa (erro de posicionamento). Porém, uma vez que o modelo sofrerá alterações para receber as informações advindas dos pontos de controle, pode-se pensar em modelos de refinamento que melhorem, também, a geometria interna da imagem.

Alguns modelos de refinamento serão, então, analisados, comparados e avaliados quanto à validade de seus empregos.

5.6.1 - MODELO DE REFINAMENTO POLINOMIAL

O modelo de refinamento através de polinômios é o mais usual e sua aplicação é bastante simples. É interessante que este polinômio não tenha grau elevado para não obrigar a um levantamento excessivo de pontos de controle. Além disso deve-se destacar que o polinômio só será empregado nos nós da grade amostral. Como os demais pontos são obtidos por interpolação bilinear somente os polinômios de primeiro grau se conservam por inteiro após este tipo de interpolação.

O polinômio de primeiro grau completo representa a transformação afim, que mantém o paralelismo, mas não a ortogonalidade. A transformação afim quando aplicada a um quadrado resulta num paralelogramo (Figura 5.15).

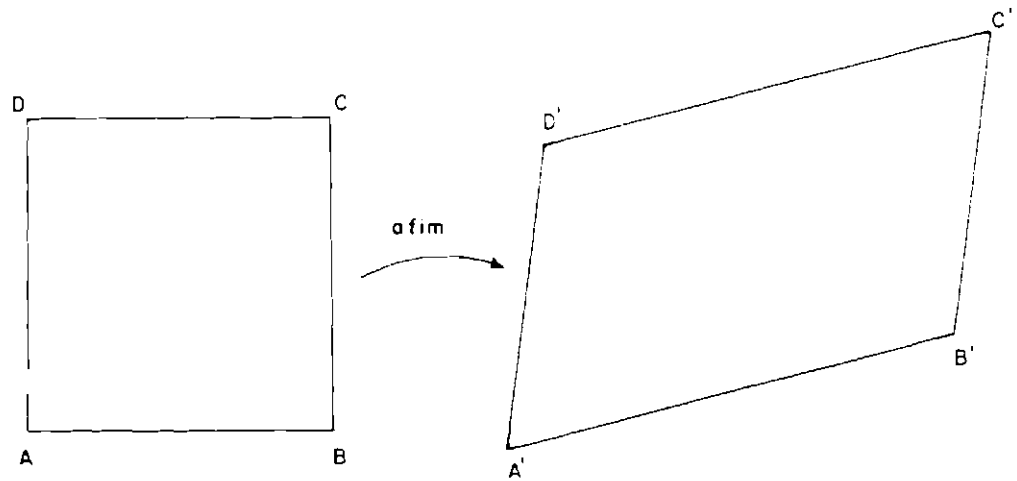


Fig. 5.15 - Transformação afim.

$$X' = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot Y \quad (5.105)$$

$$Y' = b_0 + b_1 \cdot X + b_2 \cdot Y \quad (5.106)$$

Pode-se fazer simplificações na transformação afim de modo a reduzir o número de parâmetros a determinar. A transformação afim pode ser entendida como uma transformação com dois parâmetros de translação, um de rotação, um fator de não ortogonalidade e dois de escala.

A primeira simplificação seria a eliminação do fator de não ortogonalidade, garantindo, assim, a ortogonalidade da transformação. Esta é conhecida como transformação afim ortogonal, e quando aplicada a um quadrado resulta num retângulo (Figura 5.16).

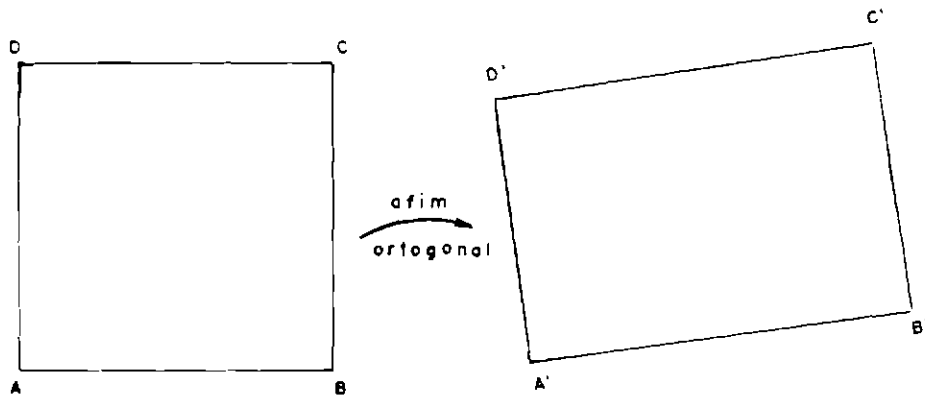


Fig. 5.16 - Transformação afim ortogonal.

$$X' = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot Y \quad (5.107)$$

$$Y' = b_0 + b_1 \cdot X + b_2 \cdot Y \quad (5.108)$$

$$-a_1 \cdot a_2 = b_1 \cdot b_2 \quad (\text{ortogonalidade}) \quad (5.109)$$

A próxima redução é um dos fatores de escala, recaindo-se na transformação de similaridade, a quatro parâmetros. Esta transformação é a que mede o grau de semelhança entre dois objetos. Quando aplicada a um quadrado fornece outro quadrado (Figura 5.17).

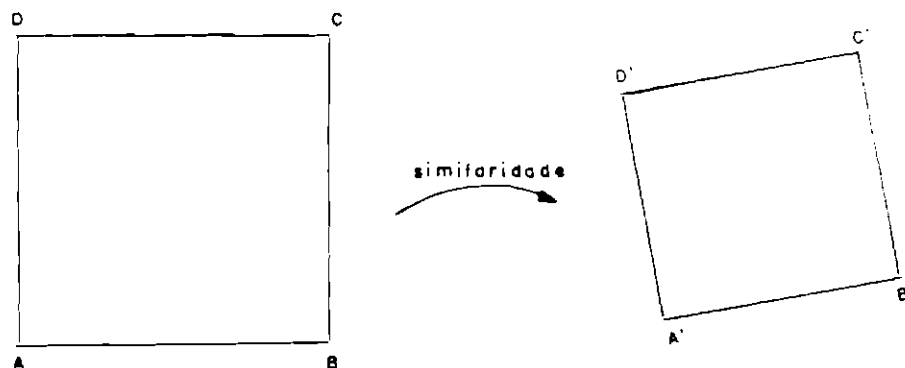


Fig. 5.17 - Transformação de similaridade.

$$X' = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot Y \quad (5.110)$$

$$Y' = b_0 - a_2 \cdot X + a_1 \cdot Y \quad (5.111)$$

A transformação seguinte é a de corpo rígido, que tem apenas três parâmetros: duas translações e uma rotação. Quando aplicada a um quadrado fornece um outro quadrado de igual tamanho (Figura 5.18).

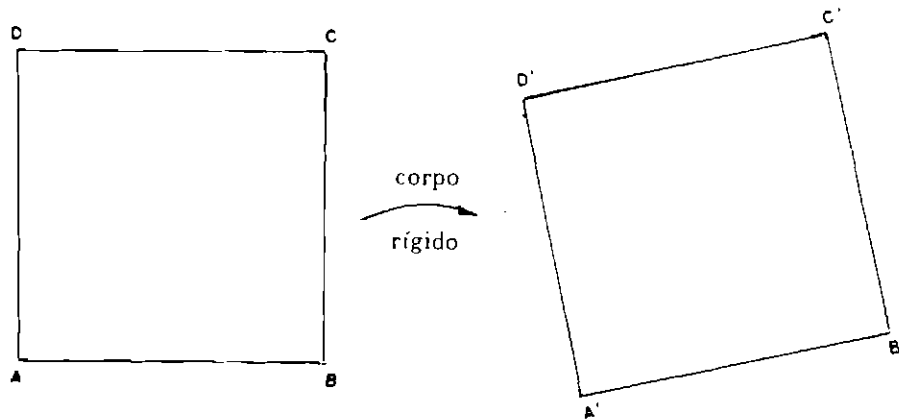


Fig. 5.18 - Transformação de corpo rígido.

$$X' = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot Y \quad (5.112)$$

$$Y' = b_0 - a_2 \cdot X + a_1 \cdot Y \quad (5.113)$$

$$a_1^2 + a_2^2 = 1 \quad (\text{equivalência}) \quad (5.114)$$

A ultima transformação é a de translação que conserva forma, tamanho e paralelismo entre o objeto original e o transformado. Indicado quando o número de pontos de controle é muito reduzido e deseja-se apenas refinar o erro de posicionamento. Quando aplicada a um quadrado fornece outro quadrado de igual tamanho, mantendo o paralelismo entre os lados dos quadrados (Figura 5.19).

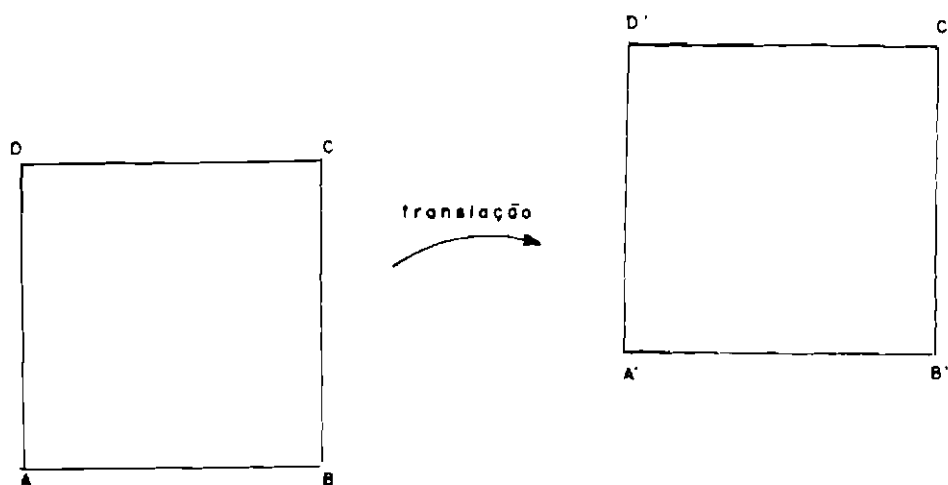


Fig. 5.19 - Transformação de translação.

$$X' = a_0 + X \quad (5.115)$$

$$Y' = b_0 + Y \quad (5.116)$$

A escolha do polinômio deve levar em consideração o número de pontos de controle levantados na imagem.

Para estes pontos de controle são conhecidas as coordenadas de imagem bruta $(L, C)_i$ e as coordenadas cartesianas num determinado sistema de projeção $(XP, YP)_i$.

Aplica-se o modelo fotogramétrico, desenvolvido para o nível 2A, aos pontos de controle, obtendo-se, para cada ponto, coordenadas retangulares espaciais $(X, Y, Z)_i$. Estas coordenadas devem ser convertidas para coordenadas geodésicas $(\phi, \lambda)_i$, e finalmente para coordenadas de projeção. Como estas coordenadas foram obtidas a partir do modelo de correção, serão designadas por $(XM, YM)_i$ para diferenciar das coordenadas de projeção levantadas de cartas topográficas.

Supondo que não houvesse erro por parte do levantamento dos pontos de controle, e por parte do modelo de correção geométrica, os dois conjuntos de coordenadas de projeção deveriam ser idênticos. No entanto isto não acontece e credita-se esta diferença ao erro do modelo. Uma forma de diminuir este erro (refinar o modelo) é ajustar o conjunto de coordenadas de modelo ao conjunto de coordenadas levantadas de cartas topográficas, através de polinômios. Exemplificando para a transformação afim, tem-se:

$$XP_i = a_0 + a_1.XM_i + a_2.YM_i \quad (5.117)$$

$$YP_i = b_0 + b_1.XM_i + b_2.YM_i \quad (5.118)$$

Colocando-se na forma matricial, para N pontos de controle, e utilizando-se o princípio dos mínimos quadrados na forma paramétrica, tem-se:

$$\begin{bmatrix} 1 & XM_1 & YM_1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & XM_2 & YM_2 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & XM_N & YM_N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & XM_1 & YM_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & XM_2 & YM_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & XM_N & YM_N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} XP_1 \\ XP_2 \\ \vdots \\ XP_N \\ YP_1 \\ YP_2 \\ \vdots \\ YP_N \end{bmatrix} \quad (5.119)$$

$\begin{matrix} & A & & & X & & B \\ & 2N & 6 & & 6 & 1 & 2N & 1 \end{matrix}$

$$A.X = B \quad (5.120)$$

$$X = (A^T . P . A)^{-1} . A^T . P . B \quad (5.121)$$

onde P é a matriz peso dos pontos de controle.

Uma vez determinados os coeficientes $\{a_i\}$ e $\{b_i\}$ aplica-se a transformação afim às coordenadas de modelo $(XM, YM)_i$, obtendo-se coordenadas de projeção $(XA, YA)_i$.

$$XA_i = a_0 + a_1 \cdot XM_i + a_2 \cdot YM_i \quad (5.122)$$

$$YA_i = b_0 + b_1 \cdot XM_i + b_2 \cdot YM_i \quad (5.123)$$

O vetor de resíduos pode ser obtido a partir da diferença entre as coordenadas ajustadas e as coordenadas levantadas de cartas topográficas.

$$dX_i = XA_i - XP_i \quad (5.124)$$

$$dY_i = YA_i - YP_i \quad (5.125)$$

ou

$$A \cdot X - B = \vec{v}_{res} \quad (5.126)$$

A partir deste ponto considera-se como coordenadas de projeção dos nós da grade amostral as coordenadas ajustadas. Em seguida, em cima das coordenadas ajustadas procede-se à discretização em coordenadas de imagem corrigida e realiza-se o mapeamento inverso.

5.6.2 - REFINAMENTO DA ATITUDE UTILIZANDO UM FILTRO ESTOCÁSTICO DE KALMAN

Caron and Simon (1975) desenvolveram um método para refinamento dos dados de atitude a partir de poucos pontos de controle. A atitude, para o intervalo relativo a uma cena MSS-LANDSAT (aproximadamente 29 segundos), foi parametrizada como uma função cúbica do tempo.

$$R = r_0 + r_1 \cdot t + r_2 \cdot t^2 + r_3 \cdot t^3 \quad (5.127)$$

$$A = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3 \quad (5.128)$$

$$G = g_0 + g_1 \cdot t + g_2 \cdot t^2 + g_3 \cdot t^3 \quad (5.129)$$

onde t é a diferença entre o instante relativo a um dado de atitude e o instante referente ao centro da cena.

Os coeficientes $\{r_i\}$, $\{a_i\}$ e $\{g_i\}$ são inicialmente estimados a partir dos dados de atitude transmitidos pelo satélite, e posteriormente refinados passo a passo, a cada novo ponto de controle considerado.

Neste ponto será apresentada uma adaptação do método para o sensor HRV-SPOT.

Seja $\vec{Z}$ o vetor cujas componentes são os coeficientes das funções cúbicas do tempo e $\vec{W}$ o vetor cujas componentes são os dados de atitude, obtidos a partir destes coeficientes.

$$\vec{Z} = (\{r_i\}, \{a_i\}, \{g_i\})^T \quad (5.130)$$

$$\vec{W} = (R, A, G)^T \quad (5.131)$$

Para cada ponto de controle associa-se um instante t e vetores relativos à posição do ponto na Terra ($\vec{R}_G = (X, Y, Z)^T$, e à posição e velocidade do satélite ($\vec{R}_S = (X_S, Y_S, Z_S)^T$ e $\vec{V}_S = (\dot{X}_S, \dot{Y}_S, \dot{Z}_S)^T$).

Através do modelo fotogramétrico pode-se relacionar a posição do ponto na superfície da Terra e os dados de atitude (Equação 4.53), onde esta relação será representada pela função vetorial g :

$$\vec{R}_G = \vec{g}(\vec{W}; \vec{R}_S, \vec{V}_S, \Psi_x, \Psi_y, \theta, t, C) \quad (5.132)$$

onde Ψ_x e Ψ_y são os ângulos que definem o vetor de visada no SRH, em função da coluna C do elemento, e θ é o ângulo de inclinação do espelho.

De forma análoga pode-se relacionar o ponto observado na Terra com o vetor relativo aos coeficientes da atitude e o tempo t:

$$\vec{R}_G = \vec{G}(\vec{Z}; \vec{R}_S, \vec{V}_S, \Psi_x, \Psi_y, \theta, t, C) \quad (5.133)$$

Aplicando-se uma linearização local em $\vec{g}$ e $\vec{G}$ e negligenciando-se os termos além dos de primeira ordem, da série de Taylor, tem-se:

$$\begin{aligned} \vec{g}(\vec{W}; \vec{R}_S, \vec{V}_S, \Psi_x, \Psi_y, \theta, t, C) &= \vec{g}_0 + \\ &+ h(\vec{W}_0; \vec{R}_S, \vec{V}_S, \Psi_x, \Psi_y, \theta, t, C) \cdot (\vec{W} - \vec{W}_0) \end{aligned} \quad (5.134)$$

onde

$$\vec{g}_0 = \vec{g}(\vec{W}_0; \vec{R}_S, \vec{V}_S, \Psi_x, \Psi_y, \theta, t, C) \quad (5.135)$$

$$h(\vec{W}; \vec{R}_S, \vec{V}_S, \Psi_x, \Psi_y, \theta, t, C) = [\nabla_W \vec{g}^T]^T \quad (5.136)$$

de forma análoga:

$$\begin{aligned} \vec{G}(\vec{Z}; \vec{R}_S, \vec{V}_S, \Psi_x, \Psi_y, \theta, t, C) &= \vec{G}_0 + \\ &+ H(\vec{Z}_0; \vec{R}_S, \vec{V}_S, \Psi_x, \Psi_y, \theta, t, C) \cdot (\vec{Z} - \vec{Z}_0) \end{aligned} \quad (5.137)$$

onde

$$\vec{G}_0 = \vec{G}(\vec{Z}_0; \vec{R}_S, \vec{V}_S, \Psi_x, \Psi_y, \theta, t, C) \quad (5.138)$$

$$H(\vec{Z}; \vec{R}_S, \vec{V}_S, \Psi_x, \Psi_y, \theta, t, C) = [\nabla_Z \vec{G}^T]^T \quad (5.139)$$

Para determinação de $\nabla_W \vec{g}^T$ recorre-se à Figura 5.20.

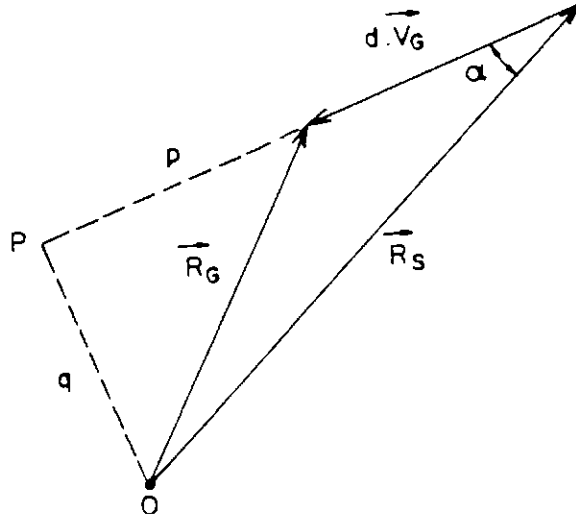


Fig. 5.20 - Relação entre os vetores posição do satélite, posição do ponto observado e visada.

Desta figura tem-se:

$$\vec{R}_G = \vec{R}_S + d.\vec{v}_G \quad (5.140)$$

Combinando as Equações 5.132 e 5.140, tem-se:

$$\vec{g} = \vec{R}_S + d.\vec{v}_G \quad (5.141)$$

Da relação vetorial, tem-se:

$$\vec{v}_G^T . \vec{R}_S = |\vec{v}_G| . |\vec{R}_S| . \cos(180^\circ - \alpha) = -|\vec{R}_S| . \cos \alpha \quad (5.142)$$

Do triângulo OSP tem-se:

$$d + p = |\vec{R}_S| \cdot \cos \alpha = -\vec{v}_G^T \cdot \vec{R}_S \quad (5.143)$$

$$p^2 = |\vec{R}_G|^2 - q^2 = |\vec{R}_G|^2 - |\vec{R}_S|^2 \cdot \sin^2 \alpha \quad (5.144)$$

$$p^2 = |\vec{R}_G|^2 - |\vec{R}_S|^2 + |\vec{R}_S|^2 \cdot \cos^2 \alpha \quad (5.145)$$

e finalmente:

$$d = -\vec{v}_G^T \cdot \vec{R}_S - (|\vec{R}_G|^2 - |\vec{R}_S|^2 + (\vec{v}_G^T \cdot \vec{R}_S)^2)^{1/2} \quad (5.146)$$

Da Equação 5.141 tem-se:

$$\nabla_W d = d \cdot \nabla_G \vec{v}_G^T + (\nabla_W d) \cdot \vec{v}_G^T \quad (5.147)$$

onde $d = |\vec{R}_S - \vec{R}_G|$, e

$$\nabla_W d = \left(1 + \frac{(\vec{v}_G^T \cdot \vec{R}_S)}{(|\vec{R}_G|^2 - |\vec{R}_S|^2 + (\vec{v}_G^T \cdot \vec{R}_S)^2)^{1/2}} \right) \cdot (\nabla_G \vec{v}_G^T) \cdot \vec{R}_S \quad (5.148)$$

Da Equação 5.52 tem-se:

$$\nabla_W \vec{v}_G^T = (\nabla_W (MA \cdot MB \cdot \vec{v}_H)^T) \cdot ME^T \quad (5.149)$$

onde MA, ME, MB e $\vec{v}_H$ são dados, respectivamente, pelas Equações 5.50, 5.43, 5.3 e 5.22.

Fazendo $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)^T = MB \cdot \vec{v}_H$ e, combinando-se com a Equação 5.50, tem-se que:

$$MA \cdot \vec{v} = \begin{bmatrix} (cR \cdot cG - sR \cdot sA \cdot sG) \cdot v_1 + (cR \cdot sG + sR \cdot sA \cdot cG) \cdot v_2 - sR \cdot cA \cdot v_3 \\ -cA \cdot sG \cdot v_1 + cA \cdot cG \cdot v_2 + sA \cdot v_3 \\ (sR \cdot cG + cR \cdot sA \cdot sG) \cdot v_1 + (sR \cdot sG - cR \cdot sA \cdot cG) \cdot v_2 + cR \cdot cA \cdot v_3 \end{bmatrix} \quad (5.150)$$

e

$$\nabla_W(MA.\vec{v})_{11} = (-sR.cG - cR.sA.sG).v_1 + (-sR.sG + cR.sA.cG).v_2 - cR.cA.v_3$$

$$\nabla_W(MA.\vec{v})_{12} = 0$$

$$\nabla_W(MA.\vec{v})_{13} = (cR.cG - sR.sA.sG).v_1 + (cR.sG + sR.sA.cG).v_2 - sR.cA.v_3$$

$$\nabla_W(MA.\vec{v})_{21} = -sR.cA.sG.v_1 + sR.cA.cG.v_2 - sR.sA.v_3$$

$$\nabla_W(MA.\vec{v})_{22} = sA.sG.v_1 - sA.cG.v_2 + cA.v_3 \quad (5.151)$$

$$\nabla_W(MA.\vec{v})_{23} = cR.cA.sG.v_1 - cR.cA.cG.v_2 - cR.sA.v_3$$

$$\nabla_W(MA.\vec{v})_{31} = (-cR.sG - sR.sA.cG).v_1 + (cR.cG - sR.sA.sG).v_2$$

$$\nabla_W(MA.\vec{v})_{32} = -cA.cG.v_1 - cA.sG.v_2$$

$$\nabla_W(MA.\vec{v})_{33} = (-sR.sG + cR.sA.cG).v_1 + (sR.cG + cR.sA.sG).v_2$$

onde:

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} -\cos b_y.(\tan \Psi_y. \cos \theta + \operatorname{sen} \theta) - \operatorname{sen} b_y.(\tan \Psi_y. \operatorname{sen} \theta - \cos \theta)/Q \\ -\tan \Psi_x/Q \\ -\operatorname{sen} b_y.(\tan \Psi_y. \cos \theta + \operatorname{sen} \theta) + \cos b_y.(\tan \Psi_y. \operatorname{sen} \theta - \cos \theta)/Q \end{bmatrix} \quad (5.152)$$

Uma vez obtido $\nabla_W \vec{v}_G^T$ pode-se montar a matriz $h(\vec{W}; \vec{R}_S, \vec{V}_S, \Psi_x, \Psi_y, \theta, t, C)$. A Matriz H está relacionada com a matriz h pela função expressa na Equação 5.153, onde:

$$[H]_{ij} = [h]_{i \ k(j)} \cdot t^{(j-1) \bmod 4} \quad (5.153)$$

onde $K(j) = [(j-1)/4] + 1$ e $[x]$ representa o maior inteiro que não excede o real x .

De posse da matriz H pode-se determinar o estimador estocástico de Kalman para o refinamento dos dados de atitude.

$$\vec{Z}(K+1) = \vec{Z}(K) + A(K+1).$$

$$(\vec{R}_G(t_{K+1}) - \vec{G}(\vec{Z}(K); \vec{R}_S, \vec{V}_S, \Psi_x, \Psi_y, \theta, t_{K+1}, C)) \quad (5.154)$$

onde

$$A(K+1) = P(K+1) \cdot H^T \cdot \Lambda^{-1}(K+1) \quad (5.155)$$

$$P(K+1) = P(K) - P(K) \cdot H^T \cdot (H \cdot P(K) \cdot H^T + \Lambda(K+1))^{-1} \cdot H \cdot P(K) \quad (5.156)$$

$$H = H(t_{K+1} / K) = H(\vec{Z}(K); \vec{R}_S, \vec{V}_S, \Psi_x, \Psi_y, \theta, t_{K+1}, C) \quad (5.157)$$

$\Lambda(K+1)$ é a matriz covariância da posição do ponto de controle. Considerando que as componentes de $\vec{R}_G$ são não correlacionadas e assumindo uma imprecisão igual para as componentes X , Y e Z , e uma imprecisão de 50m para localização do ponto (nível 2B) pode-se considerar que $\Lambda(K+1) = 50 \cdot I$.

$P(0)$ é a matriz covariância dos coeficientes das funções cúbicas que relacionam a atitude com o tempo. A seleção de $P(0)$ segue as premissas que $\vec{Z}$ é não correlacionado, a incerteza das componentes de ordem zero são próximas à própria incerteza dos dados de atitude ($1,75 \cdot 10^{-4}$ rad) e as incertezas das demais componentes não excedem em 10% o valor absoluto inicial destas componentes. Com base nestas premissas $P(0)$ é uma matriz diagonal com

$$[P(0)]_{ij} = S^2_{(i-1) \bmod(4) + 1} \quad i = 1, 2, \dots, 12$$

onde $S_1 = 1,75 \times 10^{-4}$, $S_2 = 10^{-8}$, $S_3 = 10^{-9}$, $S_4 = 10^{-11}$

$\vec{Z}(0)$ é a estimativa a priori dos coeficientes, obtidos a partir dos dados transmitidos pelo satélite.

$\vec{G}(\vec{Z}(K); \vec{R}_S, \vec{V}_S, \Psi_x, \Psi_y, \theta, t_{k+1}, C)$ é o vetor referente à posição do ponto sobre a superfície da Terra, resultante do modelo de correção geométrica empregado.

5.7 - NÍVEL 3

Para imagens em tomadas oblíquas a influência do relevo passa a ser um fator preponderante para a degradação geométrica destas imagens. O erro planimétrico daí decorrente impossibilita alcançar, através do modelo de correção geométrica definido para o nível 2B, as especificações de geometria para este nível. Passa a ser imperativa a correção das distorções provocadas pelo relevo. Estas correções são obtidas através da integração de modelos digitais de elevação do terreno (MDET) ao processo de correção geométrica.

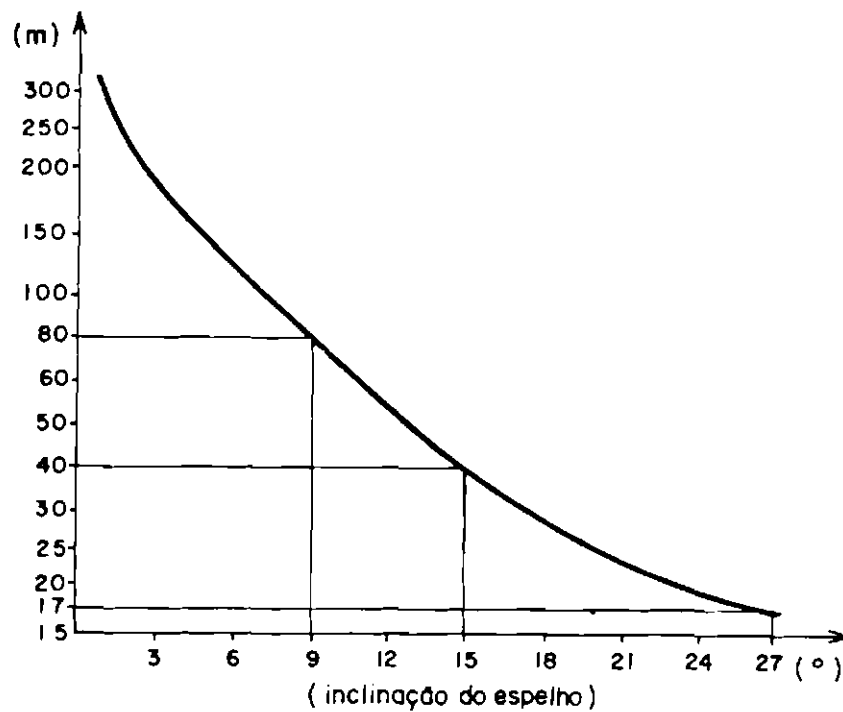
A distorção provocada pelo relevo está intimamente relacionada com as características deste e com o ângulo de visada do sensor. Um relevo com uma altitude constante não compromete a geometria interna da imagem, provocando apenas uma variação na escala da cena. A SPOTIMAGE considera como imagens verticais as obtidas com o espelho nas posições de 41 a 55, o que equivale a um ângulo de inclinação entre $-4,2^\circ$ a $4,2^\circ$. Nestes casos, de uma forma geral, não é necessário o emprego de MDET no processo de correção geométrica.

A partir deste ponto, e para inclinações até 27° , torna-se necessária a utilização de MDET, que devem apresentar características próprias em função do ângulo de visada e do tipo de relevo. De acordo com Baudoin (1986), para visadas próximas a vertical, o MDET com espaço amostral de 300 metros é suficiente, independentemente do tipo de relevo, enquanto que para imagens com ângulos de visada de 27° requerem um espaço amostral de 80 a 40 metros,

em função do relevo ser pouco ou muito acidentado. Guichard (1983) apresenta uma tabela com a precisão do MDET em função do ângulo de visada, para obtenção de um erro planimétrico inferior a 10 metros (Tabela 5.1).

TABELA 5.1

PRECISÃO DO MDET EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE VISADA PARA UMA PRECISÃO
PLANIMÉTRICA DE 10 METROS



A Tabela 5.2 apresenta o erro devido ao relevo em função da altitude do ponto observado e do ângulo de visada, considerando-se o satélite SPOT localizado a uma altitude de 835 km. Esta distorção pode ser observada na Figura 5.21.

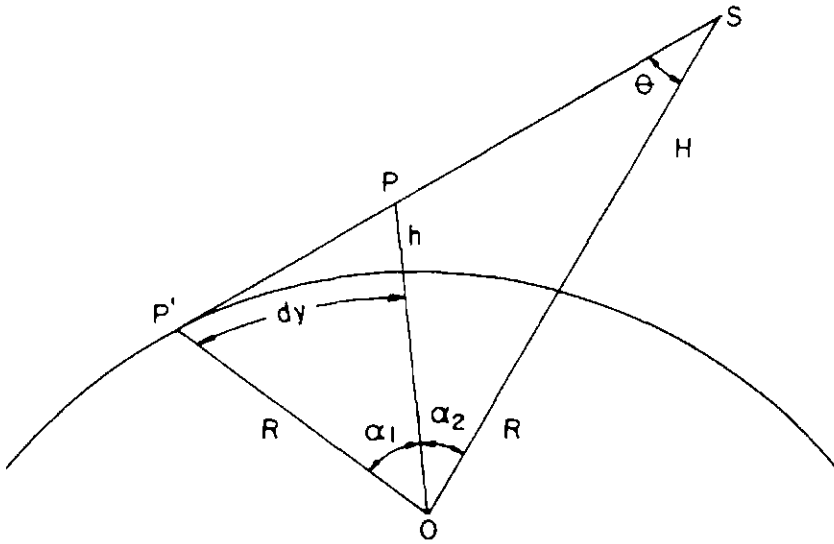


Fig. 5.21 - Erro devido ao relevo.

Do triângulo P'OS tem-se:

$$\frac{\text{sen}\theta}{R} = \frac{\text{sen}(\theta + \alpha_1 + \alpha_2)}{R + H} \quad (5.158)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \text{sen}^{-1}(\text{sen}\theta \cdot (R + H) / R) - \theta \quad (5.159)$$

Do triângulo P'OS tem-se:

$$\frac{\text{sen}\theta}{R + h} = \frac{\text{sen}(\theta + \alpha_2)}{R + H} \quad (5.160)$$

$$\alpha_2 = \text{sen}^{-1}(\text{sen}\theta \cdot (R + H) / (R + h)) - \theta \quad (5.161)$$

Das Equações 5.159 e 5.161 é possível obter α_1 e, então, determinar o erro planimétrico causado pelo relevo.

$$dY = R \cdot \alpha_1 \quad (5.162)$$

TABELA 5.2

ERRO DEVIDO AO RELEVO EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE VISADA
(EM METROS)

Ângulo de visada (grau) Altitude (metro)	0,0	4,5	9,0	13,5	18,0	22,5	27,0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
500	0,0	44,5	89,8	136,7	186,3	239,7	298,7
1000	0,0	89,0	179,5	273,4	372,5	479,4	597,3
1500	0,0	133,4	269,3	410,0	558,7	719,0	895,9
2000	0,0	177,9	359,0	546,6	744,8	958,6	1194,5
2500	0,0	222,4	448,7	683,2	931,0	1198,1	1492,9
3000	0,0	266,8	538,4	819,8	1117,1	1437,6	1791,3

A adaptação do modelo fotogramétrico para interceptar uma superfície definida pelo MDET seria muito complexa, e de custo computacional elevado. São estabelecidos dois processos alternativos, para os quais a integração de um MDET é bastante simples. Estes modelos utilizam elipsóides auxiliares, referentes às altitudes mínima ($H_{\min}$) e máxima ($H_{\max}$), da cena. Um deles faz uso de interpolação direta, e o outro necessita de iterações sucessivas, em função de uma tolerância preestabelecida. Para definir os parâmetros destes elipsóides há vários caminhos a seguir. Estes procedimentos serão comparados para ver o que apresenta melhor precisão.

5.7.1 - DEFINIÇÃO DOS ELIPSÓIDES AUXILIARES

É impossível definir dois elipsóides de tal forma que a distância entre eles seja constante. Dessa forma, quando se deseja definir um elipsóide referente a uma determinada altitude H pode-se optar por um entre diversos procedimentos. Neste trabalho foram analisados quatro diferentes procedimentos.

O primeiro seria adicionar aos semi-eixos maior (a) e menor (b) do elipsóide de referência para a Terra, os valores referentes à altitude H.

$$a_H = a + H \quad (5.163)$$

$$b_H = b + H \quad (5.164)$$

Com este procedimento fica garantido que nos pólos e no equador a distância entre os dois elipsóides refere-se à altitude H.

Opções alternativas seriam adicionar o valor referente a H a um dos semi-eixos e manter a excentricidade do elipsóide auxiliar igual a excentricidade do elipsóide de referência.

$$a_H = a + H \quad e \quad e_H = e \quad (5.165)$$

ou

$$b_H = b + H \quad e \quad e_H = e \quad (5.166)$$

Uma quarta opção obriga os elipsóides a apresentarem a distância igual à altitude H no ponto-objeto referente ao centro da cena bruta $(X,Y,Z)_c$. Para isso, transformam-se as coordenadas retangulares espaciais em coordenadas geodésicas $(\phi,\lambda)_c$. Incorpora-se a altitude H ao par de coordenadas geodésicas e converte-se o terno em questão para o SGG $(X',Y',Z')_c$ (Figura 5.22). Obriga-se, agora, este ponto a pertencer ao elipsóide auxiliar, considerando-se que a excentricidade será mantida. Assim é possível definir o semi-eixo maior a_H do elipsóide auxiliar:

$$(1 - e^2).(X'^2 + Y'^2) + Z'^2 - (1 - e_H^2).a_H^2 = 0 \quad e \quad e_H = e \quad (5.167)$$

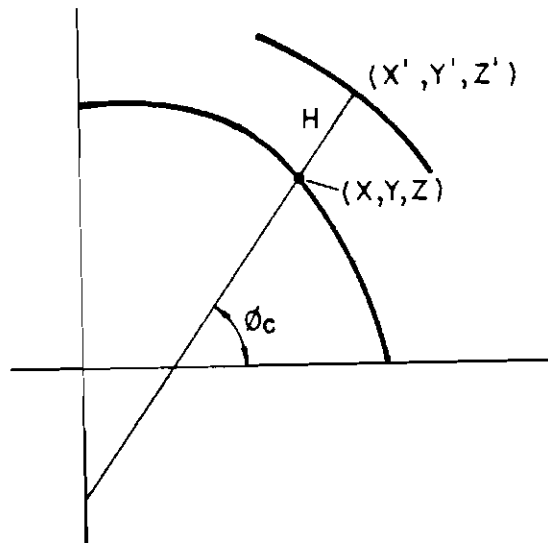


Fig. 5.22 - Definição do elipsóide auxiliar referente à altitude H .

O melhor elipsóide é aquele que apresenta, para qualquer ponto, altitudes mais próximas da altitude de referência H .

Os que apresentaram melhores resultados foram os elipsóides referentes ao primeiro e ao quarto caso, sendo que o primeiro é o de implementação mais simples.

Para estes modelos a altitude de um ponto não diferia da altitude de referência em mais de 1 metro, o que equivale a um erro na planimetria inferior a 0,5 metros.

Os segundo e terceiro modelos, quando selecionados, devem ser empregados, respectivamente, para latitudes entre -45° e 45° e para latitudes menores que -45° ou maiores que 45° . Nestes casos a discrepância entre a altitude de um ponto e a altitude de referência pode chegar a 3,5 metros.

5.7.2 - MODELO INTERPOLATIVO

Uma vez definidos os dois elipsóides auxiliares, aplica-se o modelo fotogramétrico, para uma grade $N \times N$ de pontos $P(L,C)_{ij}$ regularmente espaçados sobre a imagem bruta, tanto para o elipsóide referente à altitude mínima quanto referente à altitude máxima (Figura 5.23).

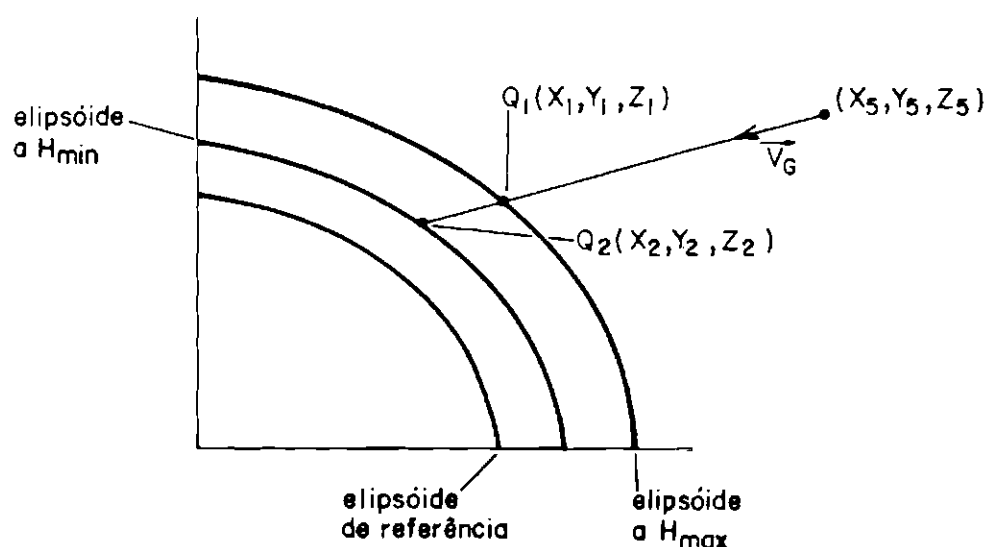


Fig. 5.23 - Modelo fotogramétrico no nível 3.

A intersecção das visadas $\vec{V}_{Gij}$ com o elipsóide referente à H_{max} fornece um conjunto de pontos Q_{1ij} cujas coordenadas retangulares espaciais são representadas por $(X_1, Y_1, Z_1)_{ij}$. De forma análoga, ao interceptar o elipsóide referente a H_{min} , obtém-se um conjunto de pontos Q_{2ij} $(X_2, Y_2, Z_2)_{ij}$. Ambos os conjuntos de coordenadas retangulares espaciais são convertidos em coordenadas geodésicas, tendo o elipsóide de referência para a Terra como parâmetro para essa conversão. Os conjuntos de coordenadas encontrados $(\phi_1, \lambda_1, H_1)_{ij}$ e $(\phi_2, \lambda_2, H_2)_{ij}$ são convertidos para coordenadas de projeção $(XP_1, YP_1)_{ij}$ e $(XP_2, YP_2)_{ij}$, negligenciando-se, daqui por diante, as altitudes H_{1ij} e H_{2ij} . Deve-se destacar que os valores correspondentes a H_{1ij} e H_{2ij} estão bem próximos a H_{max} e H_{min} , respectivamente.

Para determinar o valor correto das coordenadas de projeção $(XP,YP)_{ij}$ associadas ao ponto $P(L,C)_{ij}$ interpola-se as coordenadas $(XP_1,YP_1)_{ij}$ e $(XP_2,YP_2)_{ij}$ em função da altitude H_{ij} do ponto P_{ij} .

$$XP_{ij} = \frac{XP_{1ij} \cdot (H_{ij} - H_{min}) + XP_{2ij} \cdot (H_{max} - H_{ij})}{H_{max} - H_{min}} \quad (5.168)$$

$$YP_{ij} = \frac{YP_{1ij} \cdot (H_{ij} - H_{min}) + YP_{2ij} \cdot (H_{max} - H_{ij})}{H_{max} - H_{min}} \quad (5.169)$$

Na realidade, o procedimento mais correto seria utilizar H_{1ij} no lugar de H_{max} e H_{2ij} no lugar de H_{min} .

Acontece que não se tem uma relação entre $(L,C)_{ij}$ e H_{ij} . Não é possível, então, associar diretamente $(L,C)_{ij}$ a $(XP,YP)_{ij}$, a não ser para os pontos de controle, quando as altitudes são conhecidas.

As Equações 5.168 e 5.169 servem apenas para avaliação do modelo, a partir de pontos de controle, conforme indica a Figura 5.24, quando são conhecidas as coordenadas de imagem (L,C) , as coordenadas de projeção $(XP,YP)_{carta}$ e a altitude H de cada ponto de controle.

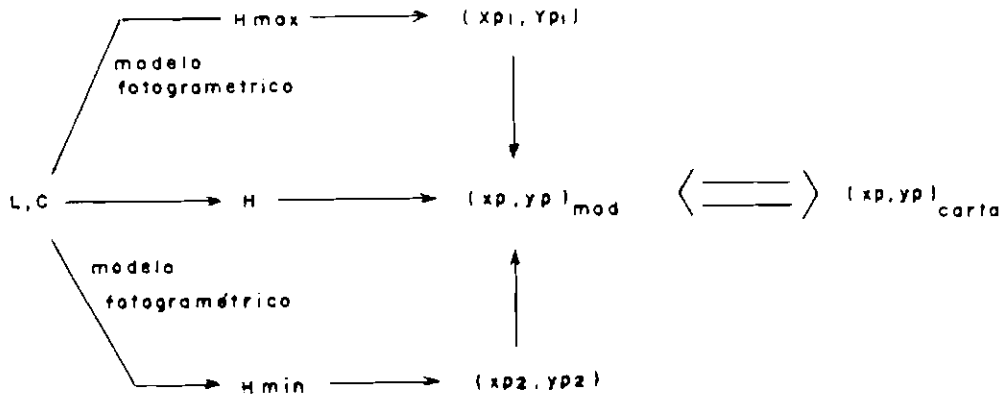


Fig. 5.24 - Avaliação do modelo interpolativo para o nível 3 SPOT.

O Mapeamento direto no nível 3 encerra-se com a discretização das coordenadas de projeção em coordenadas de imagem corrigida $(I_1, J_1)_{ij}$ e $(I_2, J_2)_{ij}$, de modo semelhante ao apresentado no nível 2A (Equações 5.85 e 5.86). Fica-se então com uma grade regular $(L, C)_{ij}$ na imagem bruta associada a duas grades irregulares $(I_1, J_1)_{ij}$ e $(I_2, J_2)_{ij}$ na imagem corrigida.

Como no mapeamento direto não foram corrigidas as distorções devido ao relevo, pode-se empregar qualquer método para proceder ao mapeamento inverso (polinomial ou transformação projetiva por partes).

Após o mapeamento inverso tem-se uma grade regular $(I, J)_{ij}$, sobre a imagem corrigida, relacionada a duas grades $(L_1, C_1)_{ij}$ e $(L_2, C_2)_{ij}$ irregularmente espaçadas sobre a imagem bruta. Essas relações foram conseguidas através da inversão de $(L, C)_{ij}$ com $(I_1, J_1)_{ij}$ e $(L, C)_{ij}$ com $(I_2, J_2)_{ij}$, respectivamente.

Para cada ponto (I, J) da imagem corrigida tem-se dois pares de coordenadas para serem associados: (L_1, C_1) e (L_2, C_2) . No

entanto para cada ponto (I,J) é possível associar um par de coordenadas de projeção (XP,YP), bastando para isso inverter-se o processo de discretização. Entrando com este par de coordenadas no MDET obtem-se a altitude H associada ao ponto (I,J). De posse da altitude interpola-se os pares de coordenadas de imagem bruta, obtidas em função dos elipsóides referentes às altitudes mínima e máxima e obtem-se o par de coordenadas (L,C) da imagem bruta referente ao par (I,J) da imagem corrigida.

$$L = \frac{L_1 \cdot (H - H_{\min}) + L_2 \cdot (H_{\max} - H)}{H_{\max} - H_{\min}} \quad (5.170)$$

$$C = \frac{C_1 \cdot (H - H_{\min}) + C_2 \cdot (H_{\max} - H)}{H_{\max} - H_{\min}} \quad (5.171)$$

É imprescindível que entre as grades do mapeamento inverso e a grade relativa ao MDET ocorra um perfeito casamento, de modo a evitar o emprego de altitudes erradas no processo de interpolação. Este casamento só é assegurado através da utilização de pontos de controle.

O intervalo da grade direta não necessita ser igual ao intervalo da grade do MDET, porém o intervalo da grade inversa deve ser igual a este último, de modo a assegurar a precisão planimétrica correspondente ao nível 2B. O adensamento da grade direta para a grade inversa pode ser executado a partir de interpolações bilineares.

A Figura 5.25 sintetiza os procedimentos executados no processo de correção geométrica no nível 3.

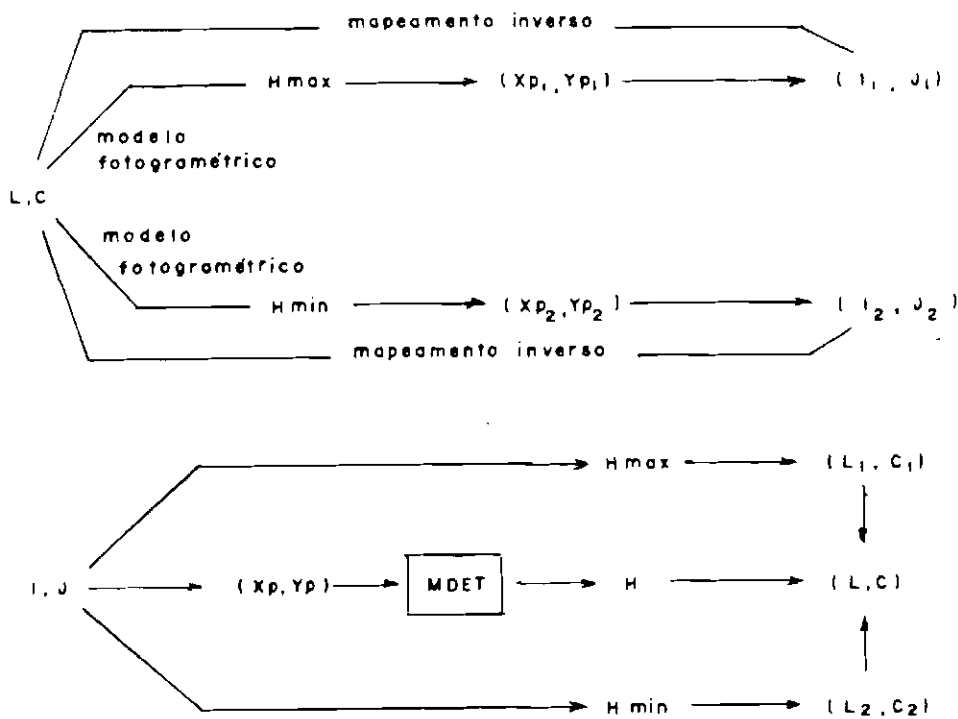


Fig. 5.25 - Modelo interpolativo para o nível 3 SPOT.

5.7.3 - MODELO ITERATIVO

De modo semelhante ao modelo interpolativo, aplica-se o modelo fotogramétrico sobre os dois elipsóides auxiliares, para uma grade amostral de $N \times N$ pontos $P(L, C)_{ij}$, regularmente espaçados sobre a imagem bruta.

Para cada ponto P obtem-se dois pontos $(Q_1(X_1, Y_1, Z_1))$ e $(Q_2(X_2, Y_2, Z_2))$, respectivamente sobre o elipsóide referente a H_{max} e a H_{min} . O ponto Q , realmente observado, encontra-se sobre a reta suporte da visada, limitado por estes dois pontos. Associados a Q_1 e Q_2 tem-se dois parâmetros p_1 e p_2 referentes à equação da reta na forma paramétrica (Equação 4.55). O parâmetro p , referente a Q , pertence ao intervalo definido por p_1 e p_2 .

Dessa forma define-se um intervalo dp e faz-se p variar de p_1 a p_2 , em intervalos iguais a dp .

$$p_i = p_1 + (i - j) \cdot dp \quad \text{tq } p_1 \leq p \leq p_2 \quad (5.172)$$

Para cada passo i da iteração recuperam-se as coordenadas (X,Y,Z) referentes a Q , a partir do parâmetro p , do vetor de visada $\vec{v} (\alpha, \beta, \gamma)$ e das coordenadas da posição do satélite (XS,YS,ZS) . Convertem-se as coordenadas (X,Y,Z) em coordenadas geodésicas (ϕ, λ, H) , em função do elipsóide de referência para a Terra. Finalmente as coordenadas geodésicas são convertidas para coordenadas de projeção (XP,YP,H) .

De posse das coordenadas planimétricas (XP,YP) acessa-se o MDET extraíndo-se a altitude real H_{MDET} referente a um ponto com estas coordenadas. Caso a diferença entre a altitude calculada (H) e a altitude extraída do MDET (H_{MDET}) seja menor que uma tolerância previamente estipulada, a iteração termina.

A iteração deve ser feita partindo-se do ponto de maior altitude para o de menor altitude, uma vez que no caso da reta suporte interceptar dois pontos sobre a superfície terrestre, vale aquele que foi interceptado primeiro, ou seja, o de maior altitude.

O último passo relacionado ao mapeamento direto refere-se à discretização das coordenadas de projeção em coordenadas de imagem corrigida (Equações 5.85 e 5.86).

Neste modelo a distorção devida ao relevo é corrigida durante o mapeamento direto. Como se trata de uma distorção de alta frequência, não modelável por polinômio, exceto para pequenas áreas, torna-se obrigatório o emprego da transformação projetiva por partes durante o processo de mapeamento inverso, ou de um outro processo similar.

A Figura 5.26 apresenta um esquema representativo do modelo iterativo.

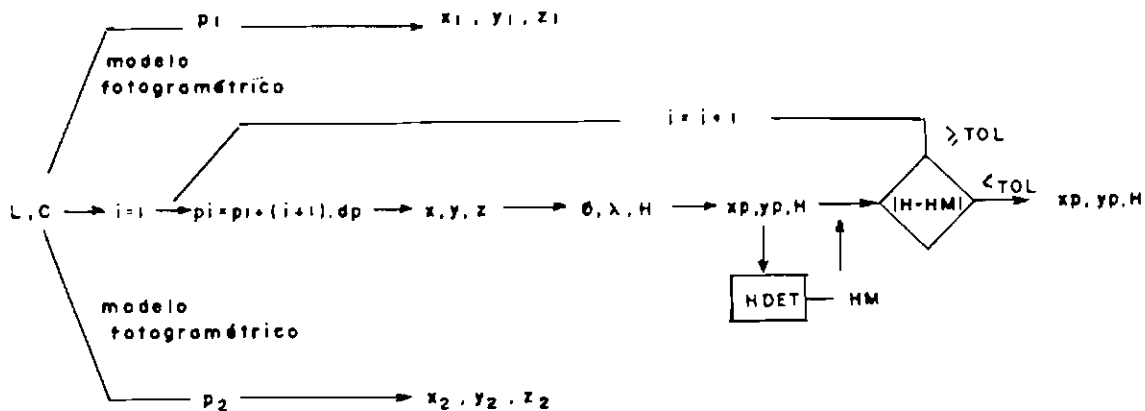


Fig. 5.26 - Modelo iterativo para o nível 3 SPOT.

5.7.4 - COMPARAÇÃO DOS MODELOS

O modelo interpolativo apresenta as seguintes vantagens básicas:

- aplicação direta e simples;
- grade referente ao mapeamento direto pode ser menos densa que a grade do MDET;
- o mapeamento inverso pode fazer uso tanto do método polinomial quanto do método de transformações projetivas por partes.

A desvantagem deste modelo concentra-se na precisão, que é função do tipo de relevo imageado, e do desnível entre a altitude mínima e máxima.

Já o modelo iterativo apresenta a vantagem de poder ter sua precisão preestabelecida. Em contrapartida, apresenta diversas desvantagens:

- grade referente ao mapeamento direto deve ser tão densa quanto a grade do MDET;
- o mapeamento inverso deve ser feito através da transformação projetiva por partes;
- envolve um custo computacional mais elevado.

5.8 - NÍVEL 4

O nível 4 parte de um par estereoscópico de imagens HRV-SPOT, de onde deve ser extraído um modelo digital de elevação do terreno (restituição do par estereoscópico). Uma vez extraído, o MDET é empregado para a correção geométrica de uma ou das duas imagens que compõem o par. Neste ponto recai-se sobre o nível 3, anteriormente citado.

A restituição de pares estereoscópicos tem sua precisão diretamente associada ao modo de operação do sensor HRV (XS ou PAN) e a relação base-altura (B/H) do par.

Denís et al. (1986) apresentam resultados de restituições executadas em função da relação B/H, onde demonstram que para imagens tomadas com as inclinações máximas ($B/H=1$) pode-se obter uma precisão de restituição inferior a 0,5 "pixel" e para uma relação B/H próxima a 0,5 a precisão é ligeiramente inferior a 1 "pixel".

Atualmente existem restituidores analíticos para imagens analógicas HRV-SPOT, bem como sistemas computacionais para restituição a partir de um par de imagens digitais.

5.9 - NÍVEL S

O nível S tem por finalidade registrar duas cenas HRV-SPOT obtidas em épocas distintas, mas que tenham sido obtidas no mesmo modo de operação (XS com XS ou PAN com PAN).

Supondo que ambas as imagens estejam corrigidas no nível de processamento 2A (imagens em visada vertical ou quase vertical) ou 3 (imagens em visada oblíqua) uma simples translação deve ser suficiente para garantir o perfeito "casamento", ou registro, entre as imagens.

Caso contrário pode ser necessária a aplicação de uma transformação geométrica sobre uma das imagens de modo a moldá-la, possibilitando, então, o registro entre elas.

Estas transformações quase sempre são polinomiais, e os coeficientes destes polinômios são determinados a partir de pontos de controle relativos, observados simultaneamente nas duas imagens (pontos homólogos).

Para determinação dos pontos homólogos deve-se selecionar características notáveis sobre uma das imagens, e procurar o correspondente na outra imagem, aplicando-se um algoritmo de registro.

Para esta procura é comum empregar-se algoritmos de registro translacional, que são mais eficientes computacionalmente, e apresentam boa confiabilidade nesta aplicação. É importante, no entanto, que as imagens, nas regiões em torno dos pontos de controle, não apresentem diferenças significativas.

No registro translacional deseja-se saber qual subimagem J' de $M \times N$ pontos, da imagem J de $M+A \times N+B$ pontos, mais se assemelha a imagem I de $M \times N$ pontos. Deve-se, então, comparar I com as $A+1 \times B+1$ subimagens J'_i de J , de dimensões $M \times N$, e selecionar aquela que apresenta a menor diferença para a imagem I .

Existem diversos algoritmos para medir o grau de semelhança, ou de dessemelhança, entre duas imagens. Em geral, estes algoritmos computam as diferenças ponto a ponto entre as imagens, combinando estas diferenças num único número.

Alguns dos algoritmos mais notáveis são:

$$\max_{\substack{x=0 \rightarrow M-1 \\ y=0 \rightarrow N-1}} \text{abs}(I(x, y) - J'_i(x, y)) \quad (5.173)$$

$$\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \text{abs}(I(x, y) - J'_i(x, y)) \quad (5.174)$$

$$\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I(x, y) - J'_i(x, y))^2 \quad (5.175)$$

que medem o grau de semelhança pelo máximo da diferença entre as imagens (Equação 5.173); pelo somatório dos valores absolutos das diferenças ponto a ponto (Equação 5.174); ou pelo somatório dos quadrados das diferenças ponto a ponto (Equação 5.175).

Outros algoritmos de registro translacional são a correlação cruzada (CC) e a correlação cruzada normalizada (CN):

$$CC = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I(x, y) - J'_i(x, y)) \quad (5.176)$$

$$CN = CC / \left(\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} J'_i(x, y)^2 \right) \quad (5.177)$$

Como o custo computacional da correlação cruzada é bastante elevado, foi estabelecido um processo alternativo denominado SSDA ("Sequential Similarity Detection Algorithms" - Algoritmos de Deteção Sequencial de Semelhança).

O SSDA não executa a correlação cruzada para todos os casos possíveis, pois elimina possíveis pontos de registro a partir da aplicação de um teste, que é mais eficiente computacionalmente que o algoritmo de correlação.

Este teste consiste em calcular, para cada possível ponto de registro, a diferença ponto a ponto entre I e J'_i . Tão logo a diferença acumulada ultrapasse um limiar pré-fixado, o ponto é rejeitado.

A escolha deste limiar é importante, pois se muito baixa, pode vir a rejeitar o ponto de registro e, se alta, pode aceitar pontos demais encarecendo o custo computacional.

Independente do critério estabelecido, o registro entre imagens no nível de processamento S deve ser inferior a 0,5 "pixel".

CAPÍTULO 6

AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE IMAGENS E MODELOS

O objetivo do processo de avaliação geométrica de imagens de satélite é fornecer informações ligadas à geometria interna das imagens (erro interno, erro de escala, variação da escala ao longo de determinadas direções, p.ex: ao longo das varreduras ou ao longo da órbita), e ao posicionamento desta em relação a um referencial cartográfico (geometria externa).

O resultado desta avaliação vai permitir ao usuário conhecer o grau de confiança para suas operações sobre estas imagens, tais como:

- reconhecimento de objetos a partir de suas formas (ilhas, estradas, rios, lagos etc.),
- medida de dimensões destes objetos: comprimento, perímetro e área,
- localização destes objetos sobre a Terra: latitude, longitude (identificação de feições com base em coordenadas geodésicas).
- monitoramento temporal destes objetos, comparando imagens obtidas em diferentes datas.

As duas primeiras operações estão intimamente relacionadas com a geometria interna da imagem (Rosso, 1979), sendo ainda extremamente importantes para produção de cartas temáticas e atualização de cartas topográficas (d'Alge, 1987). As demais dizem respeito ao erro de posicionamento que permite superpor uma imagem a um documento cartográfico, ou à outra imagem obtida em data diferente (registro multitemporal). O erro de posicionamento da imagem é extremamente importante para confecções de cartas-imagem em regiões desprovidas de documentos cartográficos.

O INPE adota como procedimento para avaliação de imagens o emprego de transformações polinomiais que mapeiam o espaço imagem (X,Y) no espaço objeto (X',Y') . Dos coeficientes destes polinômios são extraídos parâmetros como erro de escala, orientação e posicionamento.

A SPOTIMAGE optou por determinar, de forma isolada, parâmetros que pudessem compor o conceito de geometria interna (variação de comprimento é anisomorfismo) e de geometria externa (precisão de localização).

Qualquer que seja o procedimento adotado, deve-se ter em mente que a avaliação geométrica deve fornecer o grau de similaridade ou semelhança (geometria interna) entre a imagem e o objeto nela retratado, bem como a precisão com que esta imagem está situada frente a um determinado referencial (geometria externa). Para isso, é necessário o levantamento de pontos de controle bem identificáveis, tanto na imagem quanto em cartas topográficas. No caso de imagens HRV-SPOT não se deve utilizar cartas com escalas menores que a de 1:50.000, em função da relação entre o erro médio da carta e a resolução espacial do sensor HRV-SPOT.

6.1 - AVALIAÇÃO PELO MÉTODO POLINOMIAL

No processo de avaliação geométrica através do método polinomial procura-se ajustar o conjunto de coordenadas de imagem (X,Y) ao conjunto de coordenadas extraído de cartas (X',Y') , considerando-se que as diferenças existentes entre estes conjuntos deve-se ao erro inerente à imagem. No entanto é sabido que as cartas topográficas também têm um erro a elas associado, e isto dificulta a quantificação do erro inerente às imagens.

De forma mais precisa, os pontos de controle deveriam ser obtidos por métodos que permitissem realmente negligenciar seus erros em face da grandeza estimada para o erro das imagens. Por exemplo, as coordenadas de pontos de controle poderiam ser obtidas a

partir de rastreamento por satélite, com precisões bem superiores às aquelas obtidas de cartas topográficas.

As transformações polinomiais empregadas são as de primeira ordem, que permitem a observação de fatores relacionados à geometria interna e externa da imagem.

A transformação básica a ser utilizada é a transformação polinomial de primeiro grau completo, ou simplesmente transformação de afinidade ou afim. A transformação afim preserva o paralelismo e apresenta o seguinte equacionamento:

$$X' = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot Y \quad (6.1)$$

$$Y' = b_0 + b_1 \cdot X + b_2 \cdot Y \quad (6.2)$$

Os seis parâmetros da transformação podem ser associados a uma rotação (α), um fator de não ortogonalidade (ε), dois fatores de escala (E_x, E_y) e dois fatores de translação (X'_0, Y'_0) (Merchant, 1979). As Equações 6.1 e 6.2 podem, então, ser reescritas para:

$$X' = X'_0 + E_x \cdot \cos \alpha \cdot X + E_y \cdot \sin(\alpha + \varepsilon) \cdot Y \quad (6.3)$$

$$Y' = Y'_0 - E_x \cdot \sin \alpha \cdot X + E_y \cdot \cos(\alpha + \varepsilon) \cdot Y \quad (6.4)$$

Comparando as Equações 6.1 e 6.2 com as Equações 6.3 e 6.4, tem-se:

$$X'_0 = a_0 \text{ e } Y'_0 = b_0 \quad (6.5)$$

$$E_x = (a_1^2 + b_1^2)^{1/2} \text{ e } E_y = (a_2^2 + b_2^2)^{1/2} \quad (6.6)$$

$$\alpha = \tan^{-1}(-b_1/a_1) \text{ e } \varepsilon = \tan^{-1}(a_2/b_2) - \alpha \quad (6.7)$$

Fisicamente a transformação afim permite variações de escalas diferentes para duas direções ortogonais, além de não preservar a ortogonalidade, mantendo apenas o paralelismo entre retas.

A ortogonalidade, no entanto, é interessante de ser preservada, e forçando que ϵ seja nulo, recai-se numa transformação afim ortogonal. As Equações 6.1 a 6.7 são, então, substituídas pelas Equações 6.8 a 6.15.

$$X' = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot Y \quad (6.8)$$

$$Y' = b_0 + b_1 \cdot X + b_2 \cdot Y \quad (6.9)$$

$$a_1 \cdot a_2 + b_1 \cdot b_2 = 0 \quad (\text{ortogonalidade}) \quad (6.10)$$

$$X' = X'_0 + E_x \cdot \cos \alpha \cdot X + E_y \cdot \sin \alpha \cdot Y \quad (6.11)$$

$$Y' = Y'_0 - E_x \cdot \sin \alpha \cdot X + E_y \cdot \cos \alpha \cdot Y \quad (6.12)$$

$$X'_0 = a_0 \quad \text{e} \quad Y'_0 = b_0 \quad (6.13)$$

$$E_x = (a_1^2 + b_1^2)^{1/2} \quad \text{e} \quad E_y = (a_2^2 + b_2^2)^{1/2} \quad (6.14)$$

$$\alpha = \tan^{-1}(-b_1 / a_1) = \tan^{-1}(a_2 / b_2) \quad (6.15)$$

No entanto as operações possíveis de serem realizadas por usuários geralmente restringem-se a uma ampliação (ou redução), uma rotação e duas translações, operações estas que mantêm a semelhança ou similaridade entre o objeto inicial e o objeto transformado. Por este motivo, esta transformação é denominada de transformação de similaridade, isogonal ou conforme. Fisicamente a transformação de similaridade mantém as formas dos objetos, preservando assim, o paralelismo e a ortogonalidade. As equações que representam tal transformação têm o seguinte aspecto:

$$X' = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot Y \quad (6.16)$$

$$Y' = b_0 - a_2 \cdot X + a_1 \cdot Y \quad (6.17)$$

ou então:

$$X' = X'_0 + E \cdot \cos \alpha \cdot X + E \cdot \operatorname{sen} \alpha \cdot Y \quad (6.18)$$

$$Y' = Y'_0 - E \cdot \operatorname{sen} \alpha \cdot X + E \cdot \cos \alpha \cdot Y \quad (6.19)$$

Comparando as Equações 6.16 e 6.17 com as Equações 6.18 e 6.19, tem-se:

$$X'_0 = a_0 \text{ e } Y'_0 = b_0 \quad (6.20)$$

$$E = (a_1^2 + a_2^2)^{1/2} \quad (6.21)$$

$$\alpha = \tan^{-1}(a_2 / a_1) \quad (6.22)$$

No caso do usuário não dispor das facilidades de ampliar a imagem, as operações possíveis passam a ter apenas três graus de liberdade: uma rotação e duas translações. Tais operações, que mantêm a forma (conforme) e as dimensões (equivalente), são definidas através da transformação de corpo rígido, que tem o seguinte aspecto:

$$X' = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot Y \quad (6.23)$$

$$Y' = b_0 - a_2 \cdot X + a_1 \cdot Y \quad (6.24)$$

$$a_1^2 + a_2^2 = 1 \text{ (equivalência)} \quad (6.25)$$

ou então:

$$X' = X'_0 + \cos \alpha . X + \operatorname{sen} \alpha . Y \quad (6.26)$$

$$Y' = Y'_0 - \operatorname{sen} \alpha . X + \cos \alpha . Y \quad (6.27)$$

Das Equações 6.23 a 6.27, tem-se:

$$X'_0 = a_0 \text{ e } Y'_0 = b_0 \quad (6.28)$$

$$\alpha = \tan^{-1}(a_2 / a_1) \quad (6.29)$$

Em alguns casos não existe nem a possibilidade de rotacionar o espaço imagem, principalmente quando se trata de imagens digitais. Neste caso a transformação representa apenas uma translação entre os espaços imagem e objeto, conforme as Equações 6.30 a 6.32.

$$X' = a_0 + X = X'_0 + X \quad (6.30)$$

$$Y' = b_0 + Y = Y'_0 + Y \quad (6.31)$$

donde

$$X'_0 = a_0 \text{ e } Y'_0 = b_0 \quad (6.32)$$

De forma rigorosa o resultado da avaliação geométrica de uma imagem deve ser dado através da transformação de corpo rígido, mas classicamente adota-se a transformação de similaridade, que permite variações no fator de escala. No entanto, espera-se que o fator de escala (E) embutido na transformação de similaridade esteja bem próximo da escala nominal.

É esperado, também, que os fatores de translação (X'_0 e Y'_0) encontrados nas diversas transformações, não sejam muito discrepantes, podendo representar o erro de posicionamento da imagem.

O erro de orientação é dado pelo fator de rotação (α) da transformação de corpo rígido, ou da transformação de similaridade.

O erro de escala é obtido da transformação de similaridade, comparando-se o valor encontrado para o fator de escala (E) com o valor nominal esperado.

O erro de variação de escala em duas direções ortogonais é obtido a partir da relação entre os fatores de escala (E_x) e (E_y) da transformação afim ortogonal.

Da transformação afim pode-se extrair um fator sistemático referente a descontinuidade entre linhas sucessivas ("skew" residual), que representaria uma não ortogonalidade entre as direções da varredura e da órbita, a partir do fator (ϵ).

Para definição dos parâmetros referentes a tais transformações, utiliza-se o Princípio dos Mínimos Quadrados, a partir de dois conjuntos de N pontos de controle, bem distribuídos ao longo da imagem.

Para as transformações afim e afim ortogonal são necessários um mínimo de três pontos de controle; para as transformações de similaridade e de corpo rígido dois pontos de controle são suficientes; e para a transformação de translação, apenas um ponto é necessário. No entanto, é recomendável que o número N de pontos de controle seja maior que estes, de forma que o sistema seja sobredeterminado (número de equações maior que o número de coeficientes a determinar), e de modo a garantir a ocupação de toda a imagem.

Supondo que $(X, Y)_i$ são as coordenadas de imagem do ponto de controle P_i e que $(X', Y')_i$ são as coordenadas de carta do mesmo ponto de controle, pode-se escrever, exemplificando para a transformação afim, que:

$$X'_i = a_0 + a_1 \cdot X_i + a_2 \cdot Y_i \quad (6.33)$$

$$Y'_i = b_0 + b_1 \cdot X_i + b_2 \cdot Y_i \quad (6.34)$$

Colocando-se as Equações 6.33 e 6.34 na forma matricial para N pontos de controle, tem-se:

$$\begin{bmatrix} 1 & X_1 & Y_1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & X_2 & Y_2 & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & X_N & Y_N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_1 & Y_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_2 & Y_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_N & Y_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'_1 \\ X'_2 \\ \cdot \\ X'_N \\ Y'_1 \\ Y'_2 \\ \cdot \\ Y'_N \end{bmatrix} \quad (6.35)$$

$\begin{matrix} A & & X & & B \\ 2N & 6 & 6 & 1 & 2N & 1 \end{matrix}$

$$A \cdot X = B \quad (6.36)$$

ou

$$X = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot B \quad (6.37)$$

onde P é a matriz peso dos pontos de controle. A matriz P é diagonal pois os pontos de controle são considerados não correlacionados.

Após a determinação do vetor de parâmetros X é possível calcular os seis fatores que definem a transformação afim (Equações 6.5 a 6.7), bem como o vetor de resíduos ($\vec{v}_{res}$), dado por:

$$\vec{v}_{res} = A \cdot X - B \quad (6.38)$$

O erro interno da imagem é definido pelos resíduos encontrados, conforme as Equações 6.39 a 6.41.

$$\text{Erro}_x = \left(\sum_{i=1}^N v_{\text{res}}^2(i) / N \right)^{1/2} \quad (6.39)$$

$$\text{Erro}_y = \left(\sum_{i=N+1}^{2N} v_{\text{res}}^2(i) / N \right)^{1/2} \quad (6.40)$$

$$\text{Erro} = (\text{Erro}_x^2 + \text{Erro}_y^2)^{1/2} \quad (6.41)$$

Uma análise no vetor de resíduos pode indicar pontos de controle ruins (mal identificados, localizados ou medidos) de modo que com suas eliminações melhores resultados possam ser alcançados para o erro interno da imagem.

A simples análise dos resíduos, no entanto, não indica, com alta fidelidade, os pontos de controle ruins, pois um ponto fora do ajustamento pode provocar uma situação falsa numa região em torno dele. Ou seja, separar os pontos de controle bons dos ruins é uma tarefa extremamente difícil. Para facilitar, foi implementado um teste em função da variação da distância entre um ponto de controle e os demais.

Para cada ponto de controle P_i , determina-se as distâncias entre este ponto e todos os demais, a partir das coordenadas de imagem (d_{ij}) e das coordenadas de carta (d'_{ij}). Uma análise sobre as relações d_{ij}/d'_{ij} pode indicar, ou pelo menos facilitar a indicação de pontos de controle ruins.

A determinação dos coeficientes da transformação é uma tarefa processada em vários passos, até se encontrar um conjunto ótimo de pontos de controle.

Uma vez determinados, deve-se aplicar os coeficientes da transformação a outro grupo de pontos de controle de modo a se chegar

ao erro interno que será associado à imagem. Novamente deverá ser executado um processo iterativo de seleção de pontos de controle até se chegar ao valor representativo do erro interno da imagem. Este segundo grupo de pontos de controle deve igualmente ser bem distribuído ao longo da imagem.

No caso da transformação afim o erro interno é dado pelos resíduos da transformação aplicada aos pontos de controle do segundo grupo, conforme as Equações 6.39 a 6.41.

Em relação à geometria interna pode-se determinar ainda a variação de escala entre duas direções ortogonais:

$$An(\%) = (Ex - Ey) / Ex . 100 \quad (6.42)$$

pode-se inferir o erro de escala, a partir da média entre os dois fatores de escala, e a escala nominal (E_n) esperada.

$$Erro_{esc}(\%) = \frac{(Ex + Ey) / 2 - E_n}{E_n} . 100 \quad (6.43)$$

O erro de posicionamento é dado pela orientação residual entre os espaços imagem e objeto (α) e pelos fatores de translação X'_0 e Y'_0 .

Num processo de avaliação rigoroso, devem ser analisadas pelo menos as transformações de corpo rígido (erro de orientação e de posicionamento), de similaridade (erro de escala) e afim ortogonal (variação de escala entre duas direções ortogonais).

6.2 - AVALIAÇÃO PELO MÉTODO DA SPOTIMAGE

A escola francesa define certos parâmetros a serem avaliados, que são divididos em dois grupos: qualidade interna (ou intrínseca) e qualidade externa (ou extrínseca).

Os parâmetros associados à qualidade interna da imagem são variação de comprimento e anisomorfismo. A variação de comprimento avalia variações relativas sobre distâncias medidas na imagem e no plano de projeção. O anisomorfismo analisa a variação de escala entre duas direções ortogonais.

A qualidade externa é definida pela precisão de localização, que é obtida comparando-se diretamente as coordenadas de imagem com as coordenadas de carta.

6.2.1 - QUALIDADE INTERNA

A distorção local de uma representação plana da Terra é usualmente, caracterizada pela inclinação das elipses de TISSOT, que são simplesmente as imagens de pequenos círculos do solo. Uma projeção sem distorção forneceria elipses de TISSOT circulares, e em verdadeira grandeza.

Na projeção conforme é possível definir, para qualquer ponto, uma escala local, independente da direção. No entanto, é matematicamente impossível de se construir uma projeção conforme onde tal escala seja a mesma para todos os pontos.

Com o Sensoriamento Remoto Espacial dois novos graus de liberdade apareceram (Rosso, 1979). A conformidade ideal não é mais possível de ser obtida, porém uma conformidade aproximada é alcançável: as elipses de TISSOT não são circulares e seus achatamentos $((a-b)/a)$ fornecem uma medida simples do grau de não conformidade, ou simplesmente uma medida do anisomorfismo. Esta distorção pontual será, em geral, relativamente pequena, e permitirá que se fale em uma escala local aproximada.

Além disso, de um ponto a outro de uma imagem, as condições de visada e imageamento variam de uma maneira mais ou menos indeterminada, o que acarreta uma variação, no plano imagem, da escala, variação esta difícil de ser limitada.

Neste caso a noção de escala única é bastante aproximada, mais que numa representação cartográfica. A variação relativa da escala local ao longo do plano imagem fornece um meio de quantificar esta aproximação.

O resultado é uma imprecisão sobre as estimativas de distâncias entre dois pontos observados. O erro desta estimativa é diretamente igual à variação relativa da escala, que será denominada de variação de comprimento, ou variação de escala.

Matematicamente, a variação de comprimento (VC) pode ser representada pela Equação 6.44.

$$VC(\%) = (d_{ij} - d'_{ij}) / d'_{ij} \cdot 100 \quad (6.44)$$

onde d_{ij} é a distância entre os pontos $P(X,Y)_i$ e $P(X,Y)_j$, observados na imagem, e d'_{ij} é a distância entre os pontos $P(X',Y')_i$ e $P(X',Y')_j$, observados na carta (ou diretamente no terreno).

Existe uma forte analogia entre o parâmetro variação de comprimento (VC), da escola francesa, e o fator de escala E, da transformação de similaridade. Da Equação 6.44, tem-se:

$$VC = d_{ij} / d'_{ij} - 1 \quad (6.45)$$

$$VC = \frac{((X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2)^{1/2}}{((X'_i - X'_j)^2 + (Y'_i - Y'_j)^2)^{1/2}} - 1 \quad (6.46)$$

Combinando as Equações 6.18, 6.19 e 6.46 tem-se:

$$VC = ((X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2)^{1/2} /$$
$$((E \cdot \cos \alpha \cdot (X_i - X_j) + E \cdot \sin \alpha \cdot (Y_i - Y_j))^2 +$$

$$(-E \cdot \text{sen} \alpha \cdot (X_i - X_j) + E \cdot \cos \alpha \cdot (Y_i - Y_j))^2)^{1/2} - 1 \quad (6.47)$$

$$VC = \frac{((X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2)^{1/2}}{(E^2 \cdot (X_i - X_j)^2 + E^2 \cdot (Y_i - Y_j)^2)^{1/2}} - 1 \quad (6.48)$$

$$VC = 1/E - 1 \quad (6.49)$$

De forma isolada pode-se calcular o parâmetro variação de comprimento por:

$$VC = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d'_{ij} \cdot d_{ij}}{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d'_{ij}} - 1 \quad (6.50)$$

De forma semelhante, o parâmetro anisomorfismo tem forte analogia com a razão entre os fatores de escala (E_x e E_y) da transformação afim ortogonal. O parâmetro anisomorfismo (An) é definido pela Equação 6.51, onde P_1P_2 é perpendicular a P_1P_3 .

$$An(\%) = ((d_{12} / d'_{12}) / (d_{13} / d'_{13}) - 1) \cdot 100 \quad (6.51)$$

Considerando, sem perda de generalidade, que o eixo X no espaço objeto é paralelo ao segmento de reta P_1P_2 , obrigatoriamente o eixo Y será paralelo ao segmento de reta P_1P_3 . Como consequência tem-se que: $Y_1 = Y_2$ e $X_1 = X_3$.

Da Equação 6.51, tem-se:

$$An = ((X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2)^{1/2} \cdot ((X'_1 - X'_3)^2 + (Y'_1 - Y'_3)^2)^{1/2} /$$
$$(((X'_1 - X'_2)^2 + (Y'_1 - Y'_2)^2)^{1/2} \cdot ((X_1 - X_3)^2 + (Y_1 - Y_3)^2)^{1/2}) - 1 \quad (6.52)$$

Combinando as Equações 6.11, 6.12 e 6.52, tem-se:

$$An = \frac{X_1 - X_2}{(Ex^2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot (X_1 - X_2)^2 + Ey^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot (X_1 - X_2)^2)^{1/2}} \cdot \frac{(Ey^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot (Y_1 - Y_3)^2 + Ex^2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot (Y_1 - Y_3)^2)^{1/2}}{Y_1 - Y_3} - 1 \quad (6.53)$$

$$An = \frac{X_1 - X_2}{Ex \cdot (X_1 - X_2)} \cdot \frac{Ey \cdot (Y_1 - Y_3)}{Y_1 - Y_3} - 1 \quad (6.54)$$

$$An = E_y / E_x - 1 \quad (6.55)$$

Outra maneira de se calcular o anisomorfismo consiste em corrigir o erro de orientação entre o espaço imagem e o espaço objeto, tornando os dois sistemas paralelos. Posteriormente determina-se a variação relativa entre as escalas nas direções X e Y.

$$An = \frac{\frac{X_i - X_j}{X'_i - X'_j}}{\frac{Y_i - Y_j}{Y'_i - Y'_j}} - 1 \quad (6.56)$$

ou ainda:

$$An = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\Delta X_{ij} \cdot \Delta X'_{ij} + \Delta Y_{ij} \cdot \Delta Y'_{ij}}{(\Delta X_{ij})^2 + (\Delta Y_{ij})^2} - 1 \quad (6.57)$$

onde

$$\Delta S_{ij} = S_i - S_j \quad \text{e } S \in \{X, X', Y, Y'\} \quad (6.58)$$

6.2.2 - QUALIDADE EXTERNA

A precisão com que é possível superpor uma imagem com uma outra representação plana, da mesma região da imagem, geralmente um documento cartográfico preciso, é denominada de precisão de localização. Em suma, a precisão de localização é a precisão com que se consegue referenciar uma imagem a um determinado Sistema de Referência Cartográfica.

Associado à precisão de localização, tem-se o termo erro de posicionamento (EP) que pode ser extraído da comparação direta entre as coordenadas de imagem e as coordenadas de carta.

$$EP_x = X' - X \quad \text{e} \quad EP_y = Y' - Y$$

O erro de posicionamento está intimamente relacionado aos parâmetros da transformação de translação.

6.3 - AVALIAÇÃO DAS DIVERSAS FONTES DE DISTORÇÕES

A análise de resultados provenientes da avaliação da influência das diversas fontes de distorções geométricas pode servir como um indicador da consistência ou não do modelo de correção empregado. Além disso, estes resultados poderão indicar os pontos mais críticos (ou vulneráveis) do modelo, onde os esforços de refinamento devem se concentrar.

No modelo de correções polinomiais fica impossibilitada qualquer ação nesse sentido. No modelo de correções independentes este procedimento representa o próprio fundamento do modelo: corrigir cada uma das fontes de distorção separadamente. No modelo fotogramétrico uma ação desta natureza é importante, uma vez que este modelo corrige de forma global e integrada todas as distorções geométricas inerentes ao sistema de formação de imagens. Desta forma é interessante que se proceda a uma análise rigorosa sobre a influência

das diversas fontes de distorções geométricas no modelo fotogramétrico.

Para esta análise foram selecionadas seis imagens, procurando-se ter amostras variadas quanto ao instrumento, ao modo de operação, à inclinação do espelho e à posição geográfica das mesmas (latitude e posição das imagens em relação aos fusos UTM).

As imagens são identificadas por um conjunto de caracteres do tipo SNTI-RRRRR[BBB]PPP, onde S representa o satélite SPOT, N o número de série do satélite, T o modo de operação (X=XS, P=PAN), RRRRR o número da revolução (órbita real) do satélite, BBB a base da grade de referência SPOT e PPP o ponto, nesta mesma grade.

Para cada imagem são informados ainda o ângulo de inclinação do espelho, a data referente à passagem do satélite, as coordenadas geodésicas do centro e o ângulo de orientação das imagens em relação ao norte geográfico. A Tabela 6.1 apresenta as principais características das imagens selecionadas.

TABELA 6.1

CARACTERÍSTICAS DAS IMAGENS OBSERVADAS

Cena	S1X1-11909[705]377	S1X2-11554[716]393
Inclinação	0°	1,8°
Data da passagem	06/06/88	12/05/88
Lat/Lng	S13:31/W049:42	S31:31/W046:11
Orientação	9,35°	8,84°
Cena	S1P1-10972[719]390	S1P2-12221[722]396
Inclinação	.9°	15°
Data da passagem	01/04/88	28/06/88
Lat/Lng	S20:01/W044:25	S23:01/W043:37
Orientação	9,79°	9,34°
Cena	S1X1-11994[707]416	S1X2-11980[712]385
Inclinação	-19,2°	27°
Data da passagem	12/06/88	11/06/88
Lat/Lng	S32:58/W053:40	S17:31/W047:11
Orientação	10,88°	7,01°

As imagens também serão referidas por cena 1, cena 2,...,cena 6, em função da ordem crescente do ângulo de inclinação do espelho (cena 1: S1X1-11909[705]377,..., cena 6: S1X2-11980[712]385).

Para análise da influência de cada fonte de distorção aplicou-se o modelo fotogramétrico a diversas grades amostrais de dimensões NxN, onde N $\in$ {3,5,9,13,21,31,51,61,101,121}. Como resultado obteve-se diversos conjuntos de coordenadas (X',Y') na projeção UTM ("Universal Transverse Mercator" - Universal Transversa de Mercator). Em seguida inibiu-se cada uma das fontes de distorção e, aplicando-se

o modelo fotogramétrico, obteve-se os correspondentes conjuntos de coordenadas (X,Y) no mesmo sistema de projeção.

Considerando-se que as coordenadas de modelo completo (X',Y') fossem corretas, ajustou-se o conjunto de coordenadas (X,Y) a este conjunto de coordenadas, através da transformação de corpo rígido (Equações 6.23 a 6.25). Os erros internos (Equações 6.39 a 6.41) resultantes da transformação, bem como os fatores de translação, quando significativos, foram analisados em função da dimensão N da grade amostral.

6.3.1 - INFLUÊNCIA DA ATITUDE

Para análise da influência da atitude no modelo fotogramétrico foram seguidos dois caminhos. No primeiro deixou-se de corrigir cada uma das componentes da atitude (rolamento, arfagem e guinada) isoladamente e, posteriormente não se corrigiu componente alguma. A Tabela 6.2 apresenta os resultados encontrados.

O segundo caminho consistiu em adicionar valores constantes às componentes da atitude, para avaliação do desempenho do modelo. Este procedimento decorre do desconhecimento que se tem da constante de integração dos dados de atitude, que leva à consideração de que a atitude no centro da cena é nula. Os valores adicionados foram 0,01°; 0,03°; 0,05°; 0,10° e 0,15°. Deve-se destacar que, para estas imagens, os ângulos relativos à atitude em momento algum ultrapassaram 0,05°, ficando em média entre 0,01° e 0,03°. No entanto, pelas especificações (SPOTIMAGE, 1987) estes valores podem alcançar até 0,15°. A Tabela 6.3 resume os resultados daí decorrentes.

TABELA 6.2

INFLUÊNCIA DA NÃO CORREÇÃO DA ATITUDE
(EM METROS)

		cena 1	cena 2	cena 3	cena 4	cena 5	cena 6
	RMSX	15,3	14,7	20,6	5,0	6,7	23,1
rol	RMSY	3,1	2,6	5,1	0,8	1,4	3,1
	RMSE	15,6	14,9	21,2	5,1	6,9	23,3
	RMSX	3,2	3,8	3,6	2,1	1,8	3,2
arf	RMSY	14,1	21,2	13,6	11,7	8,0	13,6
	RMSE	14,4	21,5	13,9	11,9	8,2	14,0
	RMSX	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,8
gui	RMSY	0,3	0,8	1,9	1,3	1,1	7,0
	RMSE	0,4	0,8	1,9	1,3	1,1	7,0
	RMSX	15,6	15,2	20,9	6,0	7,2	24,3
r,a,g	RMSY	14,4	21,4	14,5	11,4	7,8	17,2
	RMSE	21,3	26,2	25,4	12,9	10,6	29,8

Da Tabela 6.2 observa-se que a influência dos ângulos de rolamento e arfagem é bem maior que a influência do ângulo relativo à guinada. Os resultados são compatíveis com as ordens de grandeza destes dados, para estas imagens. Aliás, a variação da ordem de grandeza de todos os resultados se mostrou coerente com a ordem de grandeza dos dados de atitude. Quando a magnitude da atitude aumentou, o erro observado na imagem aumentou, e quando a magnitude da atitude diminuiu, o erro observado diminuiu também.

Dessa forma o erro devido à não correção do rolamento variou de 5,1 a 23,3 metros, apresentando uma média de 14,5 metros.

Coerentemente, o erro inerente ao rolamento apresentou maior concentração no eixo do Sistema de Projeção mais próximo à direção das varreduras (eixo XP - Figura 6.1). Deve-se ressaltar que entre o Sistema de Projeção e o Sistema de Coordenadas da Imagem existe uma defasagem angular equivalente ao ângulo de orientação da imagem em relação ao Norte (Figura 6.1). É importante lembrar que a direção das varreduras sofre alterações dinâmicas, em função da variação da direção da velocidade e, principalmente, da variação da guinada. Dessa forma haverá sempre uma componente residual na direção normal à direção média das varreduras.

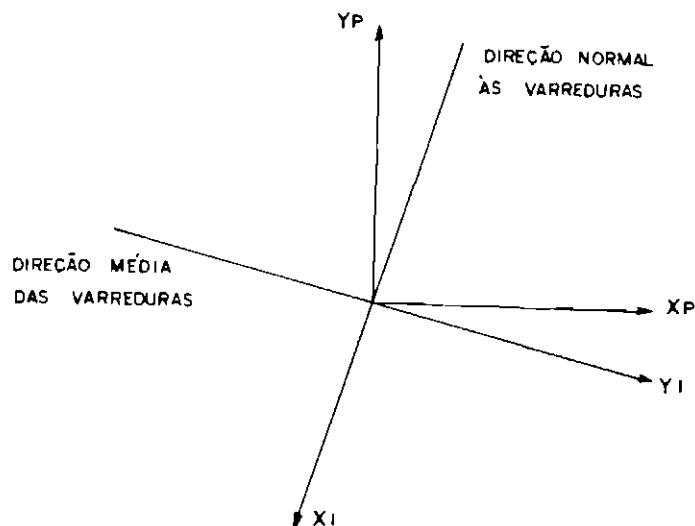


Fig. 6.1 - Orientação entre os sistemas de projeção e de imagem.

De forma análoga o erro devido à arfagem aparece mais nitidamente no eixo mais próximo à direção normal às varreduras (eixo Y - Figura 6.1). Nestas imagens a magnitude deste erro variou de 8,2 a 21,5 metros, em torno de uma média de 14,0 metros.

Se as coordenadas de modelo completo (X', Y') fossem comparadas diretamente com as coordenadas de modelo em que uma das fontes de distorções não é corrigida (X, Y), poder-se-ia observar que os resíduos desta comparação estariam mais próximas em se ajustar às direções médias das varreduras e normal às varreduras, respectivamente para o rolamento e para a arfagem.

Este procedimento foi então realizado e pode-se constatar que quando inibiu-se a correção do ângulo de rolamento, a razão entre o erro na direção Y e o erro na direção X ficou bem próxima da tangente do ângulo de orientação entre os dois sistemas, indicando que a influência do rolamento, a menos de erros residuais, se concentra na direção média das varreduras.

$$\alpha = \tan^{-1}(E_y / E_x) \quad (6.59)$$

O mesmo ocorreu para a arfagem, quando a razão entre o erro na direção X e o erro na direção Y se aproximou da tangente do ângulo de orientação, indicando que a influência da arfagem está na direção normal às varreduras.

$$\alpha = \tan^{-1}(E_x / E_y) \quad (6.60)$$

Em ambos os casos porém, a componente do erro global ($E=(E_x^2+E_y^2)^{1/2}$) era ligeiramente maior que o erro encontrado no ajustamento da transformação de corpo rígido, indicando que desta forma aquele erro continha componentes relativas a translações e rotação residuais.

Já o ângulo referente à guinada apresentou um excelente comportamento, e somente uma imagem (S1X2-11980[712]385) fugiu à média, com um resíduo ligeiramente elevado. Excluindo esta cena, a distorção relativa à guinada variou de 0,4 a 1,9 metros, para uma média de 1,1 metros. Incluindo a referida cena, o limite superior subiu para 7,0 metros e a média para 2,1 metros.

Não corrigindo nenhuma componente da atitude, o modelo absorveria uma distorção entre 10,6 e 29,8 metros, para uma média de 21,0 metros. Os resultados, neste caso, se aproximaram da composição dos resíduos de cada componente isolada.

Os resultados encontrados não forneceram nenhuma indicação de ligação entre a magnitude dos erros ligados à atitude e o ângulo de inclinação do espelho. A cena S1X1-11994[707]416, com $-19,2^\circ$ de inclinação do espelho, foi a que apresentou melhor resultado (10,6 metros), enquanto que a cena S1X2-11980[712]385, com ângulo de inclinação do espelho de 27° , apresentou o pior resultado (29,8 metros).

Com relação à dimensão da grade amostral (N), notou-se que os resultados sofreram variações aleatórias, em função de representarem amostras de atitude diferentes. No entanto, o crescimento da dimensão da grade (com um consequente aumento no universo amostral da atitude) indicou uma tendência de equilíbrio para os valores relativos aos erros dos ajustamentos. Para o intervalo de tempo relativo a uma cena são amostrados de 72 a 73 registros de dados de atitude. A partir de $N=61$, os valores encontrados ficaram praticamente constantes.

A Tabela 6.2 apresenta os resultados para uma grade de 121×121 pontos. Aliás, todas as tabelas que não fizeram menção às dimensões da grade, estarão se referindo aos resultados referentes a grades de 121×121 pontos.

TABELA 6.3

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE UM VALOR CONSTANTE À ATITUDE

(EM METROS)

CENA S1X1-11909[707]377

	ΔX	ΔY	RMSX	RMSY	RMSE
Rol + 0,01	143,1	-23,6	0,1	0,0	0,1
Rol + 0,03	429,4	-70,8	0,2	0,1	0,2
Rol + 0,05	715,7	-118,0	0,4	0,1	0,4
Rol + 0,10	1431,5	-235,9	0,7	0,2	0,8
Rol + 0,15	2147,2	-353,8	1,1	0,3	1,2
Arf + 0,01	-23,5	-143,0	0,0	0,0	0,0
Arf + 0,03	-70,6	-429,0	0,1	0,1	0,1
Arf + 0,05	-117,7	-715,1	0,2	0,1	0,2
Arf + 0,10	-235,4	-1430,1	0,4	0,2	0,5
Arf + 0,15	-353,1	-2145,2	0,6	0,4	0,7
Gui + 0,01	1,2	-2,8	1,5	1,6	2,2
Gui + 0,03	3,6	-8,4	4,5	4,7	6,5
Gui + 0,05	6,1	-14,0	7,6	7,8	10,9
Gui + 0,10	12,2	-27,9	15,1	15,6	21,7
Gui + 0,15	18,3	-41,8	22,7	23,4	32,6
R,A,G + 0,01	120,8	-169,4	1,5	1,6	2,2
R,A,G + 0,03	362,6	-508,1	4,6	4,7	6,6
R,A,G + 0,05	604,5	-846,7	7,6	7,9	10,9
R,A,G + 0,10	1209,7	-1692,9	15,2	15,8	21,9
R,A,G + 0,15	1815,8	-2538,6	22,8	23,7	32,9

(continua)

Tabela 6.3 - Continuação

CENA S1X2-11554[716]393

	ΔX	ΔY	RMSX	RMSY	RMSE
Rol + 0,01	143,8	-22,6	0,3	0,2	0,4
Rol + 0,03	431,3	-67,8	1,0	0,6	1,1
Rol + 0,05	718,9	-113,1	1,6	1,0	1,9
Rol + 0,10	1437,8	-226,1	3,1	1,9	3,7
Rol + 0,15	2156,8	-339,1	4,5	2,9	5,4
Arf + 0,01	-22,4	-143,7	0,0	0,0	0,0
Arf + 0,03	-67,2	-431,0	0,1	0,1	0,1
Arf + 0,05	-112,1	-718,3	0,2	0,1	0,2
Arf + 0,10	-224,2	-1436,6	0,3	0,2	0,4
Arf + 0,15	-336,3	-2154,9	0,5	0,4	0,6
Gui + 0,01	2,1	-2,5	1,5	1,6	2,2
Gui + 0,03	6,2	7,6	4,6	4,7	6,5
Gui + 0,05	10,3	12,6	7,6	7,8	10,9
Gui + 0,10	20,6	25,2	15,2	15,6	21,8
Gui + 0,15	30,9	37,8	22,8	23,3	32,6
R,A,G + 0,01	123,4	-163,8	1,6	1,5	2,2
R,A,G + 0,03	370,4	-491,2	4,7	4,6	6,6
R,A,G + 0,05	617,5	-818,5	7,9	7,7	11,0
R,A,G + 0,10	1235,8	-1636,5	15,8	15,4	22,0
R,A,G + 0,15	1854,8	-2454,0	23,6	23,1	33,1

(continua)

Tabela 6.3 - Continuação

CENA S1P1-10972[719]390

	ΔX	ΔY	RMSX	RMSY	RMSE
Rol + 0,01	148,9	-24,5	1,6	1,1	1,9
Rol + 0,03	466,6	-73,4	4,8	3,2	5,8
Rol + 0,05	744,3	-122,2	8,0	5,4	9,6
Rol + 0,10	1488,7	-244,5	15,8	10,8	19,2
Rol + 0,15	2233,1	-336,6	23,6	16,3	28,7
Arf + 0,01	-25,3	-143,5	0,1	0,0	0,1
Arf + 0,03	-75,9	-430,5	0,2	0,1	0,3
Arf + 0,05	-126,5	-717,6	0,3	0,2	0,4
Arf + 0,10	-252,8	-1435,2	0,7	0,5	0,8
Arf + 0,15	-379,0	-2152,8	1,0	0,7	1,2
Gui + 0,01	0,0	-26,1	1,6	1,6	2,2
Gui + 0,03	0,0	-78,2	4,7	4,7	6,6
Gui + 0,05	-0,1	-130,4	7,8	7,8	11,0
Gui + 0,10	-0,1	-260,7	15,6	15,6	22,1
Gui + 0,15	-0,2	-391,1	23,4	23,4	33,1
R,A,G + 0,01	123,6	-194,0	2,1	2,0	2,9
R,A,G + 0,03	370,8	-582,2	6,2	6,1	8,7
R,A,G + 0,05	618,2	-969,9	10,3	10,3	14,5
R,A,G + 0,10	1237,5	-1939,2	20,5	20,7	29,2
R,A,G + 0,15	1857,7	-2907,9	30,7	31,5	44,0

(continua)

Tabela 6.3 - Continuação

CENA S1P2-12221[722]396

	ΔX	ΔY	RMSX	RMSY	RMSE
Rol + 0,01	154,8	-27,6	2,9	1,9	3,5
Rol + 0,03	464,3	-82,9	8,7	5,8	10,4
Rol + 0,05	773,8	-138,1	14,4	9,7	17,3
Rol + 0,10	1547,7	-276,3	28,4	19,3	34,3
Rol + 0,15	2321,6	-414,3	42,0	29,0	51,1
Arf + 0,01	-23,0	-144,3	0,1	0,1	0,1
Arf + 0,03	-68,9	-433,4	0,3	0,3	0,4
Arf + 0,05	-114,9	-722,3	0,5	0,5	0,6
Arf + 0,10	-229,9	-1444,5	0,9	0,9	1,3
Arf + 0,15	-345,2	-2166,7	1,3	1,3	1,9
Gui + 0,01	10,5	36,1	1,6	1,6	2,3
Gui + 0,03	31,6	108,3	4,9	4,7	6,8
Gui + 0,05	52,6	180,4	8,2	7,8	11,3
Gui + 0,10	105,3	360,9	16,5	15,6	22,7
Gui + 0,15	157,9	541,4	24,7	23,4	34,0
R,A,G + 0,01	142,3	-136,0	3,5	2,2	4,2
R,A,G + 0,03	427,1	-407,9	10,5	6,7	12,5
R,A,G + 0,05	712,1	-679,7	17,4	11,3	20,7
R,A,G + 0,10	1424,9	-1358,9	34,5	23,0	41,4
R,A,G + 0,15	2138,5	-2037,4	51,3	34,9	62,1

(continua)

Tabela 6.3 - Continuação

CENA S1X1-11994[707]416

	ΔX	ΔY	RMSX	RMSY	RMSE
Rol + 0,01	168,4	-29,3	4,0	2,7	4,9
Rol + 0,03	505,2	-87,8	12,0	8,2	14,5
Rol + 0,05	841,9	-146,3	20,0	13,6	24,2
Rol + 0,10	1683,8	-292,4	39,6	27,5	48,2
Rol + 0,15	2525,6	-438,6	58,8	41,5	72,0
Arf + 0,01	-26,8	-145,2	0,1	0,1	0,1
Arf + 0,03	-80,2	-435,6	0,3	0,2	0,4
Arf + 0,05	-133,6	-726,0	0,4	0,4	0,6
Arf + 0,10	-266,9	-1452,0	0,9	0,8	1,2
Arf + 0,15	-400,0	-2178,0	1,3	1,2	1,8
Gui + 0,01	-8,1	-53,7	1,7	1,6	2,3
Gui + 0,03	-24,3	-161,1	5,2	4,7	7,0
Gui + 0,05	-40,5	-268,4	8,7	7,8	11,6
Gui + 0,10	-80,9	-536,9	17,4	15,5	23,3
Gui + 0,15	-121,2	-805,3	26,0	23,2	34,9
R,A,G + 0,01	133,6	-228,1	4,2	3,5	5,5
R,A,G + 0,03	400,9	-684,2	12,7	10,5	16,5
R,A,G + 0,05	668,4	-1140,2	21,1	17,7	27,5
R,A,G + 0,10	1338,3	-2279,5	41,9	36,3	55,4
R,A,G + 0,15	2009,7	-3418,0	62,5	55,8	83,8

(continua)

Tabela 6.3 - Conclusão

CENA SIX2-11980[712]385

	ΔX	ΔY	RMSX	RMSY	RMSE
Rol + 0,01	188,4	-28,1	6,9	4,4	8,2
Rol + 0,03	565,3	-84,3	20,5	13,2	14,4
Rol + 0,05	942,2	-140,5	34,0	22,0	40,5
Rol + 0,10	1884,7	-280,9	67,1	44,1	80,3
Rol + 0,15	2827,7	-421,3	99,2	66,3	119,3
Arf + 0,01	-19,7	-146,3	0,2	0,1	0,2
Arf + 0,03	-59,1	-438,9	0,5	0,4	0,6
Arf + 0,05	-98,5	-731,5	0,9	0,6	1,1
Arf + 0,10	-197,4	-1462,0	1,8	1,3	2,2
Arf + 0,15	-296,8	-2194,4	2,7	1,9	3,3
Gui + 0,01	11,4	72,1	1,9	1,5	2,5
Gui + 0,03	34,0	216,4	5,8	4,6	7,4
Gui + 0,05	56,7	360,7	9,7	7,6	12,3
Gui + 0,10	113,4	721,4	19,5	15,2	24,7
Gui + 0,15	169,9	1082,1	29,2	22,8	37,0
R,A,G + 0,01	180,1	-102,3	7,2	4,4	8,4
R,A,G + 0,03	540,5	-306,7	21,4	13,2	25,1
R,A,G + 0,05	901,1	-511,0	35,5	22,2	41,8
R,A,G + 0,10	1803,4	-1021,3	70,1	45,0	83,3
R,A,G + 0,15	2706,9	-1530,7	103,8	68,4	124,4

A Tabela 6.3 apresenta resultados interessantes, principalmente em relação à componente de rolamento da atitude.

A adição de um fator constante ao rolamento provoca um deslocamento da imagem, ao longo da direção média das varreduras. Isto pode ser comprovado, pois a razão entre os módulos dos deslocamentos nas direções Y e X permaneceu constante, independente do fator adicionado. Esta razão ficou bastante próxima da tangente do ângulo de orientação (α), tão mais próxima quanto mais próxima da vertical for a visada do satélite.

$$\alpha = \tan^{-1}(X/Y) \quad (6.61)$$

Além disso, a magnitude do deslocamento ($\Delta = (\Delta x^2 + \Delta y^2)^{1/2}$) se apresentou bem próxima do valor esperado, dado pela Figura 6.2.

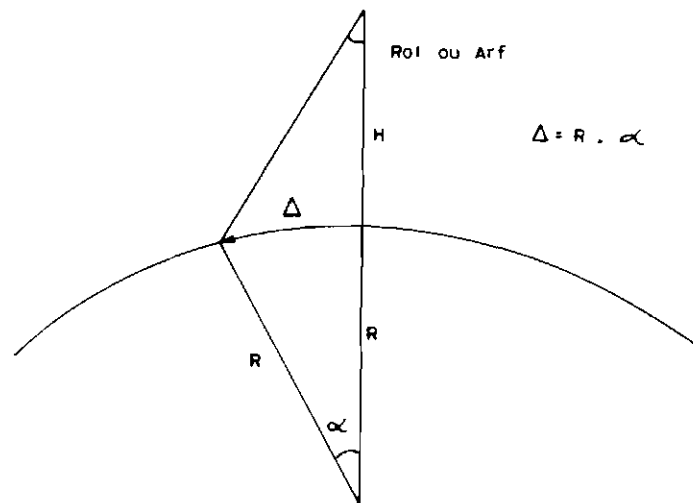


Fig. 6.2 - Magnitude do deslocamento provocado pelo rolamento, ou pela arfagem.

Os sinais das componentes Δx e Δy são coerentes, conforme mostra a Figura 6.3.

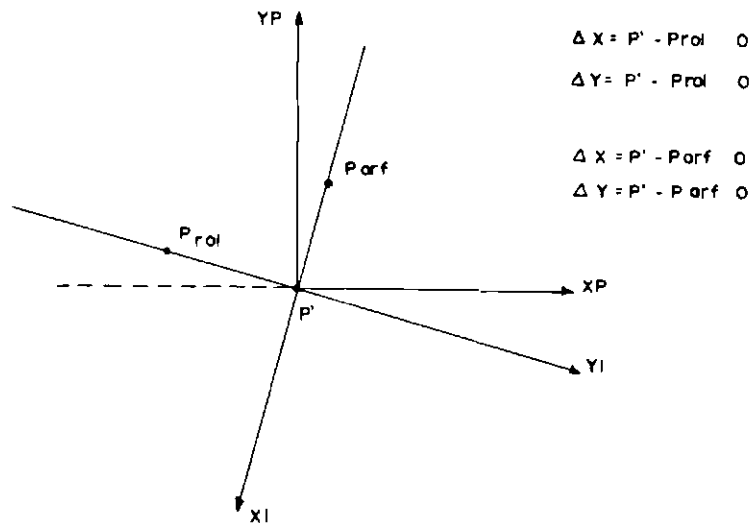


Fig. 6.3 - Deslocamento da imagem devido ao rolamento e à arfagem.

Já em relação à geometria interna existe uma forte ligação com o ângulo de inclinação do espelho. Assim, para imagens verticais, ou próximas da vertical, a não correção de um fator constante referente ao rolamento praticamente não provoca distorções internas, porém, à medida que a visada se afasta do nadir a geometria interna passa a sofrer alterações significativas, atingindo valores extremamente elevados, comprometendo a qualidade geométrica da imagem.

Quanto à arfagem, a adição de valores constantes provocou deslocamentos das imagens na direção normal à das varreduras. A razão entre os módulos das componentes nas direções X e Y permaneceu constante, independente do fator adicionado. A razão apresentou resultados bastante próximos à tangente do ângulo de orientação, entre os sistemas de projeção e da imagem. A magnitude dos deslocamentos ficou próxima ao valor esperado (Figura 6.2) e os sinais das componentes estiveram coerentes, conforme pode ser observado na Figura 6.3.

A não correção de um fator constante relativo à arfagem modifica muito pouco a geometria interna da imagem. O nível de

distorção aumenta em função do ângulo de visada, mas em níveis bastante baixos. Nestes exemplos, a distorção interna causada pela adição de um fator de $0,15^\circ$ variou de 0,7 a 3,3 metros, em torno de uma média de 1,6 metros.

A adição de valores constantes à guinada do satélite provoca distorções internas, cujas magnitudes independem do ângulo de visada. Para as imagens selecionadas a distorção interna variou entre 32,6 e 37,0 metros, para uma média de 34,0 metros.

Quando adicionou-se valores constantes a todas as componentes da atitude, o resultado assemelhou-se à composição das diversas aplicações isoladas.

O acompanhamento dos resultados para grades de dimensões ($N \times N$) variadas indicou que estes decresceram à medida que a grade se adensava (N crescia), convergindo para um valor constante, a partir de determinado valor de N . Essa convergência ocorreu mais rapidamente para as variáveis de menor magnitude.

6.3.2 - INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA ALTITUDE

A análise da influência da variação da altitude no processo de correção geométrica foi realizada impondo-se uma altitude constante para o satélite, ao longo dos intervalos de tempo referente à aquisição das diversas imagens.

Inicialmente converteu-se as coordenadas retangulares espaciais do satélite (X_S, Y_S, Z_S), obtidas das efemérides, em coordenadas geodésicas (ϕ, λ, H). A componente H , relativa à altitude do satélite, foi substituída pela altitude média (H_m) para cada imagem. Num último passo converteu-se as coordenadas geodésicas (ϕ, λ, H_m) para coordenadas no SGG, recompondo o arquivo de dados de efemérides.

Comparou-se, então, os resultados provenientes deste modelo, com os resultados provenientes do modelo matemático completo,

procurando-se ajustá-los através da transformação de corpo rígido. Os resultados encontrados estão resumidos na Tabela 6.4.

TABELA 6.4

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA ALTITUDE SOBRE O MODELO FOTOGRAMÉTRICO
(EM METROS)

	cena 1	cena 2	cena 3	cena 4	cena 5	cena 6
RMSX	1,0	1,6	4,8	8,5	13,5	17,4
RMSY	0,5	1,1	4,3	7,9	11,6	12,9
RMSE	1,1	1,9	6,4	11,7	17,8	21,7

Da Tabela 6.4 é fácil concluir que a distorção provocada pela variação de altitude do satélite cresce na razão direta da inclinação da tomada de vista do satélite. Este fato pode ser matematicamente comprovado, e a Figura 6.4 ilustra bem a situação.

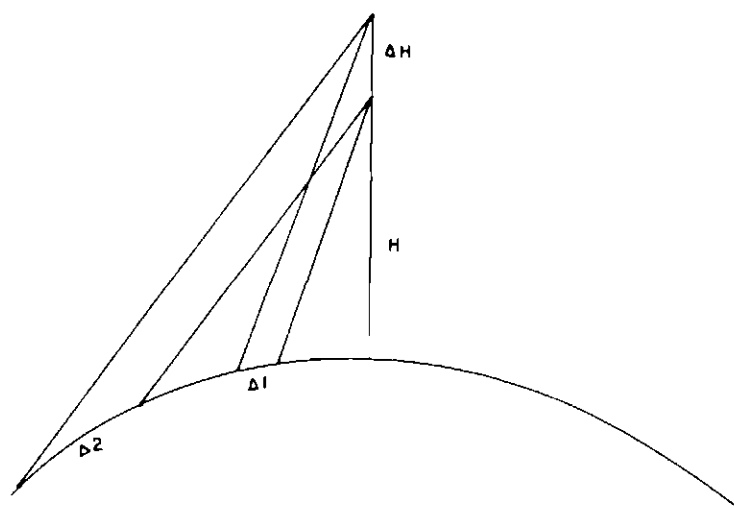


Fig. 6.4 - Correlação entre a variação da altitude e a inclinação da visada.

A maior concentração desta distorção está localizada no eixo referente à direção média das varreduras. A aplicação da transformação de corpo rígido novamente mascara o resultado encontrado. No entanto, comparando-se diretamente os dois conjuntos de coordenadas (X,Y) e (X',Y') , os resíduos ($r_x = X' - X$ e $r_y = Y' - Y$) demonstram claramente esta concentração. A razão entre os resíduos em Y e em X se aproxima da tangente do ângulo de orientação.

Para a variação da altitude, alterações nas dimensões da grade amostral implicaram num decréscimo dos valores referentes às distorções, até ser alcançado um ponto de equilíbrio. De forma semelhante à adição de fatores constantes à atitude, esse equilíbrio foi mais rapidamente alcançado para as distorções que apresentaram menor magnitude.

6.3.3 - INFLUÊNCIA DA ESFERICIDADE DA TERRA

Neste caso, o modelo fotogramétrico foi aplicado sobre o elipsóide (coordenadas X',Y') e sobre um plano tangente ao elipsóide (coordenadas X,Y), no ponto referente ao centro da imagem bruta. Em seguida os dois conjuntos foram ajustados, através da transformação de corpo rígido. Na Tabela 6.5 podem ser observados os resultados encontrados.

TABELA 6.5

INFLUÊNCIA DA ESFERICIDADE DA TERRA SOBRE O MODELO FOTOGRAMÉTRICO
(EM METROS)

	cena 1	cena 2	cena 3	cena 4	cena 5	cena 6
RMSX	1,2	5,4	10,7	10,7	21,9	29,4
RMSY	1,5	7,4	12,4	4,2	19,0	13,4
RMSE	2,0	9,2	16,4	11,5	29,1	32,3

Novamente a magnitude da distorção está diretamente associada ao ângulo de inclinação do espelho. A Figura 6.5 facilita a compreensão deste fato.

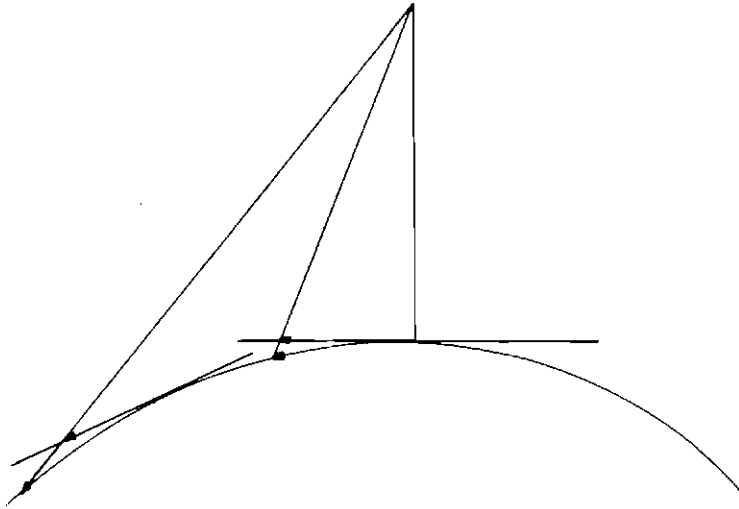


Fig. 6.5 - Correlação entre a esfericidade da Terra e a inclinação da visada.

A cena 4 (S1P2-12221[722]396) apresentou um comportamento anômalo, que fugiu à regra geral. Mas isto não chega a comprometer o fato de que a magnitude da distorção associada à esfericidade da Terra cresce na razão direta do crescimento da inclinação do espelho.

Assim como as anteriores, a distorção devido à esfericidade da Terra deveria apresentar maior influência na direção média das varreduras, porém, mais uma vez a transformação de corpo rígido deturpa os resultados.

O comportamento em relação ao aumento nas dimensões da grade é idêntico ao das distorções anteriormente apresentadas: as distorções diminuem, com o adensamento da grade, até encontrarem um ponto de equilíbrio, num processo cuja rapidez está inversamente associada à magnitude das distorções.

6.3.4 - INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO DA TERRA

Para o estudo da influência da rotação da Terra sobre o modelo fotogramétrico, utilizou-se os dados de efemérides referenciados ao SGG (Coordenadas X', Y') e, posteriormente, os dados de efemérides foram referenciados a um Sistema Geocêntrico Inercial (Coordenadas X, Y). O resultado do ajustamento entre os dois conjuntos de coordenadas está resumido na Tabela 6.6.

TABELA 6.6

INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO DA TERRA SOBRE O MODELO FOTOGRAFÉTICO
(EM METROS)

	cena 1	cena 2	cena 3	cena 4	cena 5	cena 6
RMSX	625,8	626,9	651,9	657,6	646,6	773,9
RMSY	606,7	582,1	587,7	565,4	522,1	560,0
RMSE	891,2	855,5	877,7	867,2	831,1	955,3

Da Tabela 6.6 conclui-se que a inclinação do espelho não influencia a magnitude da distorção provocada pela não correção da rotação da Terra. Para os exemplos estudados, a distorção variou de 831,1 (cena S1X1-11994[707]416, com ângulo de inclinação de $-19,2^\circ$) a 955,3 metros (cena S1X2-11980[712]385, com ângulo de inclinação de 27°). A média dos resultados foi de 879,7 metros.

Uma observação apressada nos resultados pode causar estranheza, pelo equilíbrio apresentado entre a magnitude das distorções em X e Y, quando é sabido que esta fonte de distorção atua na direção média das varreduras.

Porém, observando a ordem de grandeza dos ângulos de rotação das transformações polinomiais, nota-se a disparidade entre o ângulo de rotação para este caso e os demais.

Nos casos anteriores, os ângulos de rotação variaram entre 4.10^{-5} e 3.10^{-3}° . Já para a distorção da rotação, os ângulos de rotação variaram entre $1,35^\circ$ e $1,91^\circ$, em torno de uma média de $1,65^\circ$ (cena 1: $1,91^\circ$; cena 2: $1,82^\circ$; cena 3: $1,78^\circ$, cena 4: $1,65^\circ$; cena 5: $1,39^\circ$ e cena 6: $1,35^\circ$). Observando a Figura 6.6, é possível compreender os resultados da Tabela 6.6.

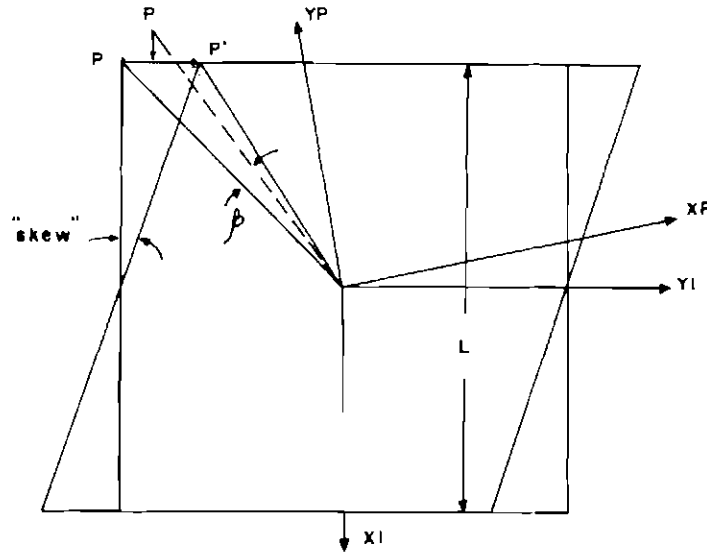


Fig. 6.6 - Vetor deslocamento devido à não correção do efeito da rotação da Terra.

Antes da transformação de corpo rígido, a discrepância entre a posição calculada com as efemérides referidas ao SGG (P') e a posição calculada com as efemérides referidas a um Sistema Geocêntrico Inercial (P') era dado por:

$$\Delta X = 0 \quad (6.62)$$

$$\Delta Y = L / 2 \cdot \tan (\text{skew}) \quad (6.63)$$

Posteriormente, com a transformação de corpo rígido, a diferença entre as duas posições passou a ser de:

$$\Delta X = L / 2 \cdot 2^{1/2} \cdot (\text{sen}(45^\circ + \beta) - \text{sen}45^\circ) \quad (6.64)$$

$$\Delta Y = L/2 \cdot \tan(\text{skew}) - L/2 \cdot 2^{1/2} \cdot (\cos 45^\circ - \cos(45^\circ + \beta)) \quad (6.65)$$

Exemplificando para $L = 60$ km, "skew" = 4° e $\beta = 1,65^\circ$, tem-se, para cada caso, os seguintes resultados:

- Antes da transformação de corpo rígido:

$$\Delta X = 0$$

$$\Delta Y = 2.097,8 \text{ metros}$$

$$\Delta E = 2.097,8 \text{ metros}$$

- Depois da transformação de corpo rígido:

$$\Delta X = 851,4 \text{ metros}$$

$$\Delta Y = 1.221,6 \text{ metros}$$

$$\Delta E = 1.489,0 \text{ metros}$$

Ou seja, comparando-se diretamente os dois conjuntos de coordenadas, os resíduos deveriam indicar uma concentração residual sobre a direção média das varreduras, porém, apresentariam também um erro global maior. Na prática isto foi realmente comprovado.

Pode-se notar que o ângulo de rotação da transformação de corpo rígido diminuiu na razão direta do crescimento do ângulo de inclinação do espelho. Na medida que o ângulo de rotação diminui, aumenta a diferença entre os resíduos em X e em Y (Figura 6.6).

Em relação à dimensão N da grade amostral, ocorreu o mesmo que já ocorrera antes. As distorções diminuíram com o aumento do universo amostral, até convergirem para um valor constante.

6.4 - A DISTORÇÃO PROVOCADA PELO MAPEAMENTO INVERSO

Uma das fontes de distorção no processo de correção geométrica está vinculada à metodologia empregada no processo de mapeamento inverso.

Na etapa inicial da correção geométrica, denominada mapeamento direto, pode-se estabelecer um modelo matemático, fundamentado em conceitos físicos, que relacione um ponto na imagem bruta, através das coordenadas de imagem (L,C), com um ponto sobre a superfície de referência para a Terra, através de suas coordenadas retangulares espaciais (X,Y,Z). Posteriormente estas coordenadas são transformadas em coordenadas planas, em um determinado Sistema de Projeção e, então, discretizadas em coordenadas de imagem corrigida (I,J). Nesta fase existem diversas fontes de distorções associadas ao modelo, que foram analisadas no Capítulo 3 e avaliadas neste capítulo.

Na etapa referente ao mapeamento inverso não é possível estabelecer um modelo físico que, partindo das coordenadas de imagem corrigida (I,J) encontrem o par (L,C) correspondente na imagem bruta. Dessa forma, são utilizados modelos matemáticos que, a partir de um universo amostral referente ao mapeamento direto, crie um universo amostral para o mapeamento inverso.

Os dois modelos apresentados no Capítulo 4 foram o método polinomial e o método da transformação projetiva por partes. Inerentes aos dois métodos existe uma distorção associada que vai contribuir para aumentar a degradação geométrica da imagem. Esta distorção está exemplificada nas Equações 6.66 a 6.69.

$$(I, J) = g(L, C) \quad (6.66)$$

$$(L', C') = g^{-1}(I, J) \quad (6.67)$$

onde g e g' representam, respectivamente, as funções referentes ao mapeamento direto e inverso. A distorção é dada por:

$$\Delta L = L' - L \quad (6.68)$$

$$\Delta C = C' - C \quad (6.69)$$

Ao se definir por um modelo para a fase do mapeamento inverso, deve-se procurar otimizar a relação entre a degradação adicional que o modelo provoca e o tempo de processamento a ele associado.

Para as seis imagens selecionadas, foram analisados seis modelos para o mapeamento inverso: o da transformação projetiva e as transformações polinomiais do primeiro ao quinto grau. Para cada caso procurou-se observar a relação entre a precisão alcançada pelo modelo frente ao tempo de processamento requerido, relacionando-se, ainda, estas variáveis às dimensões da grade amostral. O tempo de processamento foi observado num computador VAX 11/780, fabricado pela DIGITAL EQUIPMENT Co., sem nenhum outro processamento em paralelo.

Para avaliação do desempenho dos modelos relativos ao mapeamento inverso, aplicou-se, inicialmente, o modelo fotogramétrico aos nós de uma grade amostral de $N \times N$ pontos, regularmente espaçados ($N \in \{3, 5, 9, 13, 21, 31, 51, 61, 101, 121\}$). Em seguida, para uma grade amostral de $(2.N-1 \times 2.N-1)$ pontos (excluindo-se àqueles utilizados no mapeamento direto), comparou-se os resultados advindos do mapeamento inverso com os resultantes do modelo fotogramétrico. Os resultados encontrados estão resumidos na Tabela 6.7.

TABELA 6.7

DISTORÇÃO INERENTE AO MAPEAMENTO INVERSO

(ERRO EM METROS - TEMPO EM SEGUNDOS)

CENA S1X1-11909[705]377

N		PROJ	POL 1	POL 2	POL 3	POL 4	POL 5
3	Erro	6,1	4,4	3,8	-	-	-
	Tempo de CPU	1	1	1	-	-	-
5	Erro	7,6	7,6	6,9	6,9	9,5	40,6
	Tempo de CPU	3	1	1	1	1	2
9	Erro	5,8	7,2	6,9	6,8	7,1	6,3
	Tempo de CPU	8	2	2	3	3	4
13	Erro	20,9	19,9	20,5	21,6	21,9	23,5
	Tempo de CPU	14	4	4	5	6	8
21	Erro	20,3	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4
	Tempo de CPU	34	8	9	11	15	20
31	Erro	14,1	16,7	16,6	16,5	16,5	16,5
	Tempo de CPU	71	17	19	23	31	43
51	Erro	9,6	14,9	15,0	14,9	14,7	14,5
	Tempo de CPU	181	45	49	58	80	113
61	Erro	9,2	14,8	16,1	15,9	15,7	15,4
	Tempo de CPU	255	63	70	83	114	160
101	Erro	5,3	15,3	15,8	15,6	15,5	15,1
	Tempo de CPU	684	168	188	222	305	433
121	Erro	2,4	15,5	15,9	15,7	15,4	15,0
	Tempo de CPU	982	241	269	318	437	621

(continua)

Tabela 6.7 - Continuação

CENA S1X2-11554[716]393

N		PROJ	POL 1	POL 2	POL 3	POL 4	POL 5
3	Erro	9,9	17,4	6,5	-	-	-
	Tempo de CPU	1	1	1	-	-	-
5	Erro	23,2	29,6	24,0	23,3	24,3	20,7
	Tempo de CPU	3	1	1	1	1	2
9	Erro	17,9	25,5	22,0	20,0	22,4	22,1
	Tempo de CPU	9	2	3	3	3	5
13	Erro	16,1	24,7	18,5	17,1	16,6	17,2
	Tempo de CPU	15	4	4	5	6	9
21	Erro	22,9	32,6	28,9	27,0	26,3	26,3
	Tempo de CPU	38	9	9	12	15	21
31	Erro	23,7	29,6	26,2	25,3	25,5	25,4
	Tempo de CPU	77	17	19	25	31	44
51	Erro	17,7	25,4	24,7	23,7	23,5	23,3
	Tempo de CPU	198	46	49	63	82	114
61	Erro	15,5	25,2	24,3	22,9	22,7	22,6
	Tempo de CPU	278	66	70	90	122	162
101	Erro	9,4	26,3	24,5	22,7	23,7	23,5
	Tempo de CPU	723	169	180	232	314	443
121	Erro	5,5	26,0	24,3	22,6	23,4	23,1
	Tempo de CPU	1042	241	257	330	447	631

(continua)

Tabela 6.7 - Continuação

CENA S1P1-10972[719]390

N		PROJ	POL 1	POL 2	POL 3	POL 4	POL 5
3	Erro	28,0	76,7	8,3	-	-	-
	Tempo de CPU	1	1	1	-	-	-
5	Erro	15,6	73,1	15,1	13,3	13,7	8,1
	Tempo de CPU	3	1	1	1	1	2
9	Erro	31,1	76,1	30,4	30,6	29,6	30,1
	Tempo de CPU	8	2	2	3	3	4
13	Erro	10,8	68,7	11,1	10,3	10,0	11,4
	Tempo de CPU	14	4	4	5	6	8
21	Erro	32,2	74,1	32,7	32,1	31,5	31,5
	Tempo de CPU	34	8	9	11	15	21
31	Erro	20,9	70,2	23,7	23,6	23,1	23,9
	Tempo de CPU	70	17	18	23	31	44
51	Erro	16,4	70,7	25,1	24,8	23,4	23,8
	Tempo de CPU	181	46	48	58	79	116
61	Erro	13,5	71,5	26,3	25,0	24,0	24,0
	Tempo de CPU	256	65	69	83	113	167
101	Erro	7,2	70,6	25,8	24,9	23,8	23,6
	Tempo de CPU	688	173	185	223	303	456
121	Erro	4,6	70,5	25,6	24,9	23,6	23,4
	Tempo de CPU	983	238	254	307	438	629

(continua)

Tabela 6.7 - Continuação

CENA S1P2-12221[722]396

N		PROJ	POL 1	POL 2	POL 3	POL 4	POL 5
3	Erro	49,0	138,6	7,2	-	-	-
	Tempo de CPU	1	1	1	-	-	-
5	Erro	18,5	132,0	14,8	11,8	11,4	9,1
	Tempo de CPU	3	1	1	1	1	2
9	Erro	7,8	126,2	13,4	10,5	9,3	9,2
	Tempo de CPU	8	2	2	3	3	5
13	Erro	6,5	123,7	11,4	9,5	8,6	8,6
	Tempo de CPU	16	4	4	5	6	9
21	Erro	4,5	121,7	12,3	9,5	8,4	8,2
	Tempo de CPU	36	9	10	12	16	21
31	Erro	4,9	120,6	12,6	9,6	8,4	8,3
	Tempo de CPU	74	17	20	24	31	44
51	Erro	3,0	114,4	12,4	9,4	8,2	8,1
	Tempo de CPU	189	46	49	63	81	114
61	Erro	2,0	117,1	12,5	9,2	8,1	8,0
	Tempo de CPU	262	66	70	90	114	162
101	Erro	1,3	116,8	12,6	9,0	8,2	8,1
	Tempo de CPU	699	177	189	243	308	443
121	Erro	1,0	116,5	12,5	9,0	8,2	8,1
	Tempo de CPU	1013	256	273	333	445	640

(continua)

Tabela 6.7 - Continuação

CENA SIX1-11994[707]416

N		PROJ	POL 1	POL 2	POL 3	POL 4	POL 5
3	Erro	68,6	193,6	11,9	-	-	-
	Tempo de CPU	1	1	1	-	-	-
5	Erro	20,3	182,9	9,1	9,3	8,6	10,5
	Tempo de CPU	3	1	1	1	1	2
9	Erro	9,4	175,3	10,6	10,0	9,2	9,5
	Tempo de CPU	8	2	2	3	3	4
13	Erro	7,0	171,8	10,2	9,6	8,8	8,8
	Tempo de CPU	15	4	4	5	7	8
21	Erro	4,6	168,8	10,1	9,9	8,5	8,4
	Tempo de CPU	35	9	10	11	15	20
31	Erro	4,6	167,3	10,7	10,3	9,0	8,7
	Tempo de CPU	74	18	20	24	31	43
51	Erro	3,0	165,2	10,5	10,2	8,7	8,4
	Tempo de CPU	190	47	50	61	83	113
61	Erro	2,4	164,0	10,6	10,2	8,7	8,5
	Tempo de CPU	268	67	71	86	115	162
101	Erro	1,2	162,8	10,5	10,2	8,7	8,4
	Tempo de CPU	719	180	191	233	311	441
121	Erro	1,0	162,5	10,5	10,2	8,7	8,4
	Tempo de CPU	1020	255	271	331	442	627

(continua)

Tabela 6.7 - Conclusão

CENA S1X2-11980[712]385

N		PROJ	POL 1	POL 2	POL 3	POL 4	POL 5
3	Erro	118,1	331,9	12,9	-	-	-
	Tempo de CPU	1	1	1	-	-	-
5	Erro	34,2	313,2	18,4	17,3	22,3	25,6
	Tempo de CPU	3	1	1	1	1	2
9	Erro	33,4	302,0	29,9	30,5	30,3	32,8
	Tempo de CPU	8	2	2	3	3	5
13	Erro	32,7	295,9	30,1	30,4	31,1	31,9
	Tempo de CPU	14	4	4	5	6	9
21	Erro	27,5	291,2	32,5	32,0	32,4	32,8
	Tempo de CPU	34	9	10	11	15	21
31	Erro	24,4	288,2	30,0	29,9	29,8	29,8
	Tempo de CPU	71	17	19	23	31	46
51	Erro	15,9	283,9	27,6	27,1	26,9	26,9
	Tempo de CPU	182	47	49	60	79	117
61	Erro	13,2	280,4	28,2	27,1	26,8	26,8
	Tempo de CPU	257	65	69	84	114	163
101	Erro	5,7	279,5	27,8	27,2	27,3	27,2
	Tempo de CPU	689	174	185	226	307	438
121	Erro	4,5	278,8	27,5	27,2	27,3	27,2
	Tempo de CPU	986	254	270	331	449	641

Em relação à transformação projetiva, é fácil observar que quanto mais densa for a grade, mais preciso é o mapeamento inverso. Confrontando os resultados deste método com os resultados dos métodos polinomiais, conclui-se ser o método de transformação projetiva o que apresentou melhores resultados.

Em contrapartida, este método é o de maior custo computacional. Comparativamente ele é, aproximadamente 4 vezes mais lento que os métodos polinomiais de primeiro e segundo graus; 3 vezes mais lento que o de terceiro grau; 2,5 vezes mais lento que o de quarto grau e 1,5 vezes mais lento que o de quinto grau.

A transformação projetiva, por outro lado, é o único método que tem agregado a si uma distorção geométrica inferior à resolução espacial do sensor HRV-SPOT, tanto no modo multiespectral, quanto no modo pancromático.

Para os exemplos estudados, a transformação projetiva apresentou uma distorção variando de 1,0 a 5,5 metros, para um valor médio de 3,2 metros. O tempo médio de CPU requerido foi de 1004 segundos (16 min e 44 seg). Não se notou nenhuma relação entre a inclinação do espelho e os resultados encontrados.

A transformação polinomial de primeiro grau foi a que teve o pior desempenho, apresentando resultados dispares que variaram entre 15,5 e 278,8 metros, em torno de uma média de 111,6 metros. A degradação geométrica aumentou com a inclinação do espelho, quando o intervalo das grades é maior e a linearidade da grade amostral é mais difícil de ser alcançada. Os valores encontrados para os vários tamanhos de grade amostral demonstram que a partir de $N = 51$ praticamente não há alterações nos resultados. No entanto, a grade 51×51 representa uma economia de tempo da ordem de 80% em relação à grade 121×121 . Ou seja, se os resultados encontrados para a transformação polinomial de primeiro grau fossem satisfatórios, dever-se-ia trabalhar com uma grade amostral de 51×51 pontos de referência.

Para as demais transformações polinomiais, tem-se a seguinte situação: as transformações de segundo e terceiro graus apresentaram resultados muito próximos, bem como as transformações de quarto e quinto graus. Além disso, a diferença entre as duas primeiras e as duas últimas é da ordem de sub-"pixel" (menor que dois metros).

Os valores mínimo, máximo e médio destas transformações são, respectivamente, os seguintes:

- segundo grau: 10,5; 27,5 e 19,4 metros
- terceiro grau: 9,0; 27,2 e 18,3 metros
- quarto grau: 8,2; 27,2 e 17,8 metros
- quinto grau: 8,1; 27,3 e 17,6 metros

Outro fato importante para estas transformações é que a partir de $N=61$ os resultados encontrados são praticamente invariantes, o que representa uma economia da ordem de 75% em relação ao custo computacional da grade de 121×121 pontos de referência. Para a grade de 61×61 pontos, encontrou-se os seguintes valores mínimo, máximo e médio, para os resultados:

- segundo grau: 10,6; 28,2 e 19,7 metros
- terceiro grau: 9,2; 27,1 e 18,4 metros
- quarto grau: 8,1; 26,8 e 17,7 metros
- quinto grau: 8,0; 26,8 e 17,6 metros

Para escolha do grau do polinômio a ser adotado é importante comparar o custo computacional de cada método, tomando-se como base o tempo médio de CPU requerido para a transformação polinomial de segundo grau. A transformação polinomial de terceiro grau é, em média, 1,2 vezes mais lenta, a de quarto grau 1,7 vezes mais lenta e a de quinto grau 2,5 vezes mais lenta.

Levando-se em consideração os valores de precisão encontrados, frente às necessidades de CPU, para as transformações polinomiais, a escolha recai entre a transformação de segundo grau para uma grade de 61×61 pontos (distorção média de 19,7 metros e tempo de CPU de 68 segundos) ou a transformação de quarto grau para uma grade de 61×61 pontos (distorção média de 17,7 metros e tempo de CPU de 113 segundos).

Para obter estes níveis de precisão, pode-se optar pela transformação projetiva por partes para uma grade de 31x31 pontos de referência (distorção média de 15,4 metros e tempo de CPU de 66 segundos) ou até mesmo a transformação projetiva para uma grade de 21x21 pontos (distorção média de 18,7 metros e tempo de CPU de 30 segundos).

A conclusão a que se chega é que a transformação projetiva por partes é a mais eficiente para modelar o mapeamento inverso. Quanto mais densa for a grade, melhores os resultados alcançados, porém maior é o custo computacional. A inclinação do espelho não influencia o resultado.

A transformação polinomial de primeiro grau não satisfaz as necessidades do sistema, principalmente para imagens em visada oblíqua.

Para as transformações polinomiais de segundo a quinto graus não há necessidade de adensar a grade além de 61x61 pontos de referência. Estas transformações não sofrem influência da inclinação do espelho.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

O processo de correção geométrica aparece como uma ferramenta fundamental para diversas aplicações com imagens provenientes de sensores remotos orbitais. As imagens sem correção geométrica somente podem ser utilizadas em análises qualitativas, tais como: classificação, segmentação, interpretação visual etc.

No entanto, em diversas ocasiões o usuário da imagem de satélite deseja extrair informações quantitativas, tais como área, perímetro ou comprimento de determinadas entidades geográficas. Nesta hora a correção geométrica é imprescindível para que os resultados obtidos das imagens sejam confiáveis. Para aplicações cartográficas, então, é extremamente necessária a fase relativa à correção geométrica, de modo a permitir a utilização da imagem como base para documentos cartográficos.

A literatura apresenta, basicamente, três famílias de modelos de correção geométrica, onde se destaca o modelo fotogramétrico baseado nas equações de colinearidade. Este modelo é o único que apresenta um conceito físico, ao mesmo tempo em que corrige globalmente todas as distorções inerentes ao sistema de formação de imagens.

O modelo fotogramétrico responde pela fase da correção geométrica denominada mapeamento direto, onde a imagem bruta é mapeada na imagem corrigida.

No processo inverso (mapeamento da imagem corrigida na imagem bruta) deve ser escolhido um modelo que preserve ao máximo a qualidade geométrica do modelo fotogramétrico. Usualmente emprega-se métodos polinomiais para esta fase. Este trabalho demonstrou que agregado aos métodos polinomiais existem distorções geométricas da

ordem de um "pixel". Como alternativa, foi analisado o método da transformação projetiva por partes.

Este método mostrou ser mais eficiente, apresentando, em média, um erro inferior a 0,5 "pixels". Além disso, o método da transformação projetiva por partes demonstrou ser extremamente flexível, pois é possível alterar a relação precisão x custo computacional, dentro das necessidades do Centro de Processamento de Imagens. Ainda assim, ele manteria um desempenho superior ao método polinomial.

Para verificação da qualidade do modelo de correção empregado é necessário estabelecer critérios de avaliação geométrica. Esta avaliação pode ser executada sobre modelos ou sobre as imagens corrigidas. O ponto crítico desta fase é obter pontos de controle bem distribuídos na imagem, e com boa qualidade (bem identificados e localizados). Não é fácil separar os bons pontos de controle dos pontos de controle ruins.

Os critérios de avaliação geométrica apresentados no trabalho (método polinomial e da SPOTIMAGE) apresentaram uma forte correlação. O método polinomial tem a vantagem de estimar o erro residual de rotação.

Na prática, o autor já adotou, com sucesso, o modelo fotogramétrico no sistema de geração de imagens digitais MSS-LANDSAT geometricamente corrigidas, no sistema de navegação das imagens do sensor AVHRR ("Advanced Very High Resolution Radiometer") dos satélites da série TIROS/NOAA e no sistema de processamento de imagens HRV-SPOT (nível 1B).

Atualmente encontra-se em desenvolvimento os subsistemas de processamento de imagens HRV-SPOT nos níveis 2A, 2B e 3.

O autor desenvolveu sistemas de avaliação geométrica de imagens de satélite para estudo da qualidade geométrica destas

imagens, sempre baseado no modelo polinomial. Por necessidade, está sendo desenvolvido um sistema que possibilite avaliar a geometria das imagens pelos padrões estabelecidos pela SPOTIMAGE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNAUD, M.; LEROY, M. The new generation SPOT satellites SPOT 4 and 5. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 16., Kyoto, Japan, 1-10 Jul. 1988. *Proceedings*. Kyoto, ISPRS, 1988, v. 27, part B10, p. 113-123.
- BÄHR, H.P. Geometrical analysis and rectification of LANDSAT-MSS imagery: comparison of different methods. Symposium of Commission III of the ISPRS, Moscow, USSR, 1978.
- BAUDOIN, A. Premier bilan des traitements et de l'utilisation des images SPOT par l'Institut Géographique National. In: SPOT 1 - PREMIERS RÉSULTATS EN VOL, Toulouse, France, 1986. *Proceedings*. Toulouse, SOPTIMAGE, 1986, p. 41-47.
- BEGNY, G.; HENRY, P. The SPOT1 image quality: two years of experience. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 16., Kyoto, Japan, 1-10 Jul. 1988. *Proceedings*. Kyoto, ISPRS, 1988, v. 27, part B10, p. 103-112.
- BOBO, F. *Formation CRIS, corrections géométriques*. Toulouse, France, SPOTIMAGE, 1983.
- BOISSIN, B.; GARDELLE, J.P. Intrinsic and extrinsic geometric quality. In: SPOT 1 - PREMIERS RÉSULTATS EN VOL, Toulouse, France, 1986. *Proceedings*. Toulouse, SPOTIMAGE, 1986, p. 83-89.
- BRACHET, G. SPOT: a new generation of land remote sensing satellites. Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 15., Rio de Janeiro, Brazil, 17-29 Jun. 1984.
- CARON, R.H.; SIMON, K.W. Attitude time-series estimator for rectification of spaceborne imagery. *Journal of Spacecraft*, 12(1), Jan. 1975.

COURTOIS, M. La nouvelle génération des satellites SPOT. In: SPOT 1 - PREMIERS RÉSULTATS EN VOL, Toulouse, France, 1986. *Proceedings*. Toulouse, SPOTIMAGE, 1986, p. 287-291.

COURTOIS, M.; TRAISET, M. The SPOT satellites: from SPOT 1 to SPOT 4. *Geocarto International*, (3):4-14, Oct-Dec, 1986.

D'ALGE, J.C.L. Qualidade geométrica de imagens TM do LANDSAT-5. Congresso Brasileiro de Cartografia, 13., Brasília, DF, 20-24 jul. 1987.

D'ALGE, J.C.L.; BEZERRA, P.C.R. ; MEDEIROS, V.M. Geometric system correction with orbit determination as an option to produce TM-LANDSAT image-maps without control points. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 16., Kyoto, Japan, 1-10 Jul. 1988. *Proceedings*. Kyoto, ISPRS, 1988, v. 27, part B10, p. 353-368.

DENIS, P.; GIGORD, P.; GAUJAC, A. C.; RODRIGUEZ, V. Evaluation des possibilités stéréoscopiques de SPOT pour la Cartographie. In: SPOT 1 - PREMIERS RÉSULTATS EN VOL, Toulouse, France, 1986. *Proceedings*. Toulouse, SPOTIMAGE, 1986, p. 103-108.

GORDON, G. D. Spacecraft Technology. In: _____ CLARKSBURG, MD, Communications satellite corporation, 1981, cap. 2.

GUICHARD, H. Étude théorique de la précision dans l'exploitation cartographique d'un satellite a défilement. Application a SPOT. *Bul. S.F.P.T.* 90(2), 1983.

_____ *Rectification geometrique et restitution photogrammetrique des images SPOT*. Toulouse, France, SPOTIMAGE, 1983.

_____ Utilization photogrammetrique et cartographique de SPOT.
Semaines Internationales de Photogrammétrie, Stuttgart, R.F.A.,
Sep. 1983.

MEIRA FILHO, L.G. *Projeções espaciais, imagens LANDSAT*. São José dos
Campos, Instituto de Pesquisas Espaciais, 1975.

MERCHANT, D.C. *Analytical photogrammetry: theory and practice*. Ohio
Dept. of Geodetic Science, The Ohio State University, 1979.

MIKHAIL, E.M.; PADERES JR., F.C. Simulation aspects in the study of
rectification of satellite scanner data. In: NASA SYMPOSIUM OF
MATHEMATICAL PATTERN RECOGNITION AND IMAGE ANALYSIS, Houston, 1983.
Proceedings. Houston, NASA, 1983, p. 415-483.

PRADINES, D. La superposabilité des images SPOT. In: SPOT 1 -
PREMIERS RÉSULTATS EN VOL, Toulouse, France, 1986. *Proceedings*.
Toulouse, SPOTIMAGE, 1986, p. 93-99.

ROSSO, R. Qualité Géométrique des Images des Capteurs à Balayage.
In: *CNES/IGN Cartographie spatiale de la Terre, cours de
technologie spatiale*, Paris, CNES/IGN, 1979. p. 81-107.

SAWADA, N.; KIDODE, M.; SHINODA, H.; ASADA, H.; IWANAGA, M.; WATANABE,
S.; MORI, K.I.; AKIYAMA, M. An analytic correction method for
satellite MSS geometric distortions. *Photogrametric Engineering
and Remote Sensing*, 47(8):1195-1203, Aug. 1981.

SERRA, P.R.M. Geração de imagens TM-LANDSAT em fitas compatíveis com
computador geometricamente corrigidas. Congresso Brasileiro de
Cartografia, 13., Brasília, DF, 20-24 jul. 1987.

SPOTIMAGE. *Image quality assessment conclusion of SPOT-1 in flight
commissioning*. Toulouse, France, 1986.

_____ *SPOT to ground station interface document.* Toulouse, France,
1987.

BIBLIOGRAFIA

- BAUDOIN, A. La géométrie d'un enregistrement à balayage. In: *CNES/IGN Cartographie spatiale de la Terre, cours de technologie spatiale*, Paris, CNES/IGN, 1979. p. 315-356.
- BERNSTEIN, R. Digital image processing of earth observation sensor data. *IBM Journal of Research and Development*, 20(1):40-57, Jan 1976.
- BEYER, E.P. An overview on the thematic mapper geometric correction system. In: *LANDSAT-4 SCIENCE CHARACTERIZATION EARLY RESULTS SYMPOSIUM*. Greenbelt, MD, Feb. 1983. *Proceedings*. Greenbelt, NASA, 1983, v. 2, part 1, p. 87-145.
- Thematic mapper geometric correction processing. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 17., Ann Arbor, U.S.A., 9-13 May 1983. *Proceedings*. Ann Arbor, ERIM, 1983, v. 1, p. 319-334.
- BEYER, E.P.; BROOKS, J.; SALOMONSON, V.V. Geometric correction of LANDSAT-4 and 5 thematic mapper data. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 18., Paris, France, 1-5 Oct. 1984. *Proceedings*. Paris, ERIM, 1984, v. 1, p. 89-100.
- BORGESON, W.T.; BATSON, R.M; KIEFFER, H.H. Geometric accuracy of LANDSAT-4 and LANDSAT-5 thematic mapper images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51(12):1893-1898, Dec. 1985.
- CHEVREL, M.; COURTOIS, M.; WEILL, G. The SPOT satellite remote sensing mission. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 47(8):1163-1171, Aug. 1981.
- CRAIN, I.K. *Inverse geometrical transformation of ERTS MSS images*. Ottawa, Canada, Canada Centre for Remote Sensing, CCRS, 1973.

- DUCHON, P.; MARCE, J.L. L'attitude des satellites d'observation de la Terre. In: *CNES/IGN Cartographie spatiale de la Terre, cours de technologie spatiale*, Paris, CNES/IGN, 1979. p. 151-181.
- FLEUTIAUX, B. Corrections géométrique d'images. Méthodes et performances. In: *CNES/IGN Cartographie spatiale de la Terre, cours de technologie spatiale*, Paris, CNES/IGN, 1979. p. 489-515.
- FORD, G.E.; ZANELLI, C.I. Analysis and quantification of errors in the geometric correction of satellite images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51(11):1725-1734, Nov. 1985.
- FORREST, R.B. Simulation of orbital image - sensor geometry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 47(8):117-113, Aug. 1981.
- FRIEDMANN, D.E.; FRIEDEL, J.P.; MAGNUSSEN, K.L; KWOK, R.; RICHARDSON, S. Multiple scene precision rectification of spaceborne imagery with very few ground control points. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49(12):1657-1667, Dec. 1983.
- HORN, B.K.P.; WOODHAM, R.J. LANDSAT MSS coordinate transformations. Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium, 1979.
- MACHADO E SILVA, A.J.F. *Modelo fotogramétrico para correção de imagens MSS-LANDSAT*. São José dos Campos, INPE, ago. 1988, (INPE-4652-PRE/1359). Apresentado no 3º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Rio de Janeiro, RJ, 28-30 nov. 1984.
- _____. *Estudo da qualidade geométrica das imagens MSS-LANDSAT*. São José dos Campos, INPE, ago. 1988, (INPE-4653-PRE/1360). Apresentado no 3º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Rio de Janeiro, RJ, 28-30 nov. 1984.

- _____ Sistema modular para correção geométrica de imagens digitais. Simpósio Latino-americano de Sensoriamento Remoto, 1., e Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 4., Gramado, RS, 10-15 ago. 1986.
- _____ *Sistemas cartográficos digitais*. Exame integrado válido para o curso de mestrado, São José dos Campos, SP, Instituto de Pesquisas Espaciais, 1986.
- _____ Estudo comparativo entre modelos de refinamento do tratamento geométrico de imagens orbitais. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5., Natal, RN, 11-15 out. 1988.
- MACHADO E SILVA, A.J.F.; D'ALGE, J.C.L. Avaliação da qualidade geométrica das imagens TM-LANDSAT. Simpósio Latino-americano de Sensoriamento Remoto, 1., e Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 4., Gramado, RS, 10-15 ago. 1986.
- MACHADO E SILVA, A.J.F.; BARBOSA, O.C. Correção geométrica com uso de um modelo digital de elevação, das imagens SPOT obtidas em visada lateral (nível 3). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5., Natal, RN, 11-15 out. 1988. *Anais*. São José dos Campos, INPE, 1988, v 1., p. 225-231.
- MACHADO E SILVA, A.J.F.; D'ALGE, J.C.L.; BEZERRA, P.C.R. Modelos matemáticos de correção e avaliação geométrica das imagens HRV-SPOT no INPE. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5., Natal, RN, 11-15 out. 1988.
- MACHADO E SILVA, A.J.F.; D'ALGE, J.C.L.; BEZERRA, P.C.R.; BARBOSA, O.C. The processing of SPOT imagery in Brazil. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 16., Kyoto, Japan, 1-10 Jul. 1988. *Proceedings*. Kyoto, ISPRS, 1988, v. 27, part B10, p. 300-307.

MACHADO E SILVA, A.J.F.; D'ALGE, J.C.L.; BEZERRA, P.C.R.; BARBOSA, O.C. Correção geométrica de imagens HRV-SPOT. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHEIROS CARTÓGRAFOS, 5., Presidente Prudente, SP, 29-31 jul. 1988. *Anais* Presidente Prudente, ABEC, 1988, p. 169-178.

MACHADO E SILVA, A.J.F.; II, F.A.M.; CÂMARA NETO, G.; SERRA, P.R.M.; SOUZA, R.C.M. An integrated software system for geometric correction of LANDSAT MSS imagery. São José dos Campos, INPE, Apr. 1984, (INPE-3078-PRE/491). Apresentado no XV Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 16., Rio de Janeiro, Brazil, 17-29 Jun. 1984.

MACHADO E SILVA, A.J.F.; II, F.A.M.; CÂMARA NETO, G.; SERRA, P.R.M.; SOUZA, R.C.M. *Correção geométrica digital de imagens MSS-LANDSAT*. São José dos Campos, INPE, jul. 1988. (INPE-4627-PRE/1345). Apresentado no 3º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Rio de Janeiro, RJ, 28-30 nov. 1984.

MASCARENHAS, N.D.A.; VELASCO, F.R.D. *Processamento digital de imagens*. São José dos Campos, Quarta Escola de Computação, Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, 1984.

MOCCIA, A.; VETRELA, S. An integrated approach to geometric precision processing of spaceborne high-resolution sensors. *International Journal of Remote Sensing*, 7(3):349-359, 1986.

SALAMONOWICZ, P.M. Satellite orientation and position for geometric correction of scanner imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52(4):491-499, Apr. 1986.

SHLIEN, S. Geometric correction, registration and resampling of LANDSAT imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 5(1):74-89, May 1979.

- SNYDER, J.P. Geometry of a mapping satellite. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48(10):1593-1602, Oct. 1982.
- STEINER, D.; KIRBY, M.E. Geometrical referencing of LANDSAT images by affine transformation and overlaying of map data. *Photogrammetria*, 33:41-75, 1977.
- WELCH, R.; JORDAN, T.R.; EHLERS, M. Comparative evaluations of geodetic accuracy and cartographic potential of LANDSAT-4 and LANDSAT-5 thematic mapper image data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51(11):1799-1812, Nov. 1985.
- WIE, P.V.; STEIN, M. A LANDSAT digital image rectification system. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, GE-15(3):130-137, Jul. 1977.
- WILLIAMSON, A.N. Corrected LANDSAT images using a small computer. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43(9):1153-1159, Sep. 1977.
- WONG, F.; ORTH, R.; FRIEDMANN, D.E. The use of digital terrain model in the rectification of satellite-borne imagery. International Symposium on Remote Sensing of Environment, 15., Ann Arbor, MI, May 1981.