



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

GEOMETRIA DE IMAGENS: DO PROJETO DO SATÉLITE À GERAÇÃO DOS
PRODUTOS

Antonio José Ferreira Machado e Silva

Tese de Doutorado em Sensoriamento Remoto, orientada por
Dr. Yosio Edemir Shimabukuru e Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro

INPE
São José dos Campos

2007

Dizem que o caráter de uma pessoa é forjado ainda na infância. Sendo assim, posso afirmar que meu caráter profissional foi forjado nessa casa. Aqui iniciei minha carreira e vivi minha infância profissional. Tive muitos exemplos, exemplos que ajudaram em muito na minha formação. Alguns poucos sabem o quanto me foram importantes, mas há muitos que não têm idéia de como me inspiraram. Eu não soube como agradecê-los. Hoje retorno a essa casa, em plena fase adulta e madura, em todos os sentidos, para encerrar mais um importante capítulo de minha vida. É um momento de muita felicidade, onde aproveito então para agradecer a essas pessoas, que por seu exemplo profissional e de vida ajudaram a quem iniciava a carreira a acumular bens muito valiosos, como dignidade e caráter.

Do Rigor Na Ciência:

“Naquele Império, a Arte da Cartografia logrou tal perfeição que o mapa de uma única Província ocupava toda uma Cidade, e o mapa do Império, toda uma Província. Com o tempo, esses Mapas Desmedidos não foram satisfatórios e os Colégios de Cartógrafos levantaram um Mapa do Império, que tinha o tamanho do Império e coincidia ponto por ponto com ele. Menos afeitas ao Estudo da Cartografia, as gerações seguintes entenderam que esse extenso Mapa era inútil e não sem impiedade o entregaram às inclemências do Sol e dos Invernos. Nos desertos do Oeste perduram despedaçadas Ruínas do Mapa, habitadas por animais e por mendigos; em todo o País não resta outra relíquia das Disciplinas Cartográficas.”

Jorge Luis Borges

*Aos meus pais
Carlindo e Maria Amélia
por me permitirem esta oportunidade*

*Aos meus filhos
Diogo, Victor e Renan
meus maiores legados
A minha nova filha Bruna
pela alegria que me trouxe*

*A minha mulher
Virginia
razão de ter chegado até aqui*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, em alguns casos mesmo sem saber, me ajudaram a vencer mais esta etapa da vida.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela oportunidade de estudo.

Aos professores do INPE pelo conhecimento compartilhado.

Aos meus orientadores Dr. Yosio Edemir Shimabukuru e Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro, pelo conhecimento passado, e pela orientação e apoio na realização deste trabalho.

Aos membros da banca que, com suas valiosas contribuições, ajudaram a enriquecer esse trabalho.

À Etel, amiga de todas as horas, a quem muito devo e sem a qual já teria perdido prazos e matrículas.

À família d’Alge que, com sua acolhida, carinho e amizade, tornou mais familiar minhas constantes viagens à São José dos Campos,

Aos meus colegas da Gisplan, com quem compartilhei muitas das idéias aqui desenvolvidas.

Ao meu sócio, Marcus Silva, por segurar a Gisplan nos momentos de devaneio com a tese.

Aos colegas Frederico Liporace e Marcelo Santos, que muito me ajudaram, desde que começamos a trabalhar juntos no Programa CBERS em 1998.

Aos meus pais Carlindo e Maria Amélia, por me ensinarem a importância do estudo e do saber.

Aos meus filhos Diogo, Victor e Renan, por me mostrarem o quanto ainda posso evoluir.

A minha mulher Virginia, pela compreensão, pelo carinho, pelo apoio e por todo seu amor.

RESUMO

Esta tese procura preencher uma lacuna importante para o Programa Espacial Brasileiro. Ela fornece subsídios para o estudo da qualidade geométrica das imagens de satélites de Sensoriamento Remoto, desde a fase inicial de projeto dos diversos sistemas de um satélite. Além do Programa CBERS, o Programa Espacial Brasileiro prevê a participação brasileira em outros programas de cooperação internacional, além de programas cem por cento brasileiros, como o Satélite de Sensoriamento Remoto (SSR) e a Plataforma Multi-Missão (PMM). Em todas estas situações, é necessário que se tenha a noção exata dos diversos fatores que degradam a geometria das imagens, para que seja possível firmar um compromisso entre custos e qualidade geométrica para cada sistema sensor e sistemas da plataforma, tais como os sistemas de controle de órbita e atitude. Neste trabalho, as diversas causas de degradação da geometria das imagens são identificadas e classificadas, modelos de correção para as causas classificadas são propostos e sua qualidade e viabilidade analisados e, por fim, a qualidade geométrica das imagens corrigidas por estes modelos é avaliada. Resultados experimentais relativos a diferentes conjuntos de satélites e instrumentos, variando a tecnologia de aquisição e a resolução espacial, com ênfase aos satélites da família CBERS são apresentados e discutidos. Esta Tese fornece um guia técnico detalhado sobre aspectos relacionados à geometria de imagens desde do início do projeto do satélite. Os resultados aqui obtidos podem orientar as decisões em diferentes fases do desenho de uma missão quando em referência a geometria das imagens. Os requisitos dos sub-sistemas ligados à plataforma devem estar alinhados com os requisitos desejáveis para a qualidade final das imagens.

IMAGE GEOMETRY: FROM THE SATELLITE PROJECT TO THE PRODUCT GENERATION

ABSTRACT

This paper aims to fill in an important gap for the Brazilian Space Program. It offers elements for the study of the geometric quality of the remote sensing satellite images, from the initial development stage of the various systems in one satellite. Besides the CBERS Program, the Brazilian Space Program includes Brazil's participation in other international cooperation programs, as well as other all-Brazilian programs, such as the Remote Sensing Satellite (RSS) and the Multi-Mission Platform (MMP). In all these situations, it is necessary to have the exact notion of the many factors that degrade the geometry of the images, in order to be able to establish a relation between costs and the geometric quality for each system sensor and platform systems, such as the attitude and orbit control systems. This study identifies and classifies the many different causes of degradation of the images' geometry, proposes correction models for the causes already classified, and evaluates the quality of the images generated by those models. Experimental results related to different sets of satellites and instruments, differing in acquisition technology and space resolution, with special emphasis on the satellites of the CBERS family, are also presented and discussed. This paper presents a comprehensive technical guide to the aspects concerning the geometry of the images right from the initial stages of the satellite's project. The results obtained in this study can guide the decisions in different stages of the design of a mission, when related to the geometry of the images. The requirements of the sub-systems connected to the platform must be aligned with those desirable requirements for the final quality of the images purchasing.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xv
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2	9
TÉCNICAS DE CORREÇÃO GEOMÉTRICA DE IMAGENS.....	9
2.1 Níveis de Processamento de Imagem	10
2.1.1 Nível 0	10
2.1.2 Nível 1	13
2.1.3 Nível 2	16
2.1.4 Nível 3	19
2.1.5 Nível 4	20
2.2 Correção Geométrica de Imagens de Satélite.....	21
2.2.1 Mapeamento Direto Nível 2	24
2.2.2 Mapeamento Direto Nível 3	28
2.2.3 Mapeamento Direto Nível 4	31
2.2.4 Mapeamento Inverso Níveis 2 e 3	32
2.2.5 Mapeamento Inverso Nível 4	35
2.2.6 Reamostragem	37
2.2.7 Polinômios Racionais	38
CAPÍTULO 3	43
SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA GEOMETRIA DAS IMAGENS.....	43
3.1 Geometria de Visada	50
3.1.1 CCD-CBERS 1, 2 e 2B	54
3.1.2 IRMSS-CBERS 1 e 2	57
3.1.3 WFI-CBERS 1, 2 e 2B	58

3.1.4 HRC-CBERS 2B	60
3.1.5 PAN-CBERS 3 e 4 (modo multi-espectral).....	62
3.1.6 PAN-CBERS 3 e 4 (modo pancromático).....	63
3.1.7 IRS-CBERS 3 e 4	65
3.1.8 AWFI-CBERS 3 e 4	66
3.1.9 Análise Final.....	67
3.2 Ângulos de <i>Boresight</i>	69
3.3 Efemérides.....	70
3.3.1 CCD-CBERS 1, 2 e 2B	75
3.3.2 IRMSS-CBERS 1 e 2	79
3.3.3 WFI-CBERS 1, 2 e 2B	82
3.3.4 HRC-CBERS 2B	84
3.3.5 PAN-CBERS 3 e 4 (modo multi-espectral).....	88
3.3.6 PAN-CBERS 3 e 4 (modo pancromático).....	90
3.3.7 IRS-CBERS 3 e 4	93
3.3.8 AWFI-CBERS 3 e 4	96
3.3.9 Análise Final.....	98
3.4 Atitude	100
3.4.1 CCD-CBERS 1, 2 e 2B	106
3.4.2 IRMSS-CBERS 1 e 2	119
3.4.3 WFI-CBERS 1, 2 e 2B	121
3.4.4 HRC-CBERS 2B	123
3.4.5 PAN-CBERS 3 e 4 (modo multi-espectral).....	125
3.4.6 PAN-CBERS 3 e 4 (modo pancromático).....	127
3.4.7 IRS-CBERS 3 e 4	130
3.4.8 AWFI-CBERS 3 e 4	132
3.4.9 Análise Final.....	133
3.5 Registro Temporal.....	135
3.6 Esfericidade	136
3.7 Rotação	138
3.8 Relevo.....	140
3.8.1 CCD-CBERS 1, 2 e 2B	143

3.8.2 IRMSS-CBERS 1 e 2	148
3.8.3 WFI-CBERS 1, 2 e 2B	149
3.8.4 HRC-CBERS 2B	151
3.8.5 PAN-CBERS 3 e 4 (modo multi-espectral).....	152
3.8.6 PAN-CBERS 3 e 4 (modo pancromático).....	152
3.8.7 IRS-CBERS 3 e 4	153
3.8.8 AWFI-CBERS 3 e 4	154
3.8.9 Análise Final.....	155
3.9 Pontos de Controle	156
3.9.1 CCD-CBERS 1, 2 e 2B	158
3.9.2 IRMSS-CBERS 1 e 2	159
3.9.3 WFI-CBERS 1, 2 e 2B	160
3.9.4 HRC-CBERS 2B	160
3.9.5 PAN-CBERS 2B (modo multi-espectral).....	161
3.9.6 PAN-CBERS 2B (modo pancromático).....	161
3.9.7 IRS-CBERS 3 e 4	163
3.9.8 AWFI-CBERS 3 e 4	164
3.9.9 Análise Final.....	165
3.10 Modelo Numérico de Elevação do Terreno – MNET	166
3.10.1 CCD-CBERS 1, 2 e 2B	168
3.10.2 HRC-CBERS 1, 2 e 2B	169
3.10.3 IRMSS, WFI, PAN, IRS e AWFI-CBERS.....	170
3.11 Coeficientes Polinomiais Racionais – RPC.....	171
3.11.1 Ikonos	172
3.11.2 CCD-CBERS 1, 2 e 2B	173
3.11.3 HRC-CBERS 2B	174
3.12 Modelo de Correção Geométrica.....	175
3.13 Resultados Sobre Imagens CCD-CBERS	175
CAPÍTULO 4.....	181
ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA OS SENSORES DOS SATÉLITES	
CBERS.....	181
4.1 Geometria de Visada	181
4.2 Efemérides.....	184

4.3 Atitude	187
4.4 Pontos de Controle	189
4.5 Modelo Numérico de Elevação do Terreno – MNET	191
CAPÍTULO 5	193
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	193
APÊNDICE A	199
SISTEMAS DE COORDENADAS	199
Sistema de Referência das Bandas Espectrais – SRB	200
Sistema de Referência do Sensor – SRS	200
Sistema de Referência da Plataforma – SRP	200
Sistema de Referência da Órbita – SRO	201
Sistema de Referência Geocêntrico Inercial– SRI	203
Sistema de Referência Geocêntrico – SRG	205
Sistema de Referência do <i>Datum</i> – SRD	206
Sistema Espacial Geodésico – SEG.....	208
Sistema Plano de Projeção – SPP	210
APÊNDICE B.....	211
PLANO-IMAGEM	211
Plano-Imagem Nível 0.....	211
Plano-Imagem Nível 1	212
Plano-Imagem Nível 2.....	213
Plano-Imagem Nível 3	214
Plano-Imagem Nível 4.....	214
APÊNDICE C	215
CARACTERÍSTICAS DOS SATÉLITES CBERS E SEUS SENSORES	215
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	219

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
FIGURA 2.1 – Imagem nível 0 de um sensor de varredura mecânica bi-direcional.	11
FIGURA 2.2 – Imagem nível 0 de um sensor de varredura eletrônica com sobreposição de barretes.....	12
FIGURA 2.3 – Imagem nível 1 de um sensor de varredura mecânica.....	15
FIGURA 2.4 – Imagem nível 1 de um sensor de varredura eletrônica com sobreposição de barretes.....	15
FIGURA 2.5 – Imagem nível 2 de um sensor de varredura mecânica.....	18
FIGURA 2.6 – Imagem nível 2 de um sensor de varredura eletrônica.....	19
FIGURA 2.7 – Relação entre as grades em níveis 1 e 2.....	23
FIGURA 2.8 – Processo relativo ao mapeamento direto nível 2.....	24
FIGURA 2.9 – Grade regular no plano-imagem nível 1.....	25
FIGURA 2.10 – Mapeamento direto nível 2.....	28
FIGURA 2.11 – Processo relativo ao mapeamento direto nível 3.....	29
FIGURA 2.12 – Processo relativo ao mapeamento direto nível 4.....	32
FIGURA 2.13 – Mapeamento inverso níveis 2 ou 3.....	33
FIGURA 2.14 – Plano-imagem nível 2 ou 3.....	34
FIGURA 2.15 – Mapeamento inverso nível 4.....	36
FIGURA 2.16 – Processo relativo ao mapeamento direto nível 4, com RPC.....	40
FIGURA 2.17 – Processo relativo ao mapeamento inverso nível 4, com RPC.....	41
FIGURA 3.1 – Metodologia de avaliação geométrica.....	49
FIGURA 3.2 – Efeito da degradação da distância focal nas imagens de sensores de varredura eletrônica.....	52
FIGURA 3.3 – Desvio do posicionamento de um <i>pixel</i> devido ao erro da distância focal.....	53
FIGURA 3.4 – Efeito da degradação da altitude do satélite nas imagens.....	72
FIGURA 3.5 – Desvio do posicionamento de um <i>pixel</i> devido ao erro da altitude.....	73
FIGURA 3.6 – Efeito da degradação da velocidade do satélite nas imagens.....	75
FIGURA 3.7 – Efeito do rolamento na órbita descendente.....	101
FIGURA 3.8 – Efeito da arfagem na órbita descendente.....	102
FIGURA 3.9 – Efeito da guinada na órbita descendente.....	102
FIGURA 3.10 – Desvio do posicionamento de um <i>pixel</i> devido ao erro do rolamento.....	103
FIGURA 3.11 – Desvio do posicionamento de um <i>pixel</i> devido ao erro da arfagem.....	104
FIGURA 3.12 – Desvio do posicionamento de um <i>pixel</i> devido ao erro da guinada.....	105
FIGURA 3.13 – Associação entre <i>time-code</i> e varredura.....	136
FIGURA 3.14 – Efeito da curvatura da Terra.....	137
FIGURA 3.15 – Efeito <i>bowtie</i> (distorção panorâmica).....	138
FIGURA 3.16 – Efeito da rotação da Terra.....	139
FIGURA 3.17 – Desvio do posicionamento de um <i>pixel</i> devido à não consideração de sua altitude.....	141

FIGURA 3.18 – Desvio do posicionamento de um <i>pixel</i> em função da altitude e do ângulo de visada.	142
FIGURA 3.19 – Efeito provocado pela distorção do relevo.	144
FIGURA 3.20 – Efeito provocado pela relevo considerando a altitude média.	146
FIGURA 3.21 – Anisomorfismo devido à distorção do relevo.	147
FIGURA 3.22 – Efeito combinada relevo e distorção panorâmica.	150
FIGURA 3.23 – Densidade e distribuição dos pontos de controle.	158
FIGURA 3.24 – Desvio do posicionamento de um <i>pixel</i> devido ao erro de altitude. ...	167
FIGURA 3.25 – Desvio do posicionamento de um <i>pixel</i> em função do erro da altitude e do ângulo de visada.	168
FIGURA 3.26 – Distribuição dos pontos de controle e teste.	177
FIGURA 4.1 – Distorção relativa dos parâmetros da geometria de visada.	182
FIGURA 4.2 – Distorção absoluta da distância focal.	183
FIGURA 4.3 – Distância focal em função do GSD.	184
FIGURA 4.4 – Erro sistemático da posição do satélite.	185
FIGURA 4.5 – Erro sistemático da velocidade do satélite.	185
FIGURA 4.6 – Erro aleatório das efemérides do satélite.	186
FIGURA 4.7 – Erro sistemático da atitude do satélite.	188
FIGURA 4.8 – Erro aleatório da atitude do satélite.	189
FIGURA 4.9 – Pontos de controle e a resolução espacial.	190
FIGURA 4.10 – Precisão do MNET em função da visada oblíqua do sensor CCD. ...	192
FIGURA 4.11 – Precisão do MNET em função da visada oblíqua do sensor HRC. ...	192
FIGURA A.1 – Relação entre os sistemas SRS e SRP.	201
FIGURA A.2 – Sistema de Referência da Órbita (SRO).	202
FIGURA A.3 – Relação entre os sistemas SRP e SRO.	203
FIGURA A.4 – Relação entre os sistemas SRO e SRI.	204
FIGURA A.5 – Sistema de Referência Geocêntrico (SRG).	206
FIGURA A.6 – Relação entre os sistemas SRG e SRD.	208
FIGURA A.7 – Sistema Espacial Geodésico (SEG).	209
FIGURA B.1 – Plano-Imagem Nível 0.	212
FIGURA B.2 – Plano-Imagem Nível 2.	213

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
TABELA β .1 – Impacto da simulação da degradação da distância focal na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.	55
TABELA β .2 – Impacto da simulação da degradação do ângulo de apontamento do espelho na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.	56
TABELA β .3 – Impacto da simulação do perfil do espelho na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS.	58
TABELA β .4 – Impacto da simulação da degradação da distância focal na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS.	59
TABELA β .5 – Impacto da simulação da degradação da distância focal na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.	61
TABELA β .6 – Impacto da simulação da degradação da distância focal na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS).	63
TABELA β .7 – Impacto da simulação da degradação da distância focal na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P).	64
TABELA β .8 – Impacto da simulação da degradação da distância focal na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS-CBERS.	66
TABELA β .9 – Impacto da simulação da degradação da distância focal na qualidade geométrica das imagens do sensor AWFICBERS.	67
TABELA β .10 – Relação da degradação da distância focal com o GSD.	68
TABELA β .11 – Relação da degradação da distância focal com o campo de visada.	69
TABELA β .12 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.	76
TABELA β .13 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.	77
TABELA β .14 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.	77
TABELA β .15 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.	78
TABELA β .16 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS.	79
TABELA β .17 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS.	80
TABELA β .18 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS.	80
TABELA β .19 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS.	81
TABELA β .20 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS.	82
TABELA β .21 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS.	83

TABELA β.22 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS.....	83
TABELA β.23 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS....	84
TABELA β.24 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.....	85
TABELA β.25 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.....	86
TABELA β.26 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.	86
TABELA β.27 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS...	87
TABELA β.28 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS).....	88
TABELA β.29 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS).....	89
TABELA β.30 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS)...	89
TABELA β.31 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS).....	90
TABELA β.32 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P).....	91
TABELA β.33 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P).....	92
TABELA β.34 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P).....	92
TABELA β.35 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P).....	93
TABELA β.36 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS-CBERS.....	94
TABELA β.37 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS-CBERS.....	95
TABELA β.38 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS-CBERS.	95
TABELA β.39 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS-CBERS....	96
TABELA β.40 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor AWFI-CBERS.....	97
TABELA β.41 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor AWFI-CBERS.....	97
TABELA β.42 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor AWFI-CBERS.	98
TABELA β.43 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor AWFI-CBERS.	98

TABELA β.44 – Relação da degradação das efemérides com o GSD.....	100
TABELA β.45 – Impacto da simulação da degradação do rolamento na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.	107
TABELA β.46 – Impacto da simulação da degradação da arfagem na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.	108
TABELA β.47 – Impacto da simulação da degradação da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.	109
TABELA β.48 – Impacto da simulação da degradação do rolamento e da arfagem na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.....	110
TABELA β.49 – Impacto da simulação da degradação do rolamento e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.....	111
TABELA β.50 – Impacto da simulação da degradação da arfagem e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.....	112
TABELA β.51 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.	113
TABELA β.52 – Impacto da simulação da degradação do rolamento por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.....	114
TABELA β.53 – Impacto da simulação da degradação da arfagem por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.....	114
TABELA β.54 – Impacto da simulação da degradação da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.....	115
TABELA β.55 – Impacto da simulação da degradação do rolamento e da arfagem por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.	115
TABELA β.56 – Impacto da simulação da degradação do rolamento e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.	116
TABELA β.57 – Impacto da simulação da degradação da arfagem e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.	116
TABELA β.58 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.	117
TABELA β.59 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS.....	120
TABELA β.60 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS.	121
TABELA β.61 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS.	122
TABELA β.62 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS.	123
TABELA β.63 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.	124
TABELA β.64 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.	125

TABELA β.65 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS). ...	126
TABELA β.66 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS).	127
TABELA β.67 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P).....	128
TABELA β.68 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P).....	129
TABELA β.69 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS-CBERS.	130
TABELA β.70 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS-CBERS.	131
TABELA β.71 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor AWFI-CBERS.	132
TABELA β.72 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor AWFI-CBERS.	133
TABELA β.73 – Relação da degradação da atitude com o GSD.	135
TABELA β.74 – Avaliação do efeito da altitude na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.	145
TABELA β.75 – Avaliação da compensação da altitude média na qualidade geométrica das imagens no sensor CCD-CBERS.	148
TABELA β.76 – Avaliação do efeito da altitude na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS.	149
TABELA β.77 – Avaliação do efeito da altitude na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS.	149
TABELA β.78 – Avaliação do efeito da altitude na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.	151
TABELA β.79 – Avaliação do efeito da altitude na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS).	152
TABELA β.80 – Avaliação do efeito da altitude na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P).	153
TABELA β.81 – Avaliação do efeito da altitude na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS-CBERS.	154
TABELA β.82 – Avaliação do efeito da altitude na qualidade geométrica das imagens do sensor AWFI-CBERS.	155
TABELA β.83 – Relação da distorção do relevo com o GSD.	156
TABELA β.84 – Avaliação do efeito da densidade e distribuição de pontos de controle na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.	159
TABELA β.85 – Avaliação do efeito da densidade e distribuição de pontos de controle na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS.	160
TABELA β.86 – Avaliação do efeito da densidade e distribuição de pontos de controle na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS.	161

TABELA β.87 – Avaliação do efeito da densidade e distribuição de pontos de controle na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.....	162
TABELA β.88 – Avaliação do efeito da densidade e distribuição de pontos de controle na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS).....	162
TABELA β.89 – Avaliação do efeito da densidade e distribuição de pontos de controle na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P).	163
TABELA β.90 – Avaliação do efeito da densidade e distribuição de pontos de controle na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS-CBERS.	164
TABELA β.91 – Avaliação do efeito da densidade e distribuição de pontos de controle na qualidade geométrica das imagens do sensor AWFI-CBERS.	165
TABELA β.92 – Avaliação do efeito da precisão do MNET na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.	169
TABELA β.93 – Avaliação do efeito da precisão do MNET na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.	170
TABELA β.94 – Avaliação do efeito da precisão do MNET na qualidade geométrica das imagens de sensores CBERS.	171
TABELA β.95 – Avaliação do uso de RPC's na ortorretificação de imagens Ikonos.	173
TABELA β.96 – Avaliação do uso de RPC's na ortorretificação de imagens CCD-CBERS.	174
TABELA β.97 – Avaliação do uso de RPC's na ortorretificação de imagens HRC-CBERS.	175
TABELA β.98 – Avaliação geométrica das imagens CCD-CBERS com inclinação de 0° (nadir).	177
TABELA β.99 – Avaliação geométrica das imagens CCD-CBERS com inclinação de - 18,6° (oeste).....	178
TABELA β.100 – Avaliação geométrica das imagens CCD-CBERS com inclinação de 17,0° (leste).....	178
TABELA C.1 – Características dos satélites CBERS.	215
TABELA C.1 – Características dos satélites CBERS (continuação).	216
TABELA C.2 – Características dos sensores CCD, IRMSS e WFI.....	216
TABELA C.3 – Características dos sensores HRC, PAN-P e PAN-MS.	217
TABELA C.4 – Características dos sensores MUX, IRS e AWFI.	218

LISTA DE SÍMBOLOS

- a - Semi-eixo maior de um elipsóide de revolução
- b - Semi-eixo menor de um elipsóide de revolução
- e - Excentricidade de um elipsóide de revolução
- E - Coordenada retangular plana de projeção cartográfica (oeste → leste)
- $f^{(1)}$ - Achatamento de um elipsóide de revolução
- $f^{(2)}$ - Distância focal
- H - Altitude
- H_g - Altitude geométrica ou elipsoidal
- H_o - Altitude ortométrica ou geoidal
- MS - Modo de operação multi-espectral
- $N^{(1)}$ - Coordenada retangular plana de projeção cartográfica (sul → norte)
- $N^{(2)}$ - Grande normal num elipsóide de revolução
- P - Modo de operação Pancromático
- $X^{(1)}$ - Coordenada retangular plana de imagem (coluna)
- $X^{(2)}$ - Coordenada retangular espacial
- X_i - Coordenada retangular plana (coluna) no plano-imagem i
- $Y^{(1)}$ - Coordenada retangular plana de imagem (linha)
- $Y^{(2)}$ - Coordenada retangular espacial
- Y_i - Coordenada retangular plana (linha) no plano-imagem i
- ϕ - Latitude

ϕ_d - Latitude geodésica

ϕ_g - Latitude geográfica ou geocêntrica

λ - Longitude

σ - Desvio-padrão

ξ - Erro médio

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- AEB - Agência Espacial Brasileira
- AOCS - *Attitude and Orbit Control System*
- AWFI - *Advanced Wide Field Imager*
- CAST - *China Association for Science and Technology*
- CBERS - *China Brazil Earth Resources Satellite*
- CCD - *Charge Couple Device*
- CCS - Centro de Controle de Satélites
- CRESDA - *Center for Resources Satellite Data and Applications*
- EMQ - Erro Médio Quadrático
- EOS - *Earth Observing System*
- ETM+ - *Enhanced Thematic Mapper Plus*
- FOV - *Field Of View*
- GPS - *Global Positioning System*
- GRALHA - *Generic RAw Level Hierarchical Archive*
- GSD - *Ground Sample Distance*
- HDF - *Hierarchical Data File*
- HRC - *High Resolution Camera*
- HRG - *High Resolution Geometric*
- HRV - *Haute Resolution Visible*
- HRVIR - *Haute Resolution Visible Infra-Rouge*

IFOV - *Instantaneous Field Of View*

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IRES - *InfraRed Earth Sensor*

IRMSS - *InfraRed Multi Spectral Scanner*

IRS - *InfraRed Scanner*

LUT - *Look-Up Table*

MNET - Modelo Numérico de Elevação do Terreno

MODIS - *MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*

MS³ - *Multi Satellite Station System*

MSS - *Multi Spectral Scanner*

MTF - *Modulation Transfer Function*

MUX - *MUlti spectral camera*

N/A - Não Aplicável

PAN - *PANchromatic camera*

PC - Ponto de Controle

PMM - Plataforma Multi-Missão

RPC - *Rational Polynomial Coefficients*

SAM - *Scan Angle Monitor*

SEG - Sistema Espacial Geodésico

SPP - Sistema Plano de Projeção

SRB - Sistema de Referência de Bandas espectrais

SRD - Sistema de Referência do *Datum*

SRG - Sistema de Referência Geocêntrico

SRI - Sistema de Referência geocêntrico Inercial

SRO - Sistema de Referência da Órbita

SRP - Sistema de Referência da Plataforma

SRS - Sistema de Referência do Sensor

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

SSR - Satélite de Sensoriamento Remoto

TC - *Time-Code*

TLE - *Two Line Elements*

TM - *Thematic Mapper*

WFI - *Wide Field Imager*

WGS - *World Geodetic System*

WOF - *Work Order File*

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Esta tese procura preencher uma lacuna importante para o Programa Espacial Brasileiro. Ela fornece subsídios para o estudo da qualidade geométrica das imagens de satélites de Sensoriamento Remoto, desde a fase inicial de projeto dos diversos sistemas de um satélite.

Ao disseminar imagens para usuários é necessário que os mesmos sejam informados das especificações técnicas destas imagens. Uma das componentes da especificação técnica é a qualidade geométrica.

Enquanto o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) foi um distribuidor de imagens de terceiros, como por exemplo, nos casos das imagens Landsat e Spot, as especificações técnicas eram supridas pelos gestores destes programas espaciais.

Entretanto, desde 1999 o INPE é responsável direto pelo Programa CBERS (*China Brazil Earth Resources Satellite*), que pressupõe o lançamento de pelo menos cinco satélites, num total de oito instrumentos diferentes.

Além do Programa CBERS, o Programa Espacial Brasileiro prevê a participação brasileira em outros programas de cooperação internacional (AEB, 2005), além de programas cem por cento brasileiros, como o Satélite de Sensoriamento Remoto (SSR) (AEB, 2005) e a Plataforma Multi-Missão (PMM) (AEB, 2005).

Em todas estas situações, é necessário que se tenha a noção exata dos diversos fatores que degradam a geometria das imagens, para que seja possível firmar um compromisso para cada sistema sensor, sistemas auxiliares, tais como de controle de órbita e atitude, entre custos e qualidade geométrica. Dessa forma, também será possível informar corretamente os usuários sobre a qualidade geométrica das imagens, fechando uma lacuna existente hoje no programa CBERS.

Quais são os critérios para definir o sucesso de um satélite de sensoriamento remoto? É óbvio que o Landsat-5, quer pela sua longevidade, quer pelo extenso número de usuários, é um exemplo de sucesso. Mas como tipificar os casos de sucesso?

Do ponto de vista da engenharia, se o satélite estabilizar na órbita prevista e todos os sistemas funcionarem atendendo as especificações, por um período igual ou superior a vida útil prevista, ele será considerado um sucesso.

Do ponto de vista do controle e rastreamento, o satélite tem receber e executar os comandos enviados, e enviar os dados de telemetria conforme a especificação.

O mais crítico a se definir é o caso de sucesso do ponto de vista do usuário. Não há razão de se lançar satélites de sensoriamento remoto sem pensar no usuário. Alguns pontos importantes do ponto de vista do usuário são: os tipos de sensores, as resoluções espaciais, radiométricas, espectrais e temporais e a qualidade das imagens, tanto no tocante à radiometria quanto à geometria.

A qualidade da imagem está atrelada às especificações dos diversos sistemas que compõem o satélite, como os sistemas óticos dos sensores, o sistema de controle de atitude e órbita do satélite, o sistema de conversão analógico-digital do sinal, incluindo a taxa de quantização, entre outros. Entretanto, o usuário tem o direito de conhecer o produto que está adquirindo, ou seja, os gestores dos programas de satélites de sensoriamento remoto tem o dever e a obrigação de tornar pública todas as especificações técnicas dos produtos oferecidos.

Durante a fase inicial do programa CBERS, não havia interação entre os projetistas do satélite e os usuários de imagens, ou seja, entre as áreas de engenharia e de aplicações. O resultado foi o desapontamento dos usuários com a qualidade das imagens, limitada pela especificação dos diversos sistemas, abaixo do paradigma representado pelas imagens dos satélites da série Landsat.

Por conta disso, a principal motivação para o tema dessa tese é o programa CBERS. O intuito é aprofundar ao máximo os estudos relacionados aos processos de correção

geométrica e de avaliação e análise da qualidade geométrica das imagens dos mais variados sensores da família CBERS.

O problema que será abordado nesta tese é o de identificar as diversas causas de degradação da geometria das imagens; modelar estas diferentes causas; propor modelos de correção destas degradações; analisar a qualidade e viabilidade dos modelos; e avaliar a qualidade geométrica das imagens corrigidas.

A qualidade geométrica pode se dividir em interna e externa. A geometria interna é a que define a qualidade de medições realizadas sobre a imagem, tais como forma, área, distância e ângulos. A geometria interna responde pela localização geográfica de cada ponto da imagem. Uma imagem pode estar deslocada quilômetros em relação ao valor real (má qualidade da geometria externa) e, no entanto, as relações de área, forma e distância podem ser precisas (boa qualidade da geometria interna).

As fontes de distorção geométrica estão associadas a diferentes sistemas, como por exemplo: a plataforma, o instrumento, a Terra, e a atmosfera. Para cada tipo de instrumento haverá um conjunto específico de distorções. Além disso, a importância destas distorções varia em função das características do instrumento, tais como resolução espacial e ângulo de visada.

Assim sendo, esta tese apresenta resultados práticos relativos a diferentes conjuntos de satélites e instrumentos, variando na tecnologia de aquisição e na resolução espacial. Ela dá especial ênfase aos satélites onde o Brasil tenha participação na gestão, seja por meio de cooperação internacional, caso dos satélites CBERS, seja nos satélites genuinamente brasileiros, caso do satélite SSR.

Este trabalho abordará principalmente os sete instrumentos previstos para os cinco primeiros satélites CBERS: CCD (CBERS 1, 2, 2B, 3 e 5), IRMSS (CBERS 1 e 2), WFI (CBERS 1, 2 e 2B), HRC (CBERS-2B), PAN (CBERS 3 e 4, modo Pan e modo Multi-Espectral), MUX (CBERS 3 e 4), IRS (CBERS 3 e 4) e AWFI (CBERS 3 e 4). Basicamente, essa dissertação cobrirá instrumentos de alta (ex. HRC – CBERS 2B), média (ex. CCD – CBERS 1, 2 e 2B) e baixa (ex. WFI – CBERS 1 e 2) resoluções

espaciais e sensores de varredura mecânica (ex. IRMSS – CBERS 1 e 2) e de varredura eletrônica (ex. MUX – CBERS 3 e 4).

Sensores de varredura mecânica apresentam um número reduzido de detetores que cobrem a Terra por meio de um espelho móvel, em movimento transversal ao da órbita do satélite. Esse movimento (varredura) pode ser ativo em apenas um sentido (ex.: MSS-Landsat) ou em ambos os sentidos (ex.: TM-Landsat e IRMSS-CBERS). Os pontos que compõem uma varredura são obtidos em instantes diferentes.

Os sensores de varredura eletrônica apresentam um conjunto de detetores que respondem pela largura da faixa de imageamento do sensor (ex.: HRV-Spot e CCD-CBERS). Todos os pontos que compõem uma varredura são obtidos ao mesmo tempo.

Um dos principais resultados deste trabalho é fornecer um documento técnico detalhado sobre os mais variados aspectos relacionados à geometria de imagens de satélite. Atualmente isso é prejudicado, pois muito do que é realizado nesta área fica restrito ao conhecimento das empresas que atuam no segmento de desenvolvimento de estações terrenas. Essa carência é ainda maior no caso de sensores de alta resolução espacial. Em decorrência disso, as referências bibliográficas não apresentam os aspectos cruciais relacionados aos processos que levam à correção geométrica das imagens.

Os resultados dessa tese servirão de base para tomada de decisão em diferentes fases de um programa espacial, sempre que se pensar em geometria das imagens. Por exemplo, na fase de projeto da plataforma há vários sistemas que influem na qualidade geométrica das imagens, tais como o Sistema de Controle de Órbita e Atitude, o Sistema de Determinação das Efemérides e o Sistema de Registro Temporal. Os requisitos destes sistemas devem estar alinhados com os desejáveis para a qualidade final das imagens.

O projeto do instrumento é o mais crítico, pois aqui reside a maior fonte de distorções na geometria das imagens. No entanto, na construção do instrumento é possível determinar com precisão todos os aspectos necessários para a geração de imagens com alto grau de precisão geométrica. A fase de integração e testes permite que se obtenha

todos os parâmetros de laboratório (pré-lançamento) relativos à calibração geométrica do sensor.

O modelo de referência para a Terra (elipsóide + Modelo Numérico de Elevação do Terreno – MNET) é outro aspecto de suma importância, principalmente em relação às imagens de alta resolução espacial ou as obtidas em visadas oblíquas.

Elementos externos utilizados para correção das degradações geométricas, como pontos de controle e o próprio MNET, que apresentam diferentes níveis de precisão, também proporcionam imagens com diferentes graus de qualidade geométrica. Alguns pontos de controle podem apresentar precisão suficiente para serem úteis para imagens de baixa resolução espacial, mas não para imagens de alta resolução espacial. O mesmo acontece em relação ao MNET, tanto quanto a diferentes resoluções espaciais, como em relação a diferentes ângulos de visada.

Os modelos de correção também são fontes de distorções, uma vez que eles têm que ser viáveis do ponto de vista de tempo de execução. As simplificações que são realizadas devem ser controladas para que as distorções daí decorrentes sejam desprezíveis.

A maior contribuição desta tese, entretanto, são processos, modelos e algoritmos que estão, ou estarão, incorporados à estação multi-satélite do INPE (*Multi Satellite Station System – MS³*). Resultados decorrentes dos estudos realizados sobre os sensores dos satélites CBERS (CCD, IRMSS, WFI e HRC) estão presentes no processo de geração das imagens destes sensores. O mesmo acontece para as imagens dos sensores MSS, dos satélites Landsat (1 a 5); TM, dos satélites Landsat (4 e 5); ETM+, do satélite Landsat-7; HRV, dos satélites da série Spot (1 a 3); HRVIR, do satélite Spot-4; MODIS, dos satélites Aqua e Terra, do programa EOS (*Earth Observing System*).

Os estudos inerentes a esta tese serviram de base para a geração de dois importantes aplicativos empregados na operação das estações terrenas do INPE. Um deles, de uso geral e livremente distribuído (ALMEIDA et al. 2007), permite a visualização e a avaliação das qualidades radiométrica e geométrica de imagens de satélite. O segundo

(MACHADO E SILVA et al 2007), de uso restrito ao INPE, permite a análise da qualidade das imagens e a simulação de novos sensores por meio de criação de cenários.

O aplicativo de avaliação, devido à distribuição gratuita, facilitará a avaliação das imagens CBERS por uma grande quantidade de usuários. Assim, ele permitirá que a tarefa de avaliação geométrica de imagens seja distribuída, sem, contudo, distribuir a responsabilidade.

O aplicativo de análise foi concebido para ser usado desde o início do projeto de um satélite. As características do sensor e de diversos sistemas auxiliares podem ser carregadas nele para simulação e análise de comportamento. Ele pode ser usado tanto pela área de engenharia quanto de aplicações.

Algumas das principais contribuições dos estudos realizados ao longo deste programa de doutorado são: a concepção e o projeto funcional da estação multi-satélite (MS³) (MACHADO E SILVA, 2003); os modelos e algoritmos matemáticos relativos à correção geométrica de imagens em seus diversos níveis de processamento (MACHADO E SILVA, 2002); a concepção e o projeto funcional dos aplicativos de visualização, avaliação, análise e simulação de imagens; e a definição do processo de avaliação e análise geométrica das imagens.

Além desta introdução, este trabalho foi dividido em mais quatro capítulos, descritos a seguir:

CAPÍTULO 2 – TÉCNICAS DE CORREÇÃO GEOMÉTRICA DE IMAGENS: Este capítulo contém a metodologia e a fundamentação teórica empregadas para caracterizar a geometria das imagens de satélite, incluindo os modelos matemáticos para correção geométrica em seus diferentes níveis de processamento;

CAPÍTULO 3 – SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA GEOMETRIA DAS IMAGENS: As metodologias de avaliação e análise dos modelos de correção geométrica, por meio da simulação de diferentes cenários, e os respectivos resultados encontrados para as imagens dos diversos sensores, em seus vários níveis de processamento são

apresentados neste capítulo. Para cada fonte de distorção é apresentado um modelo, seguido da análise da contribuição desta fonte para a qualidade final das imagens. Essas análises se dividem entre analíticas (simulação), quando não há necessidade de se gerar imagens, e práticas, realizadas sobre produtos gerados pela estação de processamento.

CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA OS SENSORES DOS SATÉLITES CBERS: Este capítulo faz uma análise sobre o impacto das diversas fontes de distorção geométrica sobre a qualidade das imagens, apontando os sistemas mais críticos dos satélites e propondo especificações para os futuros satélites da série CBERS.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS: Este capítulo apresenta as conclusões sobre o trabalho realizado e as perspectivas de trabalhos futuros, que podem dar continuidade ao que foi realizado até esta etapa.

CAPÍTULO 2

TÉCNICAS DE CORREÇÃO GEOMÉTRICA DE IMAGENS

As imagens de satélite são geradas a partir dos dados transmitidos pelo mesmo e recebidos nas estações terrenas. Elas passam por processos de correções radiométrica e geométrica. A correção radiométrica emprega basicamente parâmetros previamente conhecidos, que compõem o arquivo de calibração radiométrica. O processo de correção geométrica depende de diversos dados que permitem traçar uma referência entre um ponto da imagem (*pixel*) e uma posição geográfica.

Muitos destes dados variam dinamicamente e são transmitidos juntamente com os dados de imagem. Entre esses, destacam-se os dados de efemérides, que permitem recuperar a posição e a velocidade do satélite a cada instante; os dados de atitude, que respondem pela três possíveis rotações do satélite em relação a sua órbita; e a referência temporal, que permite saber o instante de aquisição de cada ponto da imagem.

Outros dados são definidos durante o projeto do satélite, e podem sofrer pequenas variações ao longo do tempo pelo desgaste sofrido pelo mesmo. Inicialmente, esses dados são verificados em laboratório antes do lançamento do satélite. Eles podem sofrer variações de baixa frequência temporal devido ao desgaste sofrido pelo satélite em órbita. Por conta disso, eles devem ser controlados por meio de avaliações sistemáticas das imagens geradas.

Os dados necessários ao processo de correção geométrica, que não são transmitidos pelo satélite, compõem o arquivo de calibração geométrica. Entre os principais parâmetros desses arquivos, destacam-se: distância focal, equação do perfil do espelho (sensores de varredura mecânica), parâmetros do vetor de visada, posição dos sistemas sensores dentro dos satélites (ângulos de *boresight*) e posição dos detetores de cada banda espectral em relação ao plano focal, que permite definir o registro entre bandas, o deslocamento entre detetores (sensores de varredura mecânica) e o deslocamento entre barras de detetores (sensores de varredura eletrônica).

Para obter produtos de melhor qualidade, pode-se adicionar dados externos ao modelo de correção geométrica, tais como pontos de controle (PC) e o modelo numérico de elevação do terreno (MNET) para melhor caracterizar a superfície terrestre.

2.1 Níveis de Processamento de Imagem

As imagens de satélite recebidas pelo INPE são processadas em 5 (cinco) diferentes níveis, onde alguns destes níveis não são comumente distribuídos para os usuários. Os níveis variam do 0 ao 4. A qualidade geométrica das imagens melhora na medida em que o nível de processamento cresce.

2.1.1 Nível 0

O nível 0 representa os dados de imagem em estado bruto. Não há qualquer alteração nos valores dos *pixels*, nem tão pouco há inclusão ou exclusão destes. Este nível de processamento é geralmente restrito a usuários especiais, e serve também para intercâmbio entre estações de processamento de imagens.

No caso da estação multi-satélite do INPE, os dados em nível 0 estão armazenados nos arquivos denominados GRALHA (*Generic RAW Level Hierarchical Archive*). Estes arquivos, em formato HDF5 (*Hierarchical Data File*), contêm, além dos dados brutos de imagem, dados orbitais (efemérides e atitude), dados de calibração radiométrica, entre outros (MIRANDA, 2002).

As linhas de dados de imagem transmitidas são armazenadas uma após a outra, de norte para sul, com os *pixels* ordenados de oeste para leste. Ou seja, nos instrumentos de varredura mecânica bi-direcional (direto e reverso), as varreduras são recompostas para que o *pixel* inicial de cada linha seja o *pixel* mais a oeste. Além disso, nas imagens obtidas em órbita ascendente, essa recomposição deve ser feita para todos os tipos de sensores. Ainda nas órbitas ascendentes, as varreduras são ordenadas de modo que a primeira linha seja a que está mais ao norte. Estes são os únicos processos realizados sobre os dados de imagem, neste nível.

Nos instrumentos de varredura mecânica, a quantidade de *pixels* de imagem em cada linha pode variar de varredura para varredura. Essa característica decorre do movimento do espelho responsável por imagear a superfície da Terra em faixas perpendiculares à órbita. O tempo de imageamento não é constante, mas a taxa de amostragem é. Logo, o número de *pixels* por linha de varredura é diretamente proporcional a este tempo. Por conta disso, ao final de cada linha é acrescentado, na estação terrena, um valor variável de *pixels* nulos de modo a garantir que as linhas passem a ter um tamanho constante.

Neste mesmo tipo de instrumento é comum haver um deslocamento entre os detetores de uma mesma banda espectral. Isto faz com que haja uma descontinuidade entre linhas consecutivas nas imagens geradas neste nível de processamento.

A figura 2.1 apresenta de forma esquemática os processos realizados sobre imagens de varredura mecânica.

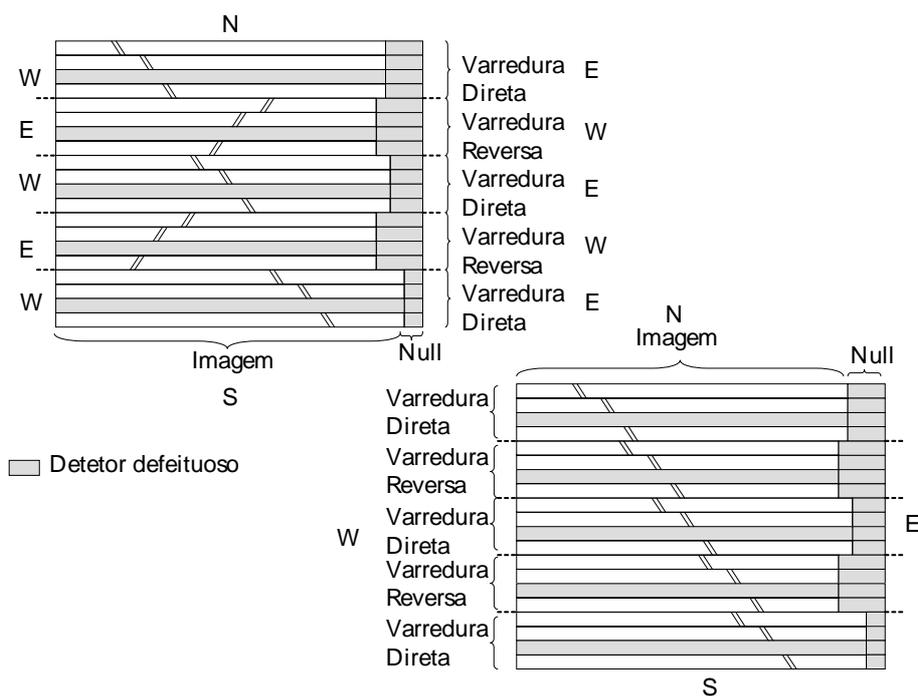


FIGURA 2.1 – Imagem nível 0 de um sensor de varredura mecânica bi-direcional.

Nos instrumentos de varredura eletrônica, compostos por múltiplas barras de detetores, geralmente as barras apresentam uma pequena zona de sobreposição. Os dados relativos

às zonas de sobreposição das barras aparecem em duplicidade nas imagens de nível 0 (figura 2.2).

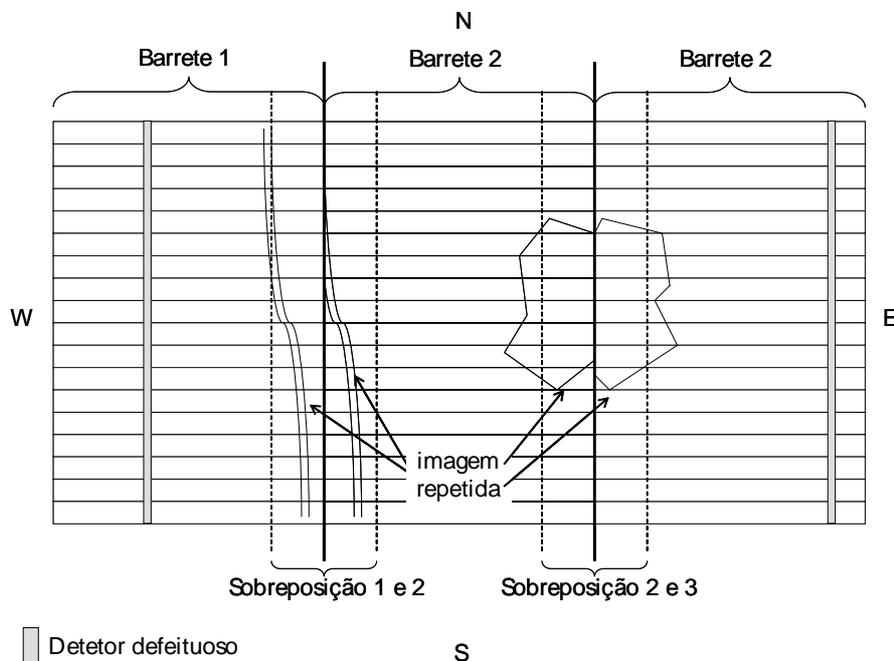


FIGURA 2.2 – Imagem nível 0 de um sensor de varredura eletrônica com sobreposição de barretes.

Os deslocamentos entre bandas espectrais não são compensados neste nível de processamento, o que dificulta a composição colorida de diferentes bandas espectrais.

Todos os processos executados neste nível são também executados nos níveis mais elevados. Em resumo, os processos realizados nas imagens de nível 0 são:

- Orientação dos *pixels* de cada linha de oeste para leste.
- Ordenação das linhas de norte para sul.
- Inserção de *pixels* nulos para manter tamanho das linhas constante (varredura mecânica).

2.1.2 Nível 1

O nível 1 realiza, basicamente, o processo de correção radiométrica dos dados de imagem. Entretanto, algum tipo de processamento não radiométrico é executado nas imagens geradas neste nível. Este produto não é distribuído abertamente. Quem procura por este tipo de imagem é um profissional interessado nos níveis de cinza dos *pixels*, que não podem ter sofrido alterações inerentes aos processos de transformação geométrica.

Os processos de correção radiométrica incluem a calibração e a restauração do sinal transmitido. O processo de calibração pode ser relativa, que visa uniformizar as respostas espectrais dos diferentes detetores, mas sem compromisso com a verdade terrestre; ou absoluta, quando também há compromisso com a verdade terrestre. A calibração é executada por meio da aplicação de tabelas LUT's (*Look-Up Tables*), que simplesmente mapeiam um nível de cinza de entrada num nível de cinza de saída (função pontual: $\mathfrak{S}: \mathfrak{N} \rightarrow \mathfrak{R}$).

O processo de restauração tem por objetivo reduzir as degradações radiométricas inseridas pelo sensor durante a aquisição das imagens. A restauração é executada por meio da aplicação de filtros espaciais lineares (função local: $\mathfrak{S}: \mathfrak{N}^N \rightarrow \mathfrak{R}$). Esses filtros são definidos a partir da análise da função de transferência de modulação, MTF (*Modulation Transfer Function*), de cada sistema sensor.

Esses dois processos devem garantir imagens com boa qualidade radiométrica. Porém, quando os parâmetros de calibração ou os parâmetros que definem a MTF não são precisamente conhecidos, algum processamento adicional pode ser necessário.

Nos casos de sensores de varredura eletrônica, quando houver dois diferentes sistemas de conversão analógico-digital (detetores pares e ímpares), é possível analisar a resposta dos conjuntos de detetores relativos a cada um dos conversores. Caso haja discrepância significativa, um processo simples de equalização das médias e variâncias pode ser adotado. Ainda neste tipo de sensor, a análise das respostas nas regiões de sobreposição das barras de detetores pode indicar a necessidade de um procedimento semelhante.

Além dos processos radiométricos de calibração e restauração, alguns ajustes são realizados nos dados de imagem.

O sinal de imagem pode sofrer perdas por diversos fatores, tais como defeito do detetor (definitivo) ou perda de sincronismo durante a gravação do sinal (temporário e aleatório). Em qualquer situação, a perda do sinal é suprida pela interpolação do sinal dos *pixels* vizinhos, quando o número de linhas ou colunas é menor que um dado limiar.

Nos instrumentos de varredura mecânica são eliminados todos os *pixels* nulos, além de garantir que todas as linhas apresentem o mesmo número de *pixels* de imagem (lado superior esquerdo da figura 2.3 – A). Se uma linha apresentar um número de *pixels* de imagem inferior ao nominal, ela é reamostrada utilizando-se o interpolador de vizinho mais próximo. No caso inverso, maior que o nominal, alguns *pixels* de imagem são eliminados durante o processo de reamostragem.

Neste mesmo tipo de instrumento, caso haja deslocamento entre detetores de uma mesma banda espectral, ele será compensado de modo a garantir a continuidade entre linhas consecutivas de uma mesma varredura (lado superior direito da figura 2.3 – B). Em seguida as linhas são ajustadas por meio da eliminação de *pixels* no início ou no fim das linhas (lado inferior da figura 2.3 – C). Entretanto, não há qualquer tratamento para garantir continuidade entre varreduras consecutivas. Esta compensação é feita por meio da eliminação de *pixels* de imagem no início ou no fim de cada linha. O número total de *pixels* eliminados é constante para todas as linhas de imagem (figura 2.3).

Nos instrumentos de varredura eletrônica, compostos por múltiplas barras de detetores, os *pixels* relativos às zonas de sobreposição das barras são integrados de modo a eliminar a duplicidade de dados de imagem (figura 2.4). Essa integração pode se dar por adição dos níveis de cinza (quando há divisão da energia refletida pelo alvo), ou por média entre esses valores (quando há repetição do registro da energia refletida).

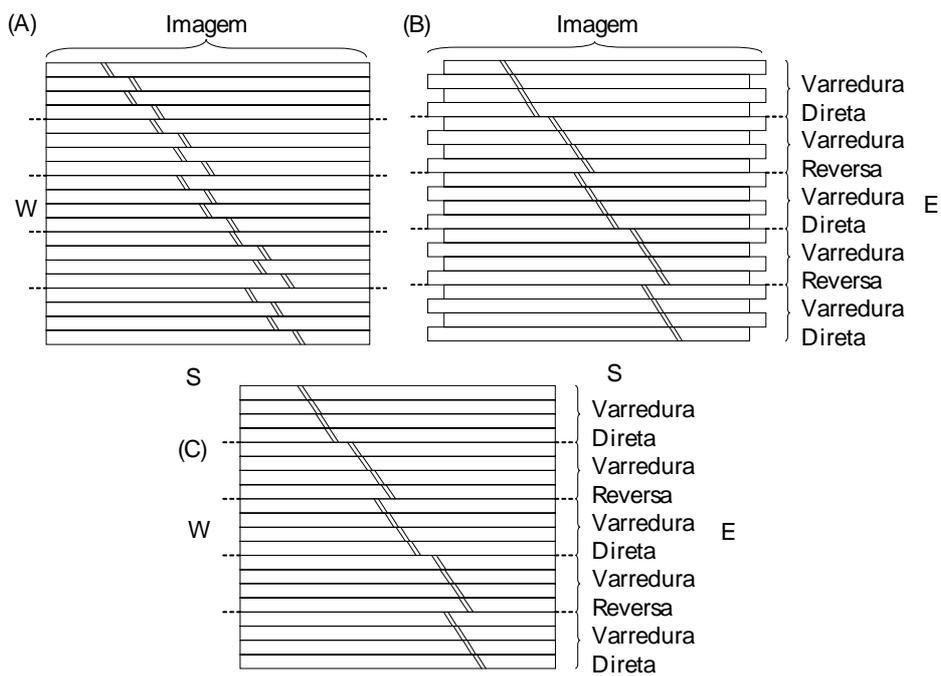


FIGURA 2.3 – Imagem nível 1 de um sensor de varredura mecânica.

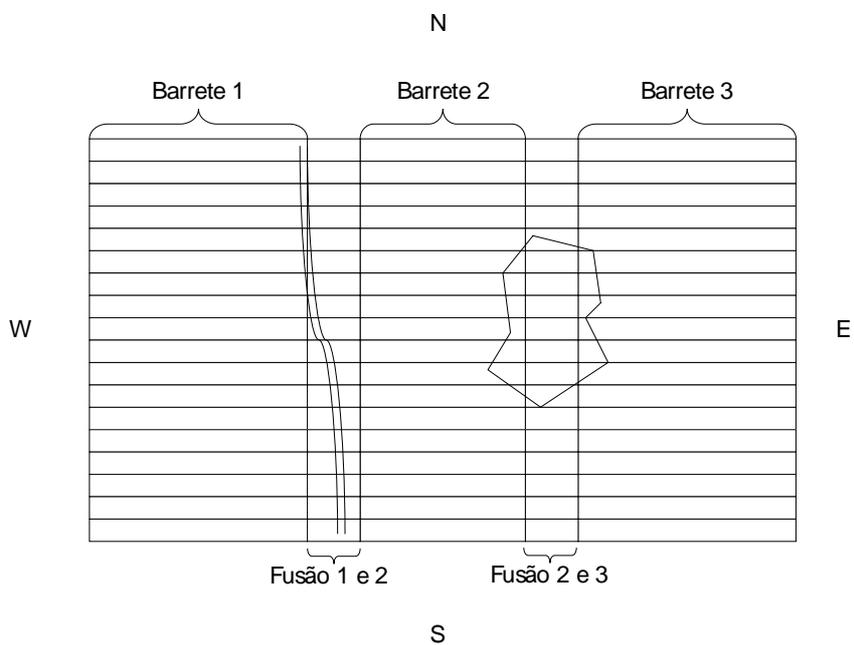


FIGURA 2.4 – Imagem nível 1 de um sensor de varredura eletrônica com sobreposição de barretes.

Os deslocamentos entre bandas espectrais são compensados de modo semelhante ao do deslocamento entre detetores, por eliminação de linhas e colunas no início e no fim de cada banda, permitindo que se possa visualizar composições coloridas. O número total de linhas e colunas é constante para todas as bandas espectrais.

Todos os processos executados neste nível são também executados nos níveis mais elevados. Em resumo, os processos realizados nas imagens de nível 1 são:

- Calibração relativa.
- Calibração absoluta.
- Restauração.
- Interpolação dos níveis de cinza dos vizinhos para suprir os *pixels* perdidos.
- Equalização das médias e variâncias dos detetores pares e ímpares (opcional).
- Equalização das médias e variâncias das barras de detetores por meio das regiões de sobreposição (opcional).
- Uniformização dos comprimentos de linha (varredura mecânica).
- Compensação dos deslocamentos entre detetores (varredura mecânica).
- Integração dos *pixels* das zonas de sobreposição das barras de detetores (varredura eletrônica).
- Compensação dos deslocamentos entre bandas espectrais (registro de bandas).

2.1.3 Nível 2

O Nível 2 é o primeiro nível que inclui o processo de correção geométrica. Este é o produto básico, distribuído aos usuários.

As imagens no nível 2 passam por todos os tratamentos radiométricos referentes ao nível 1, além do processo de correção geométrica de sistema.

A correção geométrica de sistema não faz uso de elementos externos, tais como pontos de controle ou modelo representativo da topografia do terreno. Os modelos de correção geométrica utilizam informação sobre a geometria de visada do instrumento; montagem do instrumento no satélite, tais como ângulos de *boresight* (respondem pela posição do instrumento no sistema de referência da plataforma); dados orbitais, tais como efemérides (posição e velocidade) e atitude (rolamento, arfagem e guinada); e um modelo representativo da superfície da Terra.

Os parâmetros relativos ao modelo de geometria de visada e os ângulos de *boresight* apresentam uma frequência de variação muito pequena. Na verdade, as possíveis variações ocorrem por desgaste de equipamento, como, por exemplo, o ocorrido no instrumento TM do satélite Landsat-5. Muitas vezes, não há variação alguma ao longo de toda a vida útil do satélite, pelo menos que seja detectável. De qualquer forma, estes dados fazem parte do conjunto de parâmetros relativos à calibração geométrica do instrumento.

Os dados orbitais variam constantemente e são transmitidos pelo satélite, e podem ser processados por estações terrenas. A precisão destes dados varia de satélite para satélite, dependendo do sistema de controle de órbita e atitude utilizado e do modelo de processamento.

O modelo representativo da superfície da Terra geralmente se restringe à escolha de um *datum* (elipsóide e sua localização relativa a um sistema geocêntrico) com um possível acréscimo da altitude média da cena. Esse acréscimo da altitude média se dá por meio da alteração dos parâmetros que definem a forma do elipsóide (por exemplo, semi-eixo maior e achatamento), de modo que as coordenadas geodésicas referentes ao elipsóide padrão dos pontos na superfície desse elipsóide auxiliar apresentem altitudes muito próximas da altitude média da cena.

As bandas espectrais são corrigidas separadamente, porém visando o perfeito registro entre elas. Neste nível, os deslocamentos entre bandas espectrais podem apresentar frações de *pixel*, e ainda assim serão corrigidos, garantindo a possibilidade de construção de excelentes composições coloridas.

As figuras 2.5 e 2.6 apresentam de forma esquemática o resultado do processamento em nível para imagens de sensores de varredura mecânica e eletrônica respectivamente.

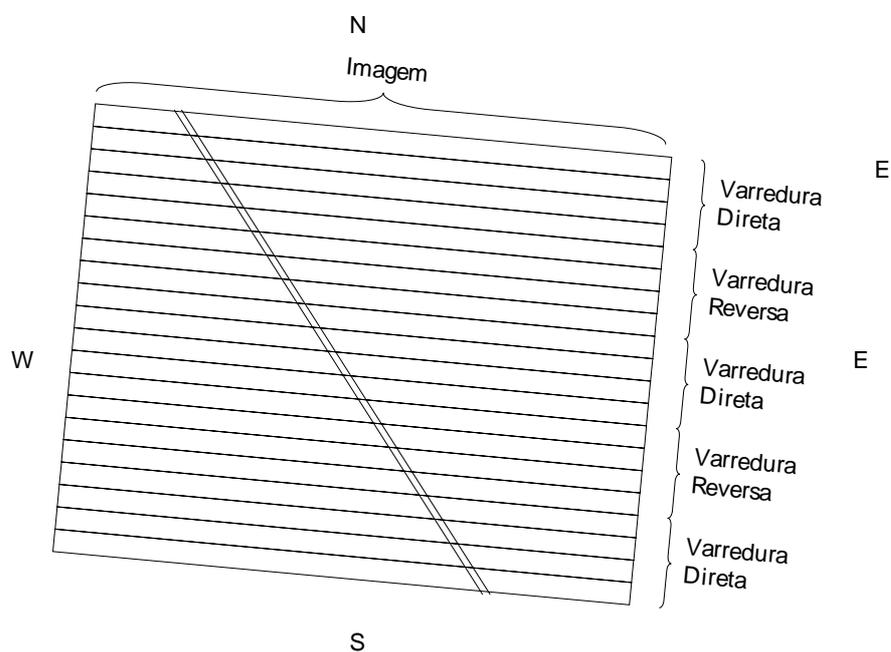


FIGURA 2.5 – Imagem nível 2 de um sensor de varredura mecânica.

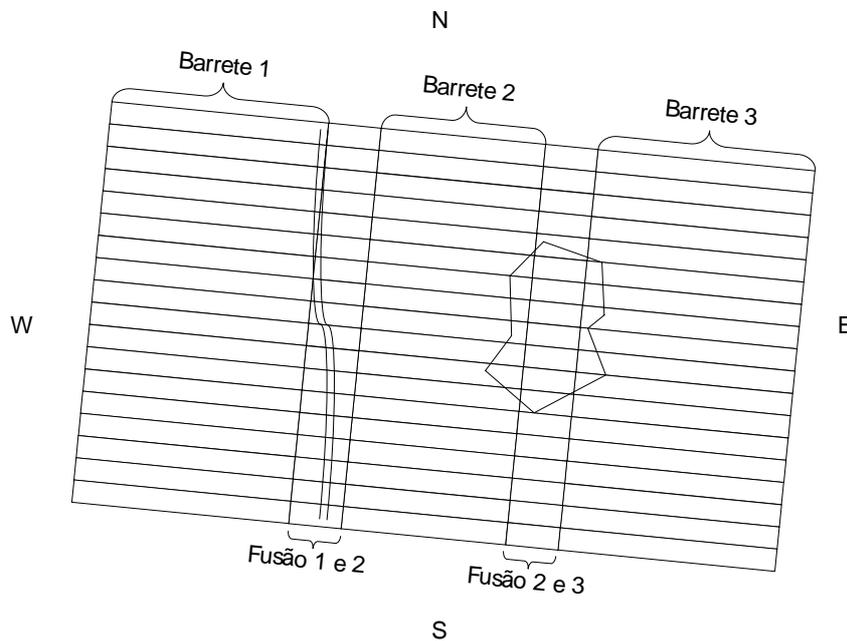


FIGURA 2.6 – Imagem nível 2 de um sensor de varredura eletrônica.

Todos os processos executados neste nível são também executados nos níveis mais elevados. Em resumo, os processos realizados nas imagens de nível 2 são:

- Correção radiométrica.
- Correção geométrica de sistema.

2.1.4 Nível 3

O nível 3 cresce de importância quando os dados orbitais não são muito precisos. Efemérides de má qualidade refletem mais na geometria externa do que na geometria interna da imagem, deslocando a imagem em relação à referência geográfica. Dados de atitude de baixa qualidade afetam tanto a geometria interna quanto externa, causando deformações além do deslocamento.

Para resolver estes problemas, o sistema de correção geométrica pode usar pontos de controle, para os quais são precisamente conhecidas as coordenadas geodésicas (latitude

– ϕ_d , longitude – λ e altitude – H), em um determinado *datum*, e que são facilmente identificáveis na imagem.

Para os pontos de controle, as coordenadas obtidas externamente são comparadas com as coordenadas de projeção obtidas pelo modelo do nível 2. A partir desta comparação, é definido um modelo que reduz as diferenças encontradas e, então, este modelo é adotado para toda a imagem. Nesse trabalho, só serão abordados os modelos polinomiais de primeiro grau.

Todos os processos executados neste nível são também executados nos níveis mais elevados. Em resumo, os processos realizados nas imagens de nível 3 são:

- Correção radiométrica.
- Correção geométrica de sistema.
- Refinamento do modelo de correção pelo uso de pontos de controle.

2.1.5 Nível 4

O produto nível 3 é satisfatório quando se trata de imagens obtidas por sensores de média resolução espacial e em visada nadir (ortogonal à superfície da Terra). Ainda neste nível, o modelo de representação da superfície terrestre é um simples elipsóide de revolução, sem a caracterização da topografia do terreno.

Para imagens de sensores de alta resolução espacial, ou de média resolução espacial em visada oblíqua, geralmente, é necessário a melhor caracterização do terreno. Neste caso, o modelo de correção geométrica incorpora um MNET para representar a variação do relevo na área da imagem.

O deslocamento devido ao relevo é proporcional à altitude e ao ângulo de visada (no nadir o ângulo de visada é nulo). A distorção geométrica da imagem, entretanto, não está diretamente relacionada à altitude, e sim à variação da topografia em relação à altitude média.

Não faz sentido empregar o MNET dissociado de pontos de controle. Estes são necessários para garantir a correta associação entre cada ponto da imagem com uma altitude obtida do MNET.

As imagens resultantes do processamento em nível 4 são denominadas como ortorretificadas. Em resumo, os processos realizados nas imagens de nível 4 são:

- Correção radiométrica.
- Correção geométrica de sistema.
- Refinamento do modelo pelo uso de pontos de controle.
- Ortorretificação por incorporação do MNET e pontos de controle.

2.2 Correção Geométrica de Imagens de Satélite

Os modelos de correção geométrica se dividem em três fases: mapeamento direto, mapeamento inverso e reamostragem. Os mapeamentos direto (\mathfrak{T}_D) e inverso (\mathfrak{T}_I) relacionam o plano-imagem nível 1 com o plano-imagem nível 2, 3 ou 4, e vice-versa. Ou seja, eles estabelecem uma relação entre dados brutos de imagem e uma superfície representativa da Terra.

$$\begin{aligned} \mathfrak{T}_D : \mathfrak{R}^2 &\Rightarrow \mathfrak{R}^2 \\ (X_1, Y_1) &\rightarrow (X_2, Y_2) \end{aligned} \tag{2.1}$$

$$\begin{aligned} \mathfrak{T}_I : \mathfrak{R}^2 &\Rightarrow \mathfrak{R}^2 \\ (X_2, Y_2) &\rightarrow (X_1, Y_1) \end{aligned} \tag{2.2}$$

Na fase do mapeamento direto, o modelo parte do espaço imagem nível 1 e relaciona cada ponto da imagem bruta com um ponto sobre uma superfície de referência da Terra. Este modelo leva em consideração todas as informações necessárias para a devida caracterização geométrica da imagem, tais como todos os dados contidos no arquivo de calibração geométrica, bem como dados transmitidos, como as efemérides e a atitude do

satélite. O modelo do mapeamento direto é denominado de modelo rígido, pois se apóia na caracterização física do processo de aquisição da imagem. Para cada ponto de saída há um e somente um ponto de imagem corrigida.

Para cada ponto da imagem nível 1, define-se o tempo de aquisição (*time-code*), e o vetor de visada no Sistema de Referência do Sensor (SRS). A partir do *time-code*, determina-se os dados de efemérides e atitude, que permitem levar o vetor de visada ao Sistema de Referência do *Datum* (SRD). A posição do satélite e o vetor de visada definem a reta de suporte à visada. A interseção desta reta com a superfície representativa da Terra fornece um ponto no espaço (SRD). Este ponto tem as coordenadas convertidas, sucessivamente, para o Sistema Espacial Geodésico (SEG), para o Sistema Plano de Projeção (SPP) e para o sistema de coordenadas de imagem corrigida (nível 2, 3 ou 4).

Os modelos relativos ao mapeamento inverso são resultantes de processos interpolativos ou iterativos, tendo como base o resultado do mapeamento direto. Não é possível estipular a relação inversa, pois ao partir de um ponto da superfície representativa da Terra pode-se alcançar diversos pontos da imagem bruta, dependendo dos ângulos de atitude e da posição do satélite que se adote, por exemplo. O ponto chave para estabelecer relações é o tempo, pois ele permitir a obtenção dos dados de atitude e efemérides, por exemplo. Existe uma associação entre tempo (*time-code*) e ponto no plano-imagem bruto (níveis 0 e 1), mas não há essa relação com ponto nos planos-imagem mais avançados (níveis 2, 3 e 4). Logo, quando parte-se de uma ponto num nível mais elevado, não é possível saber a posição do satélite no espaço naquele exato momento.

Dessa forma, a partir de um conjunto de pontos para os quais são conhecidas as coordenadas no espaço imagem nível 1 e no espaço imagem com correção geométrica determina-se, por interpolação, as coordenadas de nível 1 para um par de coordenadas do espaço imagem com correção geométrica que não pertença ao conjunto amostral.

Geralmente define-se uma grade amostral regularmente distribuída no espaço imagem nível 1 e aplica-se o modelo relativo ao mapeamento direto para cada nó desta grade. A

densidade desta grade deve manter compromisso com a precisão da interpolação e com o desempenho computacional. O ideal seria aplicar o modelo direto a todos os pontos da imagem nível 1.

As coordenadas relativas à imagem com correção geométrica apresentam uma distribuição irregular. Para cada retângulo da grade amostral nível 1 há um quadrilátero associado em nível mais elevado. A transformação projetiva é usada para relacionar os nós do quadrilátero com os nós do retângulo. Assim, para um determinado ponto de imagem com correção geométrica, determina-se o quadrilátero que contém esse ponto e os parâmetros da transformação projetiva levam ao ponto imagem nível 1 (figura 2.7).

O processo de reamostragem irá definir o nível de cinza de cada ponto da imagem corrigida em função dos níveis de cinza da imagem nível 1.

Os modelos de correção geométrica têm como base o modelo relativo ao nível 2. Os demais incorporam os dados externos (pontos de controle – níveis 3 e 4 e MNET – nível 4) para refinar os resultados.

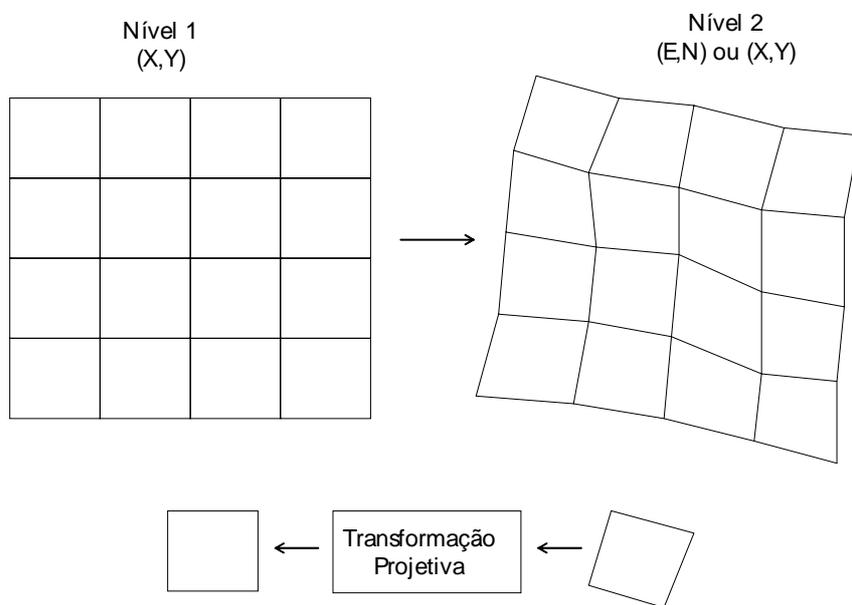


FIGURA 2.7 – Relação entre as grades em níveis 1 e 2.

2.2.1 Mapeamento Direto Nível 2

O mapeamento direto é executado para uma grade de pontos amostrais regularmente distribuídos no plano-imagem nível 1. Para cada nó da grade, parte-se das coordenadas de imagem nível 1 $(X, Y)_{N1}$ e determina-se as coordenadas plano-retangulares de projeção $(E, N)_{N2}$, que posteriormente são transformadas em coordenadas de imagem nível 2 $(X, Y)_{N2}$. O espaçamento entre os nós da grade deve garantir a possibilidade de interpolação linear das coordenadas plano-retangulares, sem perda significativa da qualidade geométrica da imagem.

A figura 2.8 apresenta de forma esquemática o processo que transforma as coordenadas de imagem nível 1 em coordenadas planas de projeção nível 2. Ela apresenta todos os passos desde o plano-imagem nível 1 até o plano de projeção cartográfica.

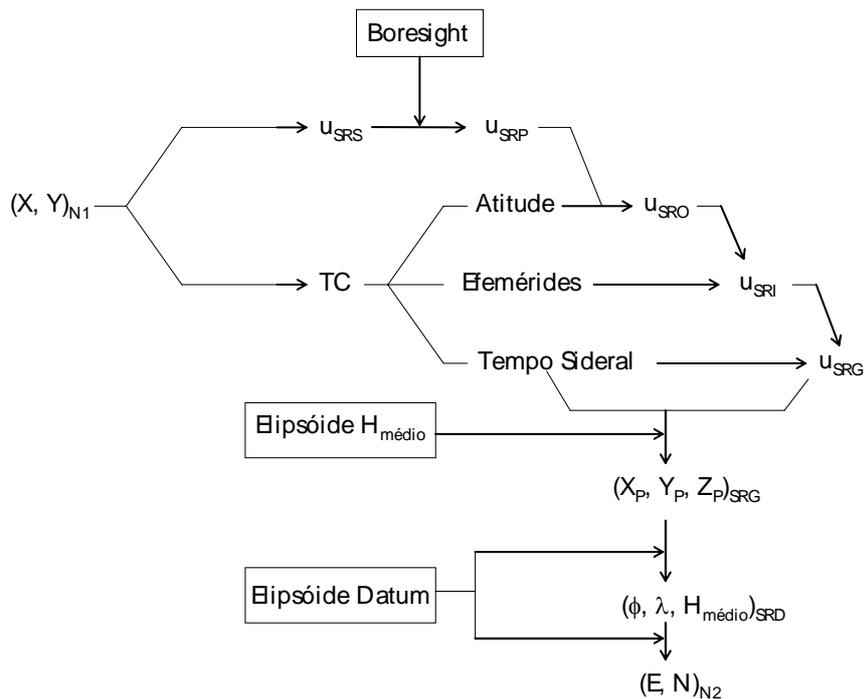


FIGURA 2.8 – Processo relativo ao mapeamento direto nível 2.

Apesar do sistema de aquisição de dados ser discreto no tempo (o *time-code* informado está relacionado com o centro da linha, ou seja, com os centros de cada *pixel*), os sistemas de varredura eletrônica com apenas uma linha podem ser tratados como sendo

temporalmente contínuos. Por conta da condição da aquisição discreta, pode haver pequenos intervalos, ou sobreposições, entre linhas consecutivas, mas que são irrelevantes para fins do tratamento geométrico.

Na abordagem contínua, para cada região na direção da órbita (*along-track*) do *pixel*, associa-se um *time-code* (TC) diferente. Assim sendo, os nós da grade são centros de *pixels*, de tal modo que os retângulos da grade amostral do plano-imagem nível 1 formam um mosaico em que as partes se justapõem perfeitamente, sem intervalos ou sobreposições (figura 2.9).

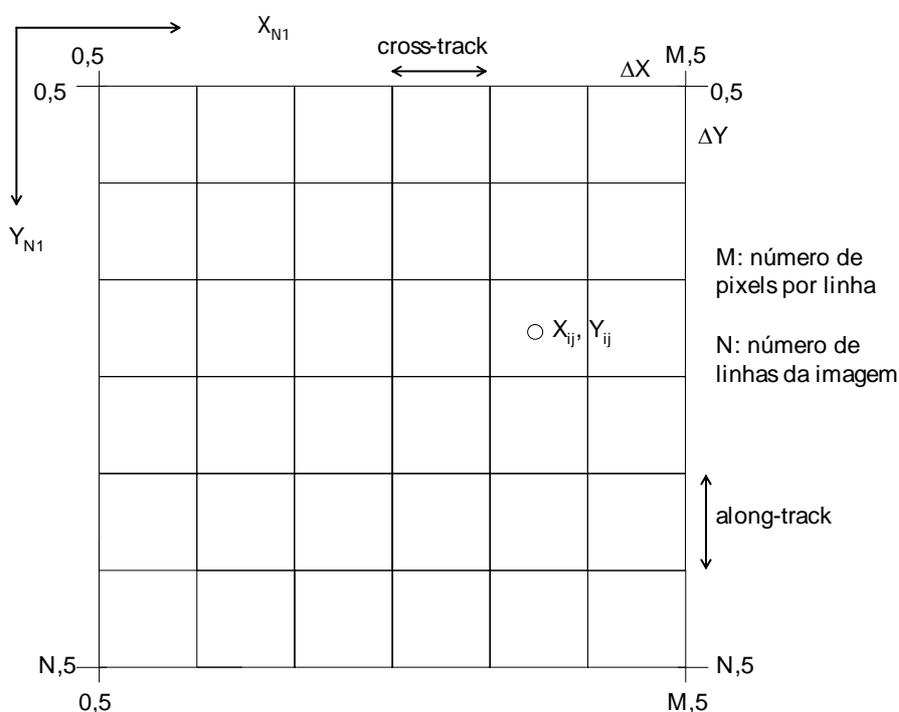


FIGURA 2.9 – Grade regular no plano-imagem nível 1.

Os centros dos *pixels* apresentam coordenadas inteiras, enquanto os cantos dos *pixels* apresentam coordenadas fracionárias.

Para cada *pixel* da grade amostral, calcula-se, por interpolação, o *time-code*, que é o tempo de aquisição dos dados de imagem do mesmo.

De posse do *time-code*, determina-se as efemérides (posição – X_{Sat} , Y_{Sat} , Z_{Sat} e velocidade – $V_{X_{Sat}}$, $V_{Y_{Sat}}$, $V_{Z_{Sat}}$) e atitude (rolamento – *roll*, arfagem – *pitch* e guinada –

yaw). As efemérides podem ser determinadas por interpolação das efemérides transmitidas ou por propagação a partir dos parâmetros contidos nos arquivos TLE (*Two Line Elements*). Esses arquivos podem guardar tanto as efemérides pré quanto pós-processadas. A atitude é determinada por interpolação dos dados transmitidos.

Em função das coordenadas $(X, Y)_{N1}$ de cada nó da grade, determina-se o vetor de visada no sistema de referência do sensor (u_{SRS}).

Nos casos em que o sistema satélite-sensor permite visadas oblíquas, o vetor de visada deve incorporar a rotação do espelho (θ):

$$u_{SRS-\theta} = M_{\theta} \cdot u_{SRS} \quad (2.3)$$

Conforme descrito com mais detalhe no apêndice A (Sistemas de Coordenadas), o vetor de visada sofre sucessivas transformações, até chegar ao sistema de referência geocêntrico (SRG):

$$u_{SRP} = M_{Bor} \cdot u_{SRS-\theta} \quad (2.4)$$

$$u_{SRO} = M_{Ati} \cdot u_{SRP} \quad (2.5)$$

$$u_{SRI} = M_{Eph} \cdot u_{SRO} \quad (2.6)$$

$$u_{SRG} = M_{Rot-TS} \cdot u_{SRI} \quad (2.7)$$

$$u_{SRD} = M_{Rot-Dat} \cdot u_{SRG} \quad (2.8)$$

A posição do satélite sofre apenas duas transformações, passando sucessivamente do Sistema de Referência Geocêntrico Inercial (SRI) para os Sistemas de Referência Geocêntrico (SRG) e do *Datum* (SRD):

$$\begin{bmatrix} X_{Sat} \\ Y_{Sat} \\ Z_{Sat} \end{bmatrix}_{SRG} = M_{Rot-TS} \cdot \begin{bmatrix} X_{Sat} \\ Y_{Sat} \\ Z_{Sat} \end{bmatrix}_{SRI} \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} X_{Sat} \\ Y_{Sat} \\ Z_{Sat} \end{bmatrix}_{SRD} = M_{Rot-Dat} \cdot \begin{bmatrix} X_{Sat} \\ Y_{Sat} \\ Z_{Sat} \end{bmatrix}_{SRG} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}_{Dat} \quad (2.10)$$

De posse do vetor de visada e das coordenadas referentes à posição do satélite, todos relacionados ao SRD, constrói-se a reta suporte da visada:

$$\frac{X - X_{Sat,SRD}}{u_{SRD,x}} = \frac{Y - Y_{Sat,SRD}}{u_{SRD,y}} = \frac{Z - Z_{Sat,SRD}}{u_{SRD,z}} = p \quad (2.11)$$

ou

$$\begin{aligned} X &= X_{Sat,SRD} + p \cdot u_{SRD,x} \\ Y &= Y_{Sat,SRD} + p \cdot u_{SRD,y} \\ Z &= Z_{Sat,SRD} + p \cdot u_{SRD,z} \end{aligned} \quad (2.12)$$

O ponto geográfico $(X_P, Y_P, Z_P)_{SRD}$ relacionado ao *pixel* é a interseção da reta de visada (equação 2.12) com o elipsóide de revolução (equação 2.13):

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{a^2} + \frac{Z^2}{b^2} = 1 \quad (2.13)$$

São adotados dois elipsóides de revolução, um deles auxiliar para minimizar as distorções provocadas pelo relevo. O elipsóide auxiliar dista aproximadamente de um valor igual à altitude média da cena. Ele é usado na determinação do ponto de interseção com a reta de visada (figura 2.10).

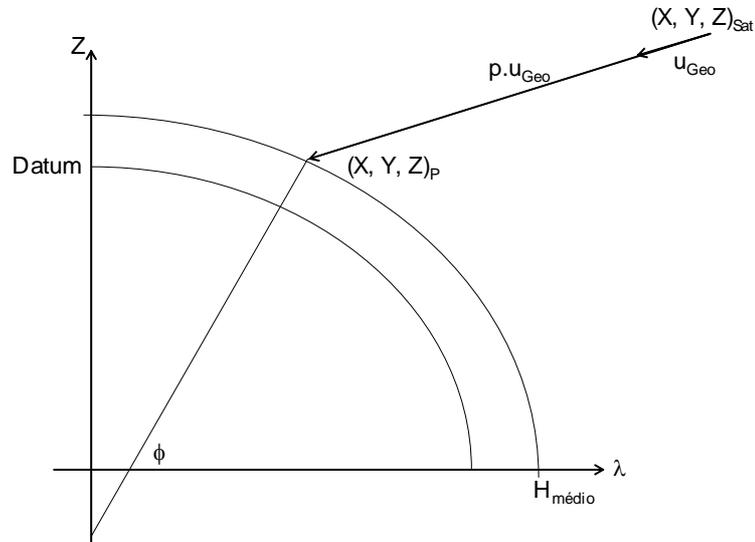


FIGURA 2.10 – Mapeamento direto nível 2.

Em seguida, é realizada a conversão de coordenadas retangulares espaciais para geodésicas (latitude, longitude e altitude), conforme descrito no apêndice A (Sistemas de Coordenadas) e, posteriormente, são calculadas as coordenadas plano-retangulares $(E, N)_{N2}$ em função da projeção cartográfica selecionada pelo usuário. Nestes casos, o elipsóide está relacionado ao *datum* previamente selecionado. A transformação de coordenadas planas de projeção em coordenadas de imagem nível 2 está descrita no apêndice B (Plano-Imagem).

$$\begin{aligned} \mathfrak{T}_D : \mathfrak{R}^2 &\Rightarrow \mathfrak{R}^3 \Rightarrow \mathfrak{R}^3 \Rightarrow \mathfrak{R}^2 \Rightarrow \mathfrak{R}^2 \\ (X_1, Y_1) &\rightarrow (X, Y, Z)_{geo} \rightarrow (\phi, \lambda, H) \rightarrow (E_2, N_2) \rightarrow (X_2, Y_2) \end{aligned} \quad (2.14)$$

2.2.2 Mapeamento Direto Nível 3

O mapeamento direto para o nível 3 pode ser dividido em duas partes: a primeira relaciona o plano-imagem nível 1 com o plano-imagem nível 2 $((X, Y)_{N1} \rightarrow (E, N)_{N2})$, de forma idêntica à apresentada na seção anterior. A segunda relaciona o plano-imagem nível 2 com o plano-imagem nível 3 $((E, N)_{N2} \rightarrow (E, N)_{N3})$.

Como a primeira parte é idêntica à apresentada na seção 2.2.1 (Mapeamento Direto Nível 2), esta seção vai abordar apenas a segunda parte, onde são incorporados os pontos de controle. A figura 2.11 sintetiza o processo relativo ao mapeamento direto nível 3.

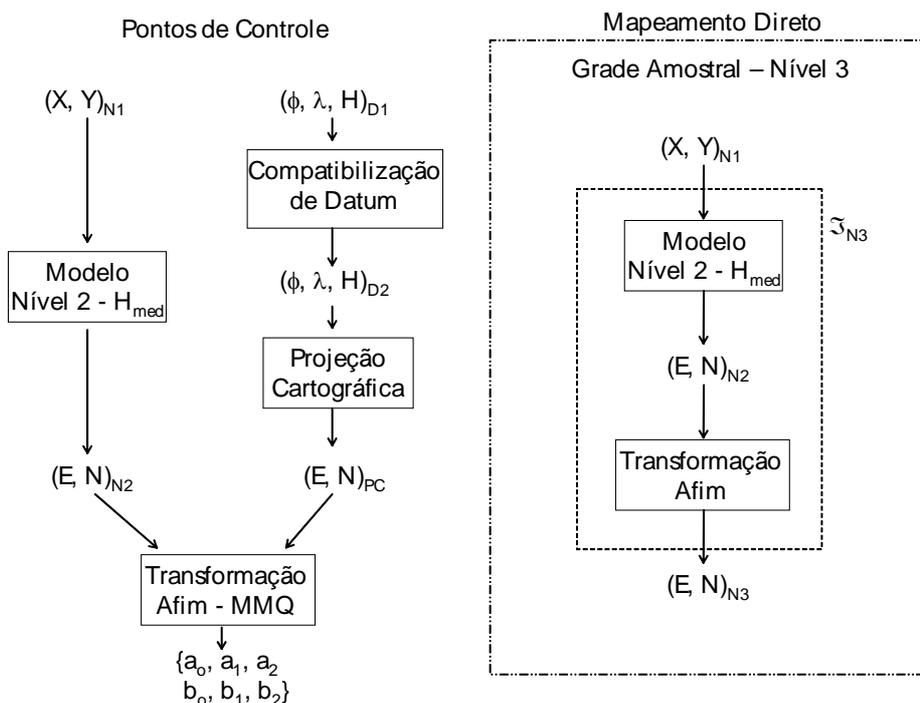


FIGURA 2.11 – Processo relativo ao mapeamento direto nível 3.

Pontos de controle são feições do terreno, identificáveis na imagem, para os quais são conhecidas as coordenadas geodésicas (ϕ_d, λ, H) , num determinado *datum*, com precisão superior às do modelo de geração de imagens nível 2, e que serão tomadas como referência, ou verdade terrestre. As coordenadas geodésicas são transformadas em coordenadas planas de projeção, levando-se em conta, inclusive, possíveis diferenças nos *data* (o *datum* relativo à geração de uma imagem depende de uma escolha do usuário, enquanto o *datum* de cada ponto de controle é fixo, porém podendo variar de ponto para ponto).

A identificação dos pontos de controle na imagem pode ser automática ou manual. No sistema de processamento de imagens da estação terrena do INPE a identificação é

automática, usando um banco de dados de pontos de controle, que armazena janelas de imagem em torno do ponto de controle e as coordenadas, com as todas as referências, deste ponto.

Essa identificação fornece as coordenadas de imagem, que podem ser de nível 1 ou 2. No caso de coordenadas de nível 1, aplica-se o modelo de mapeamento direto para determinação das coordenadas planas de projeção em nível 2.

Dessa forma, para cada ponto de controle são conhecidos dois pares de coordenadas planas de projeção: os obtidos pelo modelo de correção geométrico $(E, N)_{N2}$ e os levantados externamente $(E, N)_{PC}$.

A partir do conjunto de pontos de controle, determina-se uma função de transformação do plano-imagem nível 2 no plano-imagem de referência (ou nível 3). Esta transformação será sempre um polinômio a duas variáveis, podendo este ser racional.

$$\begin{aligned} T_3 : \mathfrak{R}^2 &\Rightarrow \mathfrak{R}^2 \\ (E_2, N_2) &\rightarrow (E_3, N_3) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Geralmente usa-se uma transformação polinomial de primeiro grau (afim) para relacionar os dois planos imagem. Esta transformação necessita de pelo menos três pontos de controle, mas é recomendável o uso de pelo menos seis pontos bem distribuídos pelo plano-imagem nível 2.

$$\begin{aligned} X_3 &= a_0 + a_1 \cdot X_2 + a_2 \cdot Y_2 \\ Y_3 &= b_0 + b_1 \cdot X_2 + b_2 \cdot Y_2 \end{aligned} \quad (2.16)$$

Os parâmetros da transformação são calculados uma única vez e aplicados a todos os nós da grade do mapeamento direto. A transformação de coordenadas planas de projeção em coordenadas de imagem nível 3 está descrita no apêndice B (Plano-Imagem).

$$\begin{aligned} \mathfrak{T}_D : \mathfrak{R}^2 &\Rightarrow \mathfrak{R}^3 \Rightarrow \mathfrak{R}^3 \Rightarrow \mathfrak{R}^2 \Rightarrow \mathfrak{R}^2 \Rightarrow \mathfrak{R}^2 \\ (X_1, Y_1) &\rightarrow (X, Y, Z)_{geo} \rightarrow (\phi, \lambda, H) \rightarrow (E_2, N_2) \rightarrow (E_3, N_3) \rightarrow (X_3, Y_3) \end{aligned} \quad (2.17)$$

2.2.3 Mapeamento Direto Nível 4

O mapeamento direto para o nível 4 guarda uma certa semelhança em relação ao do nível 3. Até porque, apesar da imagem nível 4 ser ortorretificada, o mapeamento direto não faz uso do MNET para eliminação das distorções causadas pelo relevo. Ou seja, as coordenadas resultantes nesse processo ainda poderiam ser consideradas de nível 3.

Na relação entre os níveis 1 e 2 apresentadas anteriormente, em um determinado ponto adota-se um elipsóide auxiliar relativo à altitude média da imagem. Neste caso, são utilizados pelo menos dois elipsóides auxiliares, um relativo à altitude mínima e outro à altitude máxima da imagem, podendo-se estratificar ainda mais, dependendo da topografia do terreno.

Em seguida, são estabelecidas tantas relações entre o plano-imagem nível 1 e plano-imagem nível 2 quantos forem os elipsóides auxiliares $((X, Y)_{N1} \rightarrow (E, N)_{N2,Hi})$, de forma idêntica à apresentada nas seções anteriores, gerando-se para cada nó da grade amostral do plano-imagem nível 1 diversos pares de coordenadas relativos ao plano-imagem nível 2.

A figura 2.12 apresenta uma visão geral do mapeamento direto em nível 4. Ele é na verdade uma sucessão de modelos nível 3, um para cada elipsóide auxiliar adotado.

Entretanto, o uso dos pontos de controle difere ligeiramente do modelo empregado no nível 3. Naquele caso, as coordenadas de imagem de todos os pontos de controle eram transformadas em coordenadas planas de projeção $(\mathfrak{S}_{D,N2})$ com um único elipsóide auxiliar, o mesmo empregado nos nós da grade (altitude média). Já aqui, o elipsóide auxiliar de cada ponto de controle leva em consideração a altitude geométrica deste ponto. Há, portanto, um elipsóide auxiliar para cada ponto de controle.

Este procedimento evita que as transformações polinomiais entre os diferentes conjuntos de pares de coordenadas de projeção compensem de alguma forma a distorção causada pelo relevo. Esta apenas será corrigida quando da associação do MNET com cada ponto da imagem ortorretificada.

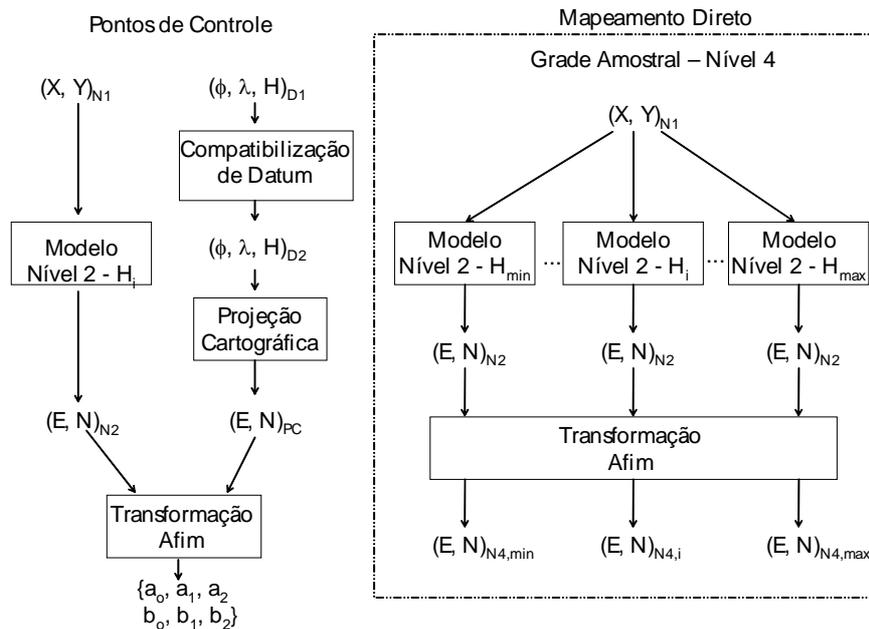


FIGURA 2.12 – Processo relativo ao mapeamento direto nível 4.

O cálculo dos parâmetros das transformações polinomiais segue o apresentado na seção anterior. Esta única transformação é aplicada aos diversos pares de coordenadas planas de projeção dos nós da grade.

2.2.4 Mapeamento Inverso Níveis 2 e 3

Os mapeamentos inversos dos níveis 2 e 3 são idênticos. Diferentemente do mapeamento direto, o mapeamento inverso é executado para todos os pontos de uma imagem processada em nível 2. Como foi dito anteriormente, este mapeamento é executado por meio de interpolações ou iterações sobre o resultado do mapeamento direto. O modelo interpolativo apresenta resultados satisfatórios e tem melhor desempenho computacional. Este modelo usa a relação entre as coordenadas dos nós das grades do mapeamento direto (figura 2.7). A figura 2.13 apresenta esse modelo de forma esquemática.

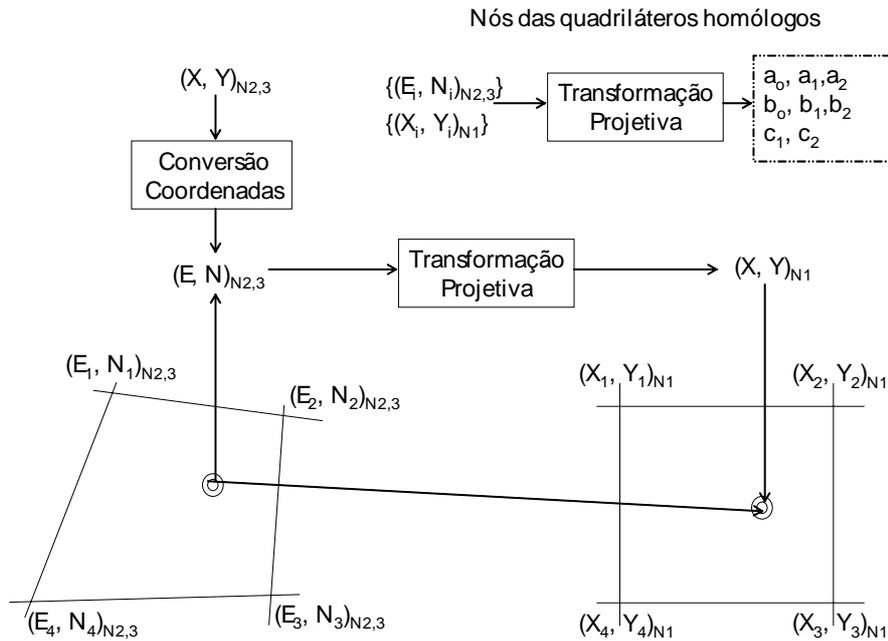


FIGURA 2.13 – Mapeamento inverso níveis 2 ou 3.

O primeiro passo é definir o plano-imagem nível 2 ou 3. Nas imagens orientadas para o norte, este plano é o menor retângulo espacial (E_W , E_E , N_N e N_S) que atende os requisitos (i), (ii) e, preferencialmente, um dos requisitos (iii) ou (iv) (eles são mutuamente exclusivos) (figura 2.14).

- i. contém os quatro cantos do plano-imagem nível 1;
- ii. as diferenças entre as coordenadas E_W e E_E e entre N_N e N_S devem ser valores múltiplos das dimensões do *pixel* da imagem nível 2, que definirão o tamanho (número de linhas – N – e colunas – M) da imagem nível 2;

$$\begin{aligned} E_E - E_W &= M \cdot \Delta_E \\ N_N - N_S &= N \cdot \Delta_N \end{aligned} \tag{2.18}$$

- iii. as coordenadas das bordas dos *pixels* devem apresentar valores múltiplos das dimensões destes *pixels*;

- iv. as coordenadas dos centros dos *pixels* devem apresentar valores múltiplos das dimensões destes *pixels*.

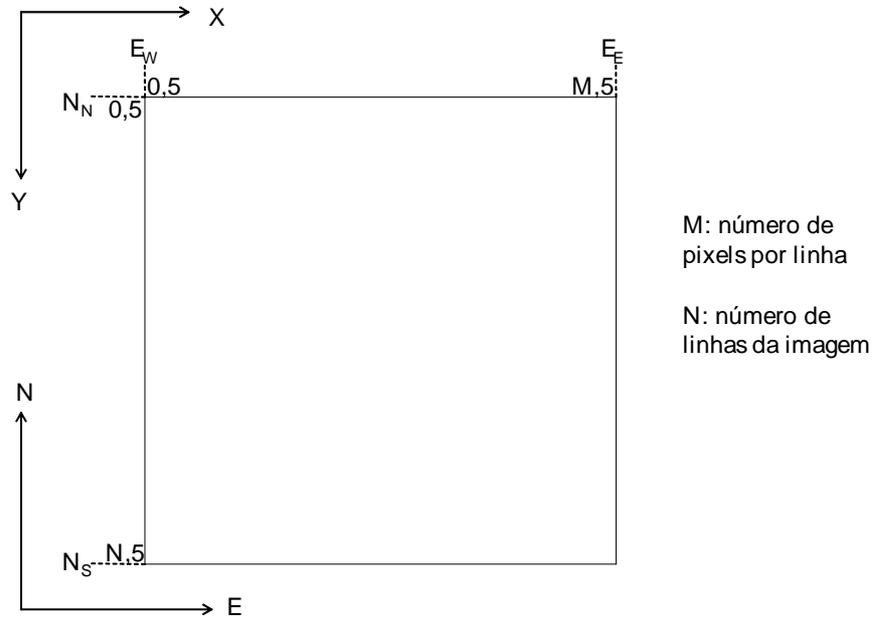


FIGURA 2.14 – Plano-imagem nível 2 ou 3.

Para cada *pixel* da imagem nível 2 ou 3, são calculadas as coordenadas plano-retangulares de projeção para o centro do *pixel* $(E, N)_{N2,3}$ em função das coordenadas do canto superior esquerdo $(E_W, N_N)_{N2,3}$, das dimensões dos *pixels* da imagem nível 2 ou 3 (d_E, d_N) e das coordenadas no plano-imagem nível 2 ou 3 $(X, Y)_{N2,3}$ (ver apêndice B, Plano-Imagem).

De posse destas coordenadas, identifica-se o quadrilátero da grade irregular no plano-imagem nível 2 ou 3 (figura 2.7) que contém este ponto, e o retângulo correspondente no plano-imagem nível 1, para permitir o cálculo das coordenadas de imagem bruta. Esta busca deve levar em consideração o resultado do ponto vizinho anteriormente pesquisado.

$$\begin{aligned} \mathfrak{T}_I : \mathfrak{R}^2 &\Rightarrow \mathfrak{R}^2 \Rightarrow \mathfrak{R}^2 \\ (X_2, Y_2) &\rightarrow (E_2, N_2) \rightarrow (X_1, Y_1) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Pela abordagem adotada no mapeamento direto, se um ponto não pertencer a nenhum retângulo significa que ele deve ter um tratamento diferenciado. No caso dos sensores de varredura eletrônica, ele não fará parte do plano-imagem nível 1, e deve ser considerado como margem (branco ou, preferencialmente, preto), já que neste caso adota-se o conceito de aquisição contínua no tempo.

No caso dos sensores de varredura mecânica, ele tanto pode ser um ponto de margem como um ponto num intervalo entre varreduras sucessivas.

A partir dos cantos do retângulo (N1) e dos cantos do quadrilátero associado (N2 ou N3), determina-se os parâmetros da transformação projetiva que relaciona o plano-imagem nível 2 (ou 3) com o plano-imagem nível 1.

$$\begin{aligned} T_p : \mathfrak{R}^2 &\Rightarrow \mathfrak{R}^2 \\ (E_2, N_2) &\rightarrow (X_1, Y_1) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Há um conjunto de oito parâmetros de transformação projetiva para cada retângulo. Cada conjunto é calculado uma única vez. De posse desses parâmetros, calcula-se as coordenadas de imagem nível 1.

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{a_0 + a_1 \cdot E_2 + a_2 \cdot N_2}{1 + c_1 \cdot E_2 + c_2 \cdot N_2} \\ Y_1 &= \frac{b_0 + b_1 \cdot E_2 + b_2 \cdot N_2}{1 + c_1 \cdot E_2 + c_2 \cdot N_2} \end{aligned} \quad (2.21)$$

2.2.5 Mapeamento Inverso Nível 4

O mapeamento inverso do nível 4 é semelhante aos dos níveis 2 e 3. Mas é nessa etapa que o MNET é empregado para ortorretificar a imagem.

A figura 2.15 apresenta o esquema relativo ao mapeamento inverso nível 4.

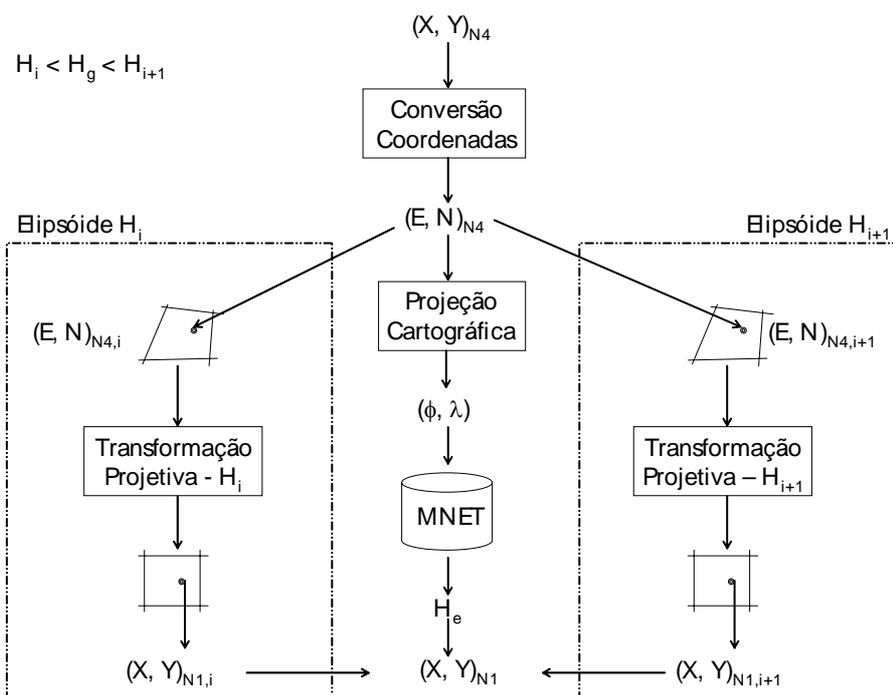


FIGURA 2.15 – Mapeamento inverso nível 4.

Para cada *pixel* da imagem nível 4, são determinadas as coordenadas plano-retangulares de projeção para o centro do *pixel* $(E, N)_{N4}$ (ver seção anterior e apêndice B, Plano-Imagem).

As coordenadas planas de projeção nível 4 são transformadas em coordenadas geodésicas. A partir dessas coordenadas, acessa-se o MNET para obtenção da altitude ortométrica ou geoidal (H_o) deste ponto. Esta altitude, depois de convertida para geométrica ou elipsoidal (H_g), é a chave para a interpolação das coordenadas de nível 1. Caso não haja compatibilidade entre o *datum* referente à imagem nível 4 e o MNET, será necessária uma transformação adicional (ver apêndice A, Sistemas de Coordenadas) para permitir o acesso ao mesmo.

Em seguida, determina-se as duas grades que serão usadas no processo de obtenção das coordenadas referentes ao plano-imagem nível 1. O intervalo definido pelas altitudes destas grades deve conter a altitude do ponto em questão ($H_i < H_g < H_{i+1}$).

Definidas as grades, identifica-se os dois quadriláteros do plano-imagem nível 4 que contêm este ponto, com os respectivos retângulos no plano-imagem nível 1. Estas buscas devem levar em consideração os resultados do ponto vizinho anteriormente abordado.

A partir das relações entre os quadriláteros e os retângulos, calcula-se dois pares de coordenadas de imagem nível 1 $(X, Y)_{N1,Hi}$ e $(X, Y)_{N1,Hi+1}$.

A altitude geométrica extraída do MNET volta a ser usada, agora para a interpolação linear das coordenadas do plano-imagem nível 1.

$$(X, Y)_{N1} = \frac{(H_{i+1} - H_e) \cdot (X, Y)_{N1,i} + (H - H_i) \cdot (X, Y)_{N1,i+1}}{H_{i+1} - H_i} \quad (2.22)$$

2.2.6 Reamostragem

O processo de reamostragem é o que define o nível de cinza que será associado a um *pixel* de um produto gerado, seja ele do nível 2, 3 ou 4.

As duas seções anteriores apresentaram os modelos que associam um *pixel* de um produto com um *pixel* de uma imagem nível 1. Os níveis de cinza estão armazenados na imagem nível 0 e é, neste instante, que se usa a relação entre os níveis 1 e 0 para buscar o *pixel* em seu estado bruto.

Deve-se destacar que o mapeamento inverso fornece coordenadas num domínio contínuo, enquanto as coordenadas de imagem são discretas. Isso significa que os níveis de cinza devem ser interpolados. Os interpoladores mais comumente empregados são: vizinho mais próximo, bi-linear e bi-cúbico.

No sistema da estação terrena do INPE, o interpolador é definido pelo usuário e é elemento obrigatório do arquivo de pedido (WOF – *Work Order File*).

2.2.7 Polinômios Racionais

O uso de polinômios racionais nos processos de ortorretificação de imagens de satélite está diretamente relacionado ao advento das imagens de alta resolução espacial (DIAL and GRODECKI, 2002).

Estas imagens, diferentemente das imagens nadir de sensores de média resolução espacial, sofrem forte degradação devido ao relevo. Geralmente, as imagens de alta resolução são obtidas em visada oblíqua, o que agrava ainda mais a distorção causada pela topografia do terreno.

A melhor e mais eficiente maneira de se ortorretificar uma imagem de satélite é incluir um Modelo Numérico de Elevação do Terreno (MNET) no processo de correção geométrica, junto com os dados brutos de imagem.

Os operadores dos satélites oferecem esta possibilidade, mas o custo do processo é muito elevado, dificultando a aquisição deste tipo de produto. Além disso, a qualidade geométrica final da imagem depende sobre-maneira das qualidades do MNET e dos pontos de controle, que na grande maioria dos casos, devem ser fornecidos pelo cliente (comprador da imagem). Isso causa um problema de responsabilidade, pois na visão do operador, possíveis problemas na imagem seriam decorrentes das qualidades do MNET e dos pontos de controle, enquanto na visão do cliente ocorreriam por conta do processo de ortorretificação.

Em função disso, os operadores passaram a oferecer parâmetros que permitem a ortorretificação pelo próprio cliente. O uso de RPC's é uma alternativa a abordagem ótima. Ao invés de abrir o modelo de geometria do sensor e fornecer os parâmetros orbitais (efemérides e atitude), os operadores fornecem coeficientes de polinômios racionais (RPC – *Rational Polynomial Coefficients*), os quais permitem mapear o plano-imagem ortorretificado com o plano-imagem geometricamente corrigido. Diversos *softwares* comerciais dispõem de funcionalidade que permite a ortorretificação a partir do trinômio imagem-MNET-RPC (alguns ainda permitem a adição de pontos de controle). No caso das imagens Ikonos, por exemplo, o produto geometricamente

corrigido acrescido dos coeficientes polinomiais racionais é conhecido como *Geo Ortho Kit*.

Os polinômios racionais consistem uma alternativa para a ortorretificação em relação aos modelos apresentados anteriormente neste capítulo. Consistem, também, num processo que pode ser transferido para o usuário, pois os coeficientes dos polinômios guardam todas as informações necessárias para ortorretificar uma imagem.

Estes polinômios relacionam um ponto no terreno, por meio de suas coordenadas geodésicas (latitude – ϕ_d , longitude – λ e altitude – H), com um ponto da imagem não ortorretificada (mas geometricamente corrigida – nível 2 ou 3), por meio de suas coordenadas de imagem (linha – X e coluna – Y). Foi escolhido o polinômio de terceiro grau (P^3), de \mathfrak{R}^3 em \mathfrak{R}^2 , totalizando setenta e oito coeficientes (DIAL, 2000):

$$(X, Y)_{N2,3} = P^3(\phi, \lambda, H)_{N4} \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} X &= \frac{a_o + a_1.\phi + a_2.\lambda + a_3.H + \dots + a_{17}.\phi^3 + a_{18}.\lambda^3 + a_{19}.H^3}{1 + c_1.\phi + c_2.\lambda + c_3.H + \dots + c_{17}.\phi^3 + c_{18}.\lambda^3 + c_{19}.H^3} \\ Y &= \frac{b_o + b_1.\phi + b_2.\lambda + b_3.H + \dots + b_{17}.\phi^3 + b_{18}.\lambda^3 + b_{19}.H^3}{1 + d_1.\phi + d_2.\lambda + d_3.H + \dots + d_{17}.\phi^3 + d_{18}.\lambda^3 + d_{19}.H^3} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Esta abordagem é ligeiramente diferente do visto anteriormente, pois relaciona diretamente o nível 2, ou 3, com o nível 4.

Em relação à topografia do terreno, para o cálculo dos RPC's é necessário apenas o conhecimento da altitude mínima e máxima da região da imagem.

Durante o processo de geração da imagem em nível 2 (ou 3), é estabelecida uma relação entre coordenadas de imagem nível 1 e coordenadas de projeção cartográfica (mapeamento direto), onde um elipsóide auxiliar relativo à altitude média é empregado (ver seções 2.2.1, Mapeamento Direto Nível 2 e 2.2.2, Mapeamento Direto Nível 3). Em seguida, estas são convertidas para coordenadas de imagem nível 2 (ver apêndice B, Plano-Imagem).

Para o cálculo dos RPC's, esta relação é repetida diversas vezes, para diferentes elipsóides auxiliares, com altitudes variando da altitude mínima à máxima. Porém, nestes casos não há necessidade de se determinar coordenadas planas de projeção. A relação termina nas coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude). Para cada elipsóide auxiliar, trabalha-se com uma grade amostral diferente.

Para cada nó da grade há um par de coordenadas de imagem (nível 2 ou 3) e um conjunto de coordenadas geodésicas, obtidas para diferentes altitudes. Os coeficientes racionais são calculados por um ajustamento por mínimos quadrados sobre a equação 2.24 para todos os nós das diferentes grades amostrais (MACHADO E SILVA, 2007).

A figura 2.16 apresenta de forma esquemática o modelo relativo ao mapeamento direto na ortorretificação por polinômios racionais.

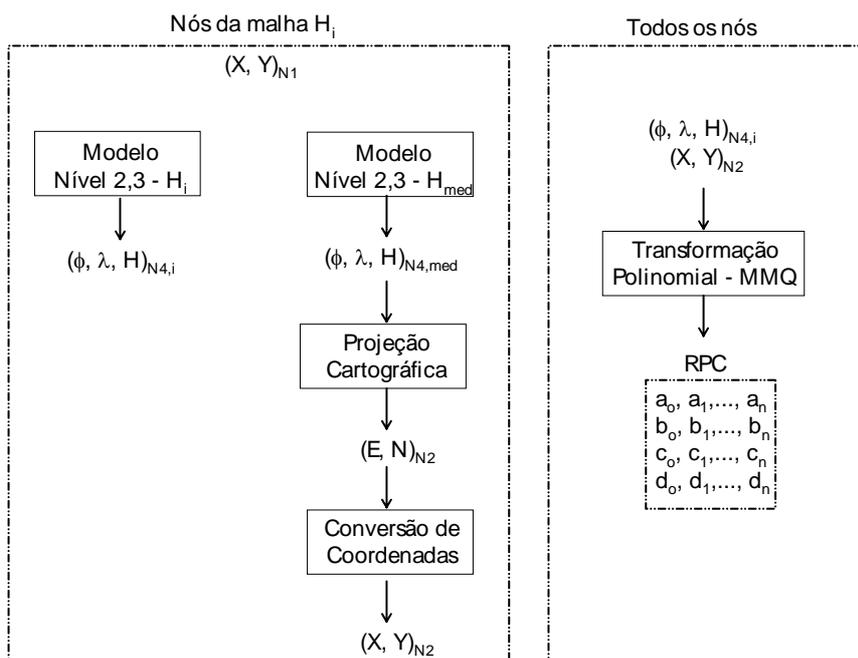


FIGURA 2.16 – Processo relativo ao mapeamento direto nível 4, com RPC.

No passo relativo ao mapeamento inverso, para cada *pixel* da imagem nível 4, determina-se as coordenadas plano-retangulares de projeção para o centro do *pixel* (E, N)_{N4} (apêndice B, Plano-Imagem) e, em seguida, as coordenadas geodésicas (phi, lambda)_{N4} (apêndice A, Sistemas de Coordenadas).

De posse destas coordenadas, acessa-se o MNET para obtenção da altitude ortométrica deste ponto e com os RPC's determina-se o *pixel* da imagem nível 2 (ou 3) que fornecerá o nível de cinza (equação 2.24). Conforme visto na seção 2.2.5 (Mapeamento Inverso Nível 4), caso não haja compatibilidade entre o *datum* referente à imagem nível 4 e o MNET, será necessária uma transformação adicional (ver apêndice A, Sistemas de Coordenadas) para permitir o acesso ao mesmo.

$$\begin{aligned} \mathfrak{T}_{RPC} : \mathfrak{R}^2 &\Rightarrow \mathfrak{R}^2 \Rightarrow \mathfrak{R}^3 \Rightarrow \mathfrak{R}^2 \\ (X_4, Y_4) &\rightarrow (E_4, N_4) \rightarrow (\phi, \lambda, H) \rightarrow (X_3, Y_3) \end{aligned} \quad (2.25)$$

A figura 2.17 sintetiza o mapeamento inverso no processo de ortorretificação por polinômios racionais.

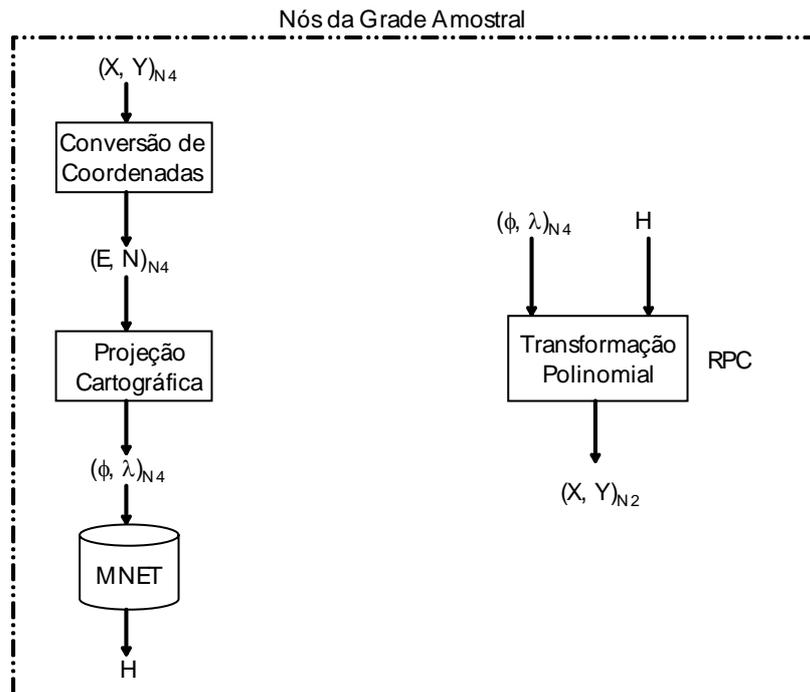


FIGURA 2.17 – Processo relativo ao mapeamento inverso nível 4, com RPC.

O processo de reamostragem se dá por interpolação dos níveis de cinza do *pixels* vizinhos, conforme apresentado em 2.2.6 (Reamostragem).

CAPÍTULO 3

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA GEOMETRIA DAS IMAGENS

Uma tarefa de suma importância inerente à operação de uma estação terrena de satélites de sensoriamento remoto é a avaliação sistemática da qualidade geométrica dos diferentes produtos gerados.

A avaliação geométrica deve observar dois diferentes aspectos: as geometrias interna e externa das imagens. A partir da análise da geometria interna é possível estabelecer especificação sobre a qualidade de observações realizadas diretamente sobre as imagens, tais como forma, escala, área, distância e ângulos. Se resultados sobre forma e ângulos forem satisfatórios, significa que um ajuste na escala trará resultados positivos para as medições de área e distância também. Porém, se não for possível alcançar bons resultados quanto a estes dois parâmetros, a qualidade da geometria interna estará comprometida.

A avaliação da geometria externa oferece parâmetros sobre a qualidade da localização geográfica de cada ponto da imagem. Uma imagem pode apresentar uma excelente qualidade na geometria interna, ao mesmo tempo, estar transladada ou rotacionada em relação à verdade terrestre, impedindo que se possa obter coordenadas geográficas precisas diretamente da imagem.

Há duas escolas com abordagens diferentes sobre como avaliar a qualidade geométrica das imagens, a francesa e a americana. A francesa calcula diversos parâmetros diretamente das coordenadas dos pontos de controle: deslocamento, variação do comprimento e anisomorfismo. O primeiro parâmetro indica a qualidade da geometria externa, enquanto os demais tratam da geometria interna.

A escola americana trabalha com transformações polinomiais lineares, onde as principais são a de similaridade e a de afinidade. A primeira fornece os parâmetros de deslocamento (translação), rotação e escala (os dois primeiros ligados à geometria

externa e o último à geometria interna). A segunda fornece parâmetros de deslocamento, rotação, escala em duas direções ortogonais e cisalhamento (os dois primeiros ligados à geometria externa e os demais à geometria interna).

Conforme apresentado no Capítulo 2 (seções 2.2.1 a 2.2.3), diversos dados são usados nos modelos de correção geométrica. Todos eles são possíveis fontes de distorção geométrica.

O processo de correção geométrica começa com a definição de um vetor de visada referente ao sistema de coordenadas do sensor. Este vetor é função das coordenadas de imagem de cada *pixel* e de parâmetros que definem a geometria de visada (modelo do sensor). Estes parâmetros sofrem lentas variações ao longo do tempo, e isso já foi comprovado na extensa vida do satélite Landsat-5, quando foram alterados do modo SAM (*Scan Angle Monitor*) para o modo *bumper*. O modo SAM define o perfil do espelho na época do lançamento. No projeto do sensor, já era prevista a possibilidade de ocorrer uma degradação na mecânica do espelho responsável pela varredura. Nesse caso, o modo de operação do sensor poderia ser alterado para *bumper*.

O modo SAM é baseado num dispositivo eletro-ótico que registra os instantes em que o espelho de varredura inicia; passa pelo ponto central e encerra a varredura. Dessa forma, baseado no tempo real de varredura, em cada metade, é possível corrigir a equação nominal do perfil do espelho. O modo *bumper* registra apenas a inversão do movimento do espelho: de direto para reverso e vice-versa.

Ainda no campo dos parâmetros de calibração geométrica, os ângulos de *boresight*, uma vez bem determinados, não contribuem muito para a degradação da qualidade geométrica. Além disso, eles não devem sofrer variações significativas ao longo da vida útil do satélite, a menos que esta supere em muito ao esperado, como é o caso do satélite Landsat-5. Neste caso, se as alterações não forem detectadas, passam a ser mais uma fonte de distorção geométrica.

Cada *pixel* é associado a um tempo de aquisição (*time-code*). Aliás, este é outra fonte de distorção de imagem, uma vez que é inicialmente vinculado a uma varredura, que representa um sistema discreto.

Este problema cresce no sentido inverso da frequência de determinação do *time-code* e na razão direta do número de linhas por varredura. Ou seja, ele tende a ser mais significativo nos sensores de varredura mecânica, como o TM-Landsat (16 linhas por varredura), do que nos sensores de varredura eletrônica, como o CCD-CBERS (1 linha por varredura).

Os parâmetros orbitais representam uma das principais, senão a principal, fontes de distorção geométrica. Os dois primeiros satélites da série CBERS apresentavam sistema de controle de atitude e órbita de qualidade inferior aos dos satélites das séries Landsat e Spot. Isto reflete diretamente na qualidade geométrica das imagens geradas pelos sensores destes satélites.

Para superar este problema, os futuros satélites CBERS terão novos sensores, como o GPS (*Global Positioning System*), que permitirá a determinação das efemérides com maior precisão, e o sensor estelar, que auxiliará no cálculo mais preciso da atitude do satélite.

Resumindo, as principais fontes de distorção geométrica relacionadas aos sensores são:

- Geometria de visada (modelo do sensor);
- Ângulos de *boresight*.

E as principais fontes relacionadas às plataformas são:

- Efemérides;
- Atitude;
- *Time-code*.

O modelo de correção geométrica pressupõe um modelo de referência para a Terra. A abordagem mais simples, usada nos níveis 2 e 3 de processamento, adota um elipsóide de revolução para representar a Terra.

Este modelo auxilia a reduzir duas fontes de distorção presentes nos dados brutos: a esfericidade e a rotação da Terra. Entretanto, ele não representa a verdadeira topografia do terreno, ou seja, não elimina a distorção causada pelo relevo. Porém, a adoção de um elipsóide que represente a altitude média da região da imagem ajuda a reduzir este tipo de distorção, conforme apresentado na seção 3.8 (Atitude).

Para imagens em visada vertical, ou nadir, de sensores de média ou baixa resolução espacial, caso de todas as imagens dos satélites da série Landsat, essa solução é eficiente e satisfatória. Porém, nas demais situações, como, por exemplo, nas imagens CCD-CBERS em visada oblíqua e em todas as imagens HRC-CBERS, é necessário representar de forma mais precisa a superfície terrestre. Neste caso, o mais recomendável é a adoção de modelos numéricos de elevação do terreno (MNET). Assim, as principais fontes de distorção geométrica relacionadas à Terra são:

- Esfericidade;
- Rotação;
- Relevo.

Nos níveis mais avançados, onde são usados elementos auxiliares, tais como pontos de controle, MNET e coeficientes de polinômios racionais (RPC), estes passam a constituir novas fontes de degradação geométrica. Isto pode soar estranho, uma vez que eles são empregados para melhorar a qualidade geométrica das imagens. Mas, ao mesmo tempo em que reduzem diversas fontes de distorção, introduzem outras, decorrentes dos erros inerentes a esses tipos de dados, o que faz que só sejam recomendáveis se o balanço for positivo.

Os pontos de controle devem apresentar coordenadas geográficas com precisão pelo menos duas vezes melhor que a esperada para a imagem. A densidade e, principalmente,

a distribuição espacial dos pontos de controle também exercem forte influência sobre a qualidade geométrica do produto final. Pontos de controle de baixa qualidade podem piorar a qualidade geométrica das imagens.

Os modelos numéricos de elevação do terreno devem apresentar resolução e precisão altimétricas compatíveis com o sensor. Além disso, a resolução da grade do MNET não deve ser inferior à resolução da grade amostral do modelo de correção geométrica. Em regiões de relevo acidentado, problemas no registro entre imagem e MNET podem causar o insucesso do processo de ortorretificação da imagem.

Os RPC's devem ser calculados levando-se em conta as altitudes mínima e máxima da imagem. Sempre que possível, deve-se restringir a área de determinação dos coeficientes à área geográfica da imagem. Em extensas áreas, com relevo acidentado, a adoção de polinômios racionais podem não acarretar em melhoras significativas na qualidade geométrica das imagens. Portanto, as principais fontes de distorção geométrica relacionadas a elementos externos são:

- Pontos de controle;
- MNET;
- RPC.

Além dessas, as simplificações do modelo de correção geométrica implicam em novas fontes de distorção. Porém, neste caso, são duas as causas de degradação da qualidade geométrica da imagem: o uso do modelo rígido apenas para os *pixels* de uma grade amostral, com o uso da interpolação linear para os demais *pixels*; e o uso de elipsóides auxiliares para interpolação da altitude no nível 4. No primeiro caso, a densidade desta grade tem que ser de tal ordem que torne desprezível esta distorção. No segundo, deve-se empregar tantos elipsóides auxiliares quantos sejam necessários para garantir um resultado preciso na interpolação.

Diante do exposto, foi observado o impacto de cada fonte de distorção na qualidade geométrica das imagens. Isto foi feito pela comparação de cenários, onde um destes é

considerado de referência e o outro é contaminado por ruído que representa a imprecisão ou degradação do valor de um ou mais parâmetros. Este conceito de cenários é a base da análise de imagens empregadas no sistema da estação terrena de satélites do INPE (ALMEIDA, 2007).

Nesta análise, os pontos relativos ao cenário de referência desempenham o papel dos pontos de controle, assumindo a condição de corretos, enquanto os pontos relativos ao cenário contaminado representam a imagem degradada.

Foram observadas duas abordagens diferentes, que convergiram para o mesmo resultado. A primeira é puramente analítica e trabalha sobre uma grade amostral distribuída regularmente sobre o plano-imagem nível 1. Na segunda, são geradas duas imagens, refletindo os dois cenários diferentes, e coletados pontos homólogos para comparação dos cenários.

Na primeira abordagem, define-se uma grade amostral regularmente espaçada no espaço imagem nível 1. Para cada nó dessa grade determina-se as coordenadas planas de projeção para o modelo relativo ao mapeamento direto de um determinado nível de processamento $(E, N)_{\text{ref}}$ (cenário 1) e as mesmas coordenadas resultantes do modelo contaminado por ruído $(E, N)_{\text{ruído}}$ (cenário 2).

Na segunda abordagem, gera-se uma imagem com os parâmetros normalmente usados no sistema de produção de imagens do INPE (cenário 1). Em seguida, contamina-se com ruído um ou mais parâmetros referentes ao modelo de correção geometria e gera-se uma nova imagem (cenário 2). De posse das duas imagens, identifica-se pontos homólogos nestas imagens e determina-se as coordenadas desses pontos. As coordenadas obtidas da imagem produzida no cenário 1 são as de referência, enquanto as obtidas da imagem gerada no cenário 2 (contaminado) são as coordenadas ruidosas.

Em ambas abordagens, compara-se os dois conjuntos de coordenadas (referência e ruidoso), determinando-se, então, o erro médio quadrático (EMQ) pela comparação direta das coordenadas, bem como a média dos desvios de cada ponto ξ_E e ξ_N .

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (E_{ref,i} - E_{ruído,i})^2 + (N_{ref,i} - N_{ruído,i})^2}{M}} \quad (3.1)$$

$$\xi_E = \frac{\sum_{i=1}^M (E_{ruído,i} - E_{ref,i})}{M} \quad (3.2)$$

$$\xi_N = \frac{\sum_{i=1}^M (N_{ruído,i} - N_{ref,i})}{M}$$

Em seguida, são aplicadas três transformações lineares (translação, similaridade e afim) sobre as coordenadas com ruído para análise do comportamento do erro médio quadrático (após essas transformações, cujos parâmetros são determinados pelo método dos mínimos quadrados, as médias dos desvios são nulas).

A figura 3.1 apresenta o esquema do processo de avaliação do impacto das diversas fontes de degradação na qualidade geométrica das imagens.

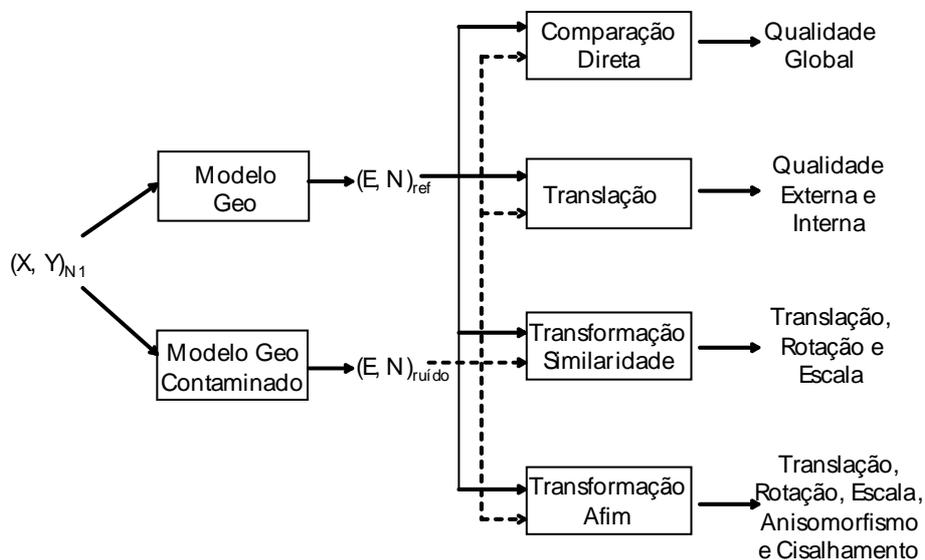


FIGURA 3.1 – Metodologia de avaliação geométrica.

Esse conjunto de resultados permite uma ampla avaliação da influência de cada componente em relação à qualidade geométrica final das imagens. A contaminação por ruído procura representar a precisão de cada componente do modelo de correção geométrica. Além disso, foi estipulado um limiar de dez por cento da resolução espacial do sensor para o erro médio quadrático após as transformações de similaridade (geometria interna das imagens em nível 2 de processamento) e afim (geometria interna das imagens em níveis 3 e 4 de processamento). Este limite visa alcançar uma imagem de nível 4 com qualidade geométrica total superior a duas vezes a resolução espacial, mesmo nas condições de relevo mais acidentado.

Considerando a distribuição de cada uma das distorções definidas no projeto de engenharia (atitude, efemérides, atraso do *time-code*, geometria de visada) pelas direções da varredura e transversal à varredura, chega-se a um erro médio quadrático próximo a um *pixel*, considerando o limiar estipulado. Adicione-se as contribuições do relevo e dos pontos de controle, e o resultado se aproximará do limite de duas vezes a resolução espacial.

Os resultados serão apresentados em tabelas onde as células contêm os valores dos erros médio quadráticos (EMQ) em metros (absoluto) e em GSD (*Ground Sample Distance*). Este último apresenta o erro de forma relativa, levando em consideração a resolução espacial do sensor. Em algumas tabelas, o erro médio (ξ) também será apresentado.

Na realidade, a resolução espacial está relacionada com o parâmetro IFOV (*Instantaneous Field Of View*). A dimensão no terreno associada ao IFOV varia em função da geometria de visada e à curvatura da Terra. Por esse motivo, adota-se o GSD (valor constante para todos os pontos da imagem) como representante da resolução espacial.

3.1 Geometria de Visada

Os sensores de varredura eletrônica apresentam geometria de visada mais estável que os sensores de varredura mecânica. Nestes últimos pode haver um desgaste dos mecanismos relativos ao espelho de varredura, alterando o modelo que relaciona cada

pixel com um ângulo de visada. Isto é previsto no projeto do satélite e tem maior probabilidade de ocorrer quando o satélite apresenta vida útil prolongada, como é o caso do satélite Landsat-5. O resultado na imagem é um cisalhamento na direção da órbita e uma distorção de escala ao longo das varreduras.

Nos satélites de varredura eletrônica pode ocorrer algum problema na montagem das barras de detetores, que implique em algum desalinhamento em relação ao plano focal, mas que é possível de ser devidamente medido durante a fase de integração e testes do satélite. O resultado seria o cisalhamento das imagens na direção da órbita, podendo este ser diferente para cada barra de detetores. Esse efeito é semelhante ao da degradação dos ângulos de *boresight* e não serão aqui analisados.

Além desse problema, pequenas variações na distância focal (f), causadas por variação de temperatura, desgaste do sistema ótico, entre outras, refletem no modelo de correção geométrica, afetando a qualidade geométrica das imagens. O efeito seria uma variação da escala apenas no sentido transversal à órbita, como se o *pixel* fosse retangular ao invés de quadrado. Isso decorre da característica de projeção cilíndrica associada à aquisição de imagens de satélite, ao invés de projeção cônica associada à aquisição de fotografias aéreas.

A figura 3.2 apresenta o efeito da variação da distância focal na formação da imagem. Neste exemplo, a distância focal sofre uma variação positiva ($\Delta f > 0$) e o resultado é uma redução em cada varredura (lado superior esquerdo da figura – A). Porém, não havendo variação nos demais parâmetros (tais como altitude e velocidade do satélite), haverá intervalos entre as varreduras adjacentes, conforme pode ser observado nas seqüências no lado direito desta figura (B e C). Esses intervalos são preenchidos por interpolação. Em conseqüência, observa-se uma variação de escala (redução da largura da imagem) apenas no sentido transversal à órbita (anisomorfismo) (lado inferior esquerdo da figura – D).

Caso a variação da distância focal fosse negativa, haveria uma ampliação de cada varredura, com ligeira sobreposição entre elas. O efeito final seria uma variação de escala (ampliação da largura da imagem) no sentido transversal à órbita.

Todos esses efeitos afetam mais a geometria interna da imagem, sendo praticamente imperceptíveis no posicionamento da mesma.

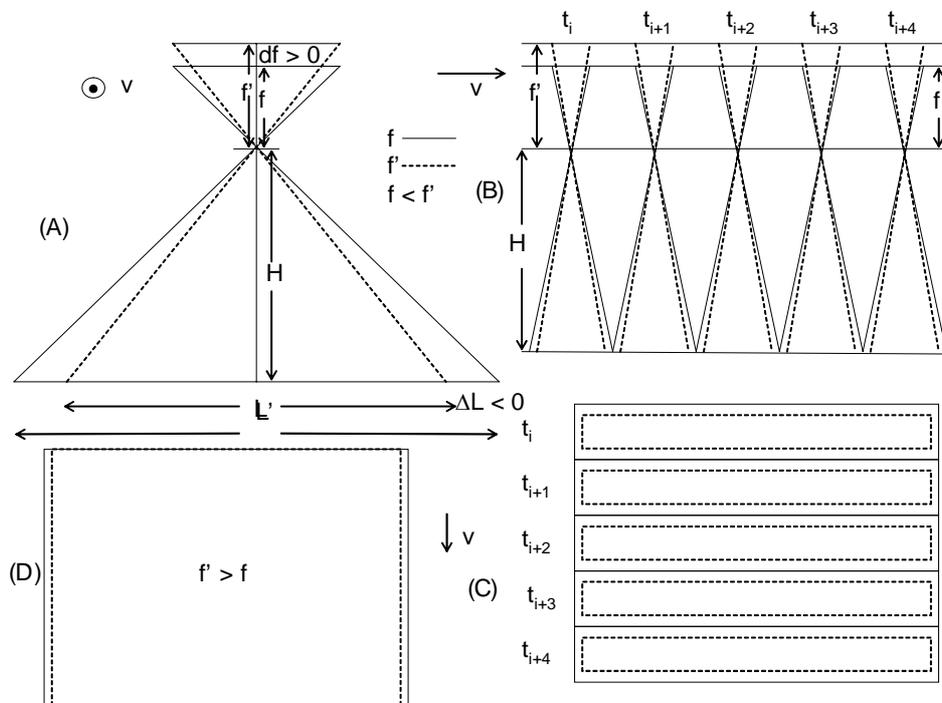


FIGURA 3.2 – Efeito da degradação da distância focal nas imagens de sensores de varredura eletrônica.

A figura 3.3 apresenta o efeito do erro na determinação da distância focal no posicionamento geométrico de um *pixel*. Se a Terra fosse plana, o efeito seria exatamente uma variação de escala no sentido transversal à órbita, em função do erro da medição da distância focal (df), conforme equações 3.3 e 3.4.

$$\frac{\sin \theta'}{R} = \frac{\sin(\theta + \alpha - d\alpha)}{R + H} = \frac{\sin(\alpha + d\alpha)}{L} \quad (3.9)$$

$$dS = R.d\alpha \quad (3.10)$$

$$\frac{S'}{S} = 1 - \frac{d\alpha}{\alpha} \quad (3.11)$$

Nos sensores com visada oblíqua, a imprecisão do apontamento do sensor, devido ao mecanismo de movimento do espelho, ou pela rotação do próprio corpo do satélite é uma fonte de distorção, mas que nesse caso afeta mais o posicionamento do que a geometria interna.

As próximas seções apresentarão análises sobre distorções causadas por parâmetros da geometria de visada para diversos sensores da família CBERS.

No caso dos sensores de varredura eletrônica, o cenário 1 (referência) usa a distância focal nominal e o cenário 2 (ruído) acrescenta um valor fixo ao nominal.

No caso do sensor CCD, é avaliado também a precisão de apontamento do espelho móvel de visada lateral. O cenário 1 (referência) usa o valor programado do ângulo de inclinação e o cenário 2 (ruído) acrescenta um valor fixo ao nominal.

No caso dos sensores de varredura mecânica, o cenário 1 (referência) usa o perfil de espelho nominal e o cenário 2 (ruído) multiplica cada ângulo relativo aos limites dos segmentos por um valor constante.

3.1.1 CCD-CBERS 1, 2 e 2B

A principal fonte de degradação relativa à geometria de visada do sensor CCD (*Charge Coupled Device*) CBERS seria um desgaste do sistema ótico que comprometesse a distância focal nominal, com o sistema usando um valor diferente do real. O efeito, conforme visto anteriormente, seria uma variação na escala da imagem na direção das varreduras (transversal à órbita), caracterizando um anisomorfismo.

Não há especificação quanto à precisão deste parâmetro para o sensor CCD. Desse modo, a tabela 3.1 apresenta os resultados para degradações de 0,006%, 0,6% e 1,0%. Os resultados são os mesmos, independente se a variação é para mais (redução da dimensão da varredura) ou para menos (ampliação da dimensão da varredura).

TABELA 3.1 – Impacto da simulação da degradação da distância focal na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Distância focal (f): 520mm		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
f ± 0,006%	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	2,2 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	2,2 / 0,11
	Similaridade	N/A	N/A	1,6 / 0,78
	Afim	N/A	N/A	0,0 / 0,00
f ± 0,600%	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	219,5 / 10,98
	Translação	N/A	N/A	219,5 / 10,98
	Similaridade	N/A	N/A	155,6 / 7,78
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	1,8 / 0,09
f ± 1,000%	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	364,4 / 18,22
	Translação	N/A	N/A	364,4 / 18,22
	Similaridade	N/A	N/A	258,8 / 12,94
	Afim	N/A	N/A	3,1 / 0,15

Essa tabela mostra de forma clara que essa degradação afeta apenas a geometria interna da imagem. Já na comparação direta, as médias dos erros foram nulas, o que fez com que uma correção de translação não surtisse efeito. A transformação de similaridade reduziu um pouco o erro médio quadrático, com um pequeno ajuste no fator de escala, mas com um ângulo de rotação muito próximo a zero. Conforme era esperado, a

transformação afim corrigiu a distorção de anisomorfismo causada por este tipo de degradação e reduziu drasticamente o EMQ da imagem.

Até uma degradação de cerca de seis décimos percentuais (aproximadamente 3mm), a transformação afim consegue reduzir o erro para o limite de um décimo da resolução espacial, garantindo excelente qualidade geométrica para as imagens de níveis 3 ou 4 de processamento.

Entretanto, para o nível 2, a variação aceitável é de apenas seis milésimos percentuais (30 μ m) o que demonstra a alta qualidade que os sistemas óticos desses sensores devem apresentar.

O sensor CCD-CBERS apresenta ainda a capacidade de visada lateral, o que passa a ser mais uma fonte de distorção geométrica. O efeito é semelhante ao do ângulo de atitude rolamento. A precisão de apontamento é de 0,07°. Os valores apresentados na tabela 3.2 demonstram que esta distorção é aceitável tanto para os níveis 2, 3 e 4 de processamento, dentro do critério de distorção da ordem de um décimo da resolução espacial.

TABELA 3.2 – Impacto da simulação da degradação do ângulo de apontamento do espelho na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\theta \pm 0,07^\circ$	Direta	-922,4 / -46,12	226,6 / 11,33	949,8 / 47,49
	Translação (N2)	N/A	N/A	2,3 / 0,12
	Similaridade	N/A	N/A	2,3 / 0,12
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	2,3 / 0,11

3.1.2 IRMSS-CBERS 1 e 2

O sensor IRMSS (*InfraRed Multi Spectral Scanner*) é de varredura mecânica, e tem como parâmetros da geometria de visada ângulos iniciais e finais para quatro diferentes segmentos. A degradação percentual foi aplicada igualmente em todos os ângulos, sugerindo um efeito similar ao da variação da distância focal.

A tabela 3.3 apresenta os resultados para degradações de 0,025%, 1,0% e 2,5% sobre o perfil do espelho. Os resultados são os mesmos, independente se a variação é para mais ou para menos.

As tabelas 3.1 (CCD) e 3.3 (IRMSS) mostram valores absolutos muito próximos para um valor comum de 1% para degradação da geometria de visada. Ambas as cenas dos sensores CCD e IRMSS apresentam dimensões muito próximas, variando os modelos de geometria de visada, mas que apresentam campos de visada semelhantes (FOV – *Field of View*).

Como a resolução espacial do IRMSS-CBERS é quatro vezes maior que a do CCD-CBERS (o poder resolutivo é quatro vezes menor), aquele sensor também aceita uma degradação próxima a quatro vezes a deste (0,006 para 0,25 % – nível 2 e de 0,6 para 2,5 % – níveis 3 e 4) para se manter no limiar de um décimo da resolução espacial (GSD).

TABELA 3.3 – Impacto da simulação do perfil do espelho na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS.

Perfil do espelho: θ_i		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\theta_i \pm 0,025\%$	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	9,5 / 0,12
	Translação (N2)	N/A	N/A	9,5 / 0,12
	Similaridade	N/A	N/A	6,5 / 0,08
	Afim	N/A	N/A	0,0 / 0,00
$\theta_i \pm 1,000\%$	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	378,5 / 4,73
	Translação	N/A	N/A	378,5 / 4,73
	Similaridade	N/A	N/A	262,6 / 3,28
	Afim	N/A	N/A	3,1 / 0,04
$\theta_i \pm 2,500\%$	Direta	-0,1 / 0,0	0,0 / 0,0	946,3 / 11,83
	Translação	N/A	N/A	946,3 / 11,83
	Similaridade	N/A	N/A	651,6 / 8,15
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	7,6 / 0,10

3.1.3 WFI-CBERS 1, 2 e 2B

O sensor WFI (*Wide Field of View*) é um sensor de varredura eletrônica que guarda certa semelhança com o CCD. Porém, por ser sensor com amplo campo de visada, ele apresenta algumas particularidades, como dois sistemas óticos independentes.

A tabela 3.4 apresenta os resultados para degradações de 0,01%, 1% e 2,5%, aplicadas simultaneamente à distância focal de ambos os sistemas óticos.

TABELA 3.4 – Impacto da simulação da degradação da distância focal na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS.

Distância focal (f): 39,5mm		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
f ± 0,01%	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	24,3 / 0,10
	Translação (N2)	N/A	N/A	24,3 / 0,10
	Similaridade	N/A	N/A	17,8 / 0,07
	Afim	N/A	N/A	0,2 / 0,00
f ± 1,00%	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	2.409,9 / 10,04
	Translação	N/A	N/A	2.409,9 / 10,04
	Similaridade	N/A	N/A	1.698,5 / 7,08
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	22,5 / 0,09
f ± 2,50%	Direta	0,1 / -0,1	0,0 / 0,0	5.933,7 / 24,72
	Translação	N/A	N/A	5.933,7 / 24,72
	Similaridade	N/A	N/A	4.213,8 / 17,56
	Afim	N/A	N/A	55,0 / 0,23

As tabelas 3.3 (IRMSS) e 3.4 (WFI) mostram valores absolutos muito díspares para um valor comum de 2,5% para degradação da geometria de visada. Neste caso, diferentemente da comparação entre os sensores CCD e IRMSS, as cenas destes sensores apresentam dimensões muito diferentes. O sensor WFI de campo amplo é mais

sensível ao efeito da distorção panorâmica, além de apresentar o efeito *bowtie* nas bordas das imagens. Dessa forma, o sensor também se mostra mais sensível a possíveis flutuações nos parâmetros da geometria de visada.

Sendo assim, o sensor WFI atingiu o limiar de um décimo da resolução espacial para degradações da distância focal de 0,01% (4 μ m – nível 2) e 1% (400 μ m – níveis 3 e 4).

3.1.4 HRC-CBERS 2B

O sensor HRC (*High Resolution Camera*) será lançado no próximo satélite CBERS-2B. A geometria de visada é similar ao do sensor CCD, porém com uma melhora significativa na resolução espacial e uma faixa de imageamento aproximadamente quatro vezes menor (118 para 27 km).

A tabela 3.5 apresenta os resultados para degradações de 0,003%, 0,3% e 0,6% sobre a distância focal. Os resultados são os mesmos, independente se a variação é para mais ou para menos. Ela mostra uma necessidade de maior qualidade da distância focal do sensor HRC. Apesar de ele apresentar uma resolução espacial oito vezes melhor que a do CCD (2,5 para 20 metros), atinge-se o limiar com degradações máximas suportadas apenas duas vezes menor (0,003 para 0,006 % e 0,3 para 0,6 %).

Comparando as tabelas 3.1 (CCD) e 3.5 (HRC) para o mesmo percentual de degradação (0,6%), encontram-se erros absolutos aproximadamente quatro vezes menores para o sensor HRC quando comparados com o sensor CCD e relativos duas vezes maior. Esse resultado é decorrente da faixa de imageamento mais estreita daquele sensor, o que reduz as dimensões das cenas e a influência da curvatura da Terra também.

A título de verificação da hipótese, foram simuladas imagens HRC com dimensões iguais às do sensor CCD e vice-versa. Nestes casos, os erros absolutos apresentaram a mesma ordem de valor absoluto (medidos em metros).

TABELA 3.5 – Impacto da simulação da degradação da distância focal na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.

Distância focal (f): 3300mm		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
f±0,0006%	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	0,1 / 0,02
	Translação	N/A	N/A	0,1 / 0,02
	Similaridade	N/A	N/A	0,0 / 0,02
	Afim	N/A	N/A	0,0 / 0,00
f±0,0003%	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	0,3 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	0,3 / 0,11
	Similaridade	N/A	N/A	0,2 / 0,08
	Afim	N/A	N/A	0,0 / 0,00
f±0,3000%	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	27,5 / 11,00
	Translação	N/A	N/A	27,5 / 11,00
	Similaridade	N/A	N/A	19,9 / 7,95
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,3 / 0,10
f±0,6000%	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	54,8 / 21,94
	Translação	N/A	N/A	54,8 / 21,94
	Similaridade	N/A	N/A	39,7 / 15,88
	Afim	N/A	N/A	0,5 / 0,20

Em suma, a redução das dimensões da cena é o fator que permite uma degradação duas vezes menor na distância focal do sensor HRC para atingir o limiar de dez por cento da resolução espacial, quando comparado com o sensor CCD – 0,003% (100 μ m – nível 2) e 0,3% (10mm – níveis 3 e 4).

A especificação da distância focal da câmera HRC (CAST, 2005) garante uma precisão superior a 20 μ m (equivalente à degradação de 0,0006% na tabela 3.5), o que permite afirmar que a distância focal do sensor não causará distorção geométrica significativa sobre a imagem.

3.1.5 PAN-CBERS 3 e 4 (modo multi-espectral)

O sensor PAN será lançado nos satélites CBERS 3 e 4. Ele é um sensor de varredura eletrônica, similar ao CCD, com dois modos de operação: pancromático (P) e multi-espectral (MS). O modo multi-espectral apresenta uma resolução espacial duas vezes melhor (10m) que a do sensor CCD. Para efeito de estudo, foi simulado um sensor com as características do PAN, modo MS, com largura de faixa de imageamento similar ao do CCD e o dobro de detetores. As dimensões das imagens são muito próximas.

A tabela 3.6 apresenta os resultados para degradações da distância focal de 0,003%, 0,3% e 0,6%. Os resultados são os mesmos, independente se a variação é para mais ou para menos.

Como o sensor PAN-CBERS modo MS (PAN-MS) apresenta padrões muito próximos do sensor CCD-CBERS (mesma largura de faixa de imageamento e mesma dimensões de cenas), ele apresenta o mesmo resultado, em termos de valor absoluto, para uma degradação comum de 0,6% da distância focal (tabelas 3.1 e 3.6). Porém, conforme esperado, o limiar é atingido para uma degradação duas vezes menor – 0,003% (nível 2) e 0,3% (níveis 3 e 4) (mesma relação entre as resoluções espaciais).

Além disso, os valores absolutos de variação da distância focal (30 μ m – nível 2 e 3mm – níveis 3 e 4) são idênticos ao do sensor CCD.

TABELA 3.6 – Impacto da simulação da degradação da distância focal na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS).

Distância focal (f): 1010mm		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
f ± 0,003%	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	1,1 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	1,1 / 0,11
	Similaridade	N/A	N/A	0,8 / 0,08
	Afim	N/A	N/A	0,0 / 0,00
f ± 0,300%	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	110,1 / 11,01
	Translação	N/A	N/A	110,1 / 11,01
	Similaridade	N/A	N/A	77,9 / 7,79
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,9 / 0,09
f ± 0,600%	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	219,3 / 21,93
	Translação	N/A	N/A	219,3 / 21,93
	Similaridade	N/A	N/A	155,4 / 15,55
	Afim	N/A	N/A	1,8 / 0,18

3.1.6 PAN-CBERS 3 e 4 (modo pancromático)

O sensor PAN será lançado nos satélites CBERS 3 e 4. Ele é um sensor de varredura eletrônica, similar ao CCD, com dois modos de operação: pancromático (P) e multi-espectral (MS). O modo pancromático apresenta uma resolução espacial quatro vezes melhor (5m) que a do sensor CCD. Para efeito de estudo, foi simulado um sensor com

as características do PAN, modo P (PAN-P), com largura de faixa de imageamento aproximadamente a metade da do CCD (60km) e o dobro de detetores. As dimensões aproximadas das imagens são de 60x60km².

A tabela 3.7 apresenta os resultados para degradações da distância focal de 0,003%, 0,3% e 0,6%. Os resultados são os mesmos, independente se a variação é para mais ou para menos.

TABELA 3.7 – Impacto da simulação da degradação da distância focal na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P).

Distância focal (f): 1010mm		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
f ± 0,003%	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	0,6 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	0,6 / 0,11
	Similaridade	N/A	N/A	0,4 / 0,08
	Afim	N/A	N/A	0,0 / 0,00
f ± 0,300%	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	55,0 / 11,00
	Translação	N/A	N/A	55,0 / 11,00
	Similaridade	N/A	N/A	38,9 / 7,78
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,5 / 0,11
f ± 0,600%	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	109,7 / 21,9
	Translação	N/A	N/A	109,7 / 21,9
	Similaridade	N/A	N/A	77,7 / 15,5
	Afim	N/A	N/A	1,1 / 0,22

Os resultados apresentados pelo sensor PAN-CBERS, modo P, quando confrontados com os anteriores, mostram um padrão de variação da distorção geométrica (EMQ) próxima a linear em função da faixa de imageamento, resolução espacial e da taxa de degradação (tabelas 3.1, 3.3, 3.5 e 3.6).

Quando comparado com os resultados do sensor PAN-CBERS, modo MS (tabela 3.6), os resultados relativos (em GSD) são praticamente idênticos. Logo, neste caso, o limiar é atingido para a mesma degradação do sensor PAN-CBERS, modo MS – 0,003% ou 30 μ m para o nível 2 e 0,3% ou 3mm para os níveis 3 e 4 – pois a melhora da resolução espacial (5 para 10m) é compensada pela redução da faixa de imageamento (120km – MS para 60km – P).

3.1.7 IRS-CBERS 3 e 4

O sensor IRS (*InfraRed Scanner*), de varredura mecânica, será lançado nos satélites CBERS 3 e 4. De modo semelhante ao do IRMSS, ele apresenta como parâmetros da geometria de visada ângulos iniciais e finais para quatro diferentes segmentos. A degradação percentual foi aplicada igualmente em todos os ângulos, sugerindo um efeito similar ao da variação da distância focal.

A tabela 3.8 apresenta os resultados para degradações de 0,01% (nível 2) e 1,0% (níveis 3 e 4). Os resultados são os mesmos, independente se a variação é para mais ou para menos.

As tabelas 3.3 (IRMSS) e 3.8 (IRS) mostram os mesmos valores absolutos para uma degradação da geometria de visada de 1%. As cenas destes sensores apresentam as mesmas dimensões (mesma largura de faixa de imageamento), mas como a resolução espacial do IRS-CBERS é duas vezes melhor que a do IRMSS-CBERS, aquele sensor também aceita uma degradação próxima a duas vezes menor que a deste sensor.

TABELA 3.8 – Impacto da simulação da degradação da distância focal na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS-CBERS.

Parâmetros de visada: θ_i		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\theta_i \pm 0,01\%$	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	3,8 / 0,09
	Translação (N2)	N/A	N/A	3,8 / 0,09
	Similaridade	N/A	N/A	2,6 / 0,07
	Afim	N/A	N/A	0,0 / 0,00
$\theta_i \pm 1,00\%$	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	378,3 / 9,46
	Translação	N/A	N/A	378,3 / 9,46
	Similaridade	N/A	N/A	262,5 / 6,56
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	3,1 / 0,08

3.1.8 AWFI-CBERS 3 e 4

O sensor AWFI (*Advanced Wide Field of View*) será lançado nos futuros satélites CBERS 3 e 4. Ele é um sensor de varredura eletrônica que guarda grande semelhança com o WFI. Ambos são sensores com amplo campo de visada, apresentando forte influência da distorção panorâmica.

A tabela 3.9 apresenta os resultados para degradações da distância focal de 0,003% ou $5\mu\text{m}$ (nível 2) e 0,3% ou $500\mu\text{m}$ (níveis 3 e 4). Ou seja, esse sensor, por conta de seu amplo campo de visada e do reduzido valor de distância focal é extremamente sensível a degradações nesse parâmetro.

TABELA 3.9 – Impacto da simulação da degradação da distância focal na qualidade geométrica das imagens do sensor AWFÍ-CBERS.

Distância focal (f): 149,85mm		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
f ± 0,003%	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	7,3 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	7,3 / 0,11
	Similaridade	N/A	N/A	5,1 / 0,08
	Afim	N/A	N/A	0,1 / 0,00
f ± 0,300%	Direta	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	728,1 / 11,38
	Translação	N/A	N/A	728,1 / 11,38
	Similaridade	N/A	N/A	551,4 / 7,99
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	6,8 / 0,11

As tabelas 3.4 (WFI) e 3.9 (AWFI) mostram uma relação na degradação percentual da distância focal da ordem de três, enquanto a relação entre as resoluções espaciais é da ordem de quatro.

3.1.9 Análise Final

Os satélites CBERS 3 e 4 carregarão um sensor MUX praticamente idêntico ao sensor CCD, e por conta disso não será considerado nestes estudos.

Os resultados apontam para uma redução da tolerância na degradação da distância focal na razão direta da resolução espacial (GSD, tabela 3.10) e na razão inversa da largura do campo de visada (tabela 3.11). E estas relações são muito próximas da linear. Em todos os casos, a degradação aceita para manter a qualidade geométrica das imagens de nível 2 de processamento é da ordem de cem vezes menor que para os níveis 3 e 4.

Os níveis de degradação da distância focal relacionados como aceitáveis para os níveis 3 e 4 de processamento são aqueles cuja distorção pode ser reduzida por uma transformação afim até um valor residual de um décimo da resolução espacial.

TABELA 3.10 – Relação da degradação da distância focal com o GSD.

sensor	CCD	IRMSS	PAN (MS)	IRS
Campo de visada (km)	120	120	120	120
GSD (m)	20	80	10	40
f (mm)	520	N/A	1010	N/A
Nível 2	0,006% (30 μ m)	0,025%	0,003% (30 μ m)	0,010%
Níveis 3 e 4	0,6% (3mm)	2,5%	0,3% (3mm)	1,0%

Os sensores da tabela 3.10 têm o mesmo campo de visada (120km) e o percentual de degradação percentual da distância focal praticamente varia de forma linear com a resolução espacial (GSD).

Os sensores da tabela 3.11 apresentam praticamente uma relação constante entre campo de visada e resolução espacial (12). Isso faz com que esses sensores apresentem a mesma degradação percentual da distância focal: 0,003% para o nível 2 e 0,3% para os níveis 3 e 4.

Os resultados absolutos de degradação da distância focal apontam para uma situação mais crítica em relação aos sensores WFI e AWFI, indicando que o amplo campo de visada se sobrepõe à baixa resolução espacial. Para atingir um amplo campo de visada, as distâncias focais são drasticamente reduzidas (39,5mm – WFI e 149,85mm – AWFI) e qualquer variação nesses valores prejudica sobremaneira a qualidade geométrica das imagens.

Os resultados mais críticos para degradação relativa das distâncias focais aparecem para os sensores HRC, PAN-MS, PAN-P e AWFI: 0,003%. Isso inclui o sensor AWFI nas situações mais críticas tanta na degradação absoluta quanto relativa.

Os resultados encontrados para o sensor HRC estão totalmente dentro da especificação técnica do sensor, inclusive para o nível 2 de processamento.

TABELA 3.11 – Relação da degradação da distância focal com o campo de visada.

sensor	PAN (MS)	PAN (P)	HRC
Campo de visada (km)	120	60	27
GSD (m)	10,0	5,0	2,5
f (mm)	1010	1010	3300
Nível 2	0,003% (30 μ m)	0,003% (30 μ m)	0,003% (100 μ m)
Níveis 3 e 4	0,3% (3mm)	0,3% (3mm)	0,3% (10mm)

3.2 Ângulos de *Boresight*

Os ângulos de *boresight* respondem pelo posicionamento do sensor em relação ao sistema de controle de atitude e órbita do satélite. Eles são definidos no projeto do satélite e medidos durante a fase de integração e testes do satélite.

Eles representam rotações em torno do sistema de referência da plataforma (ver apêndice A, Sistemas de Coordenadas), e os efeitos causados são: deslocamento transversal à órbita (rotação em torno do eixo X), deslocamento ao longo da órbita (rotação em torno do eixo Y) e cisalhamento na direção da órbita (rotação em torno do eixo Z).

Os dois primeiros efeitos refletem diretamente no posicionamento da imagem, enquanto o terceiro afeta a geometria interna da mesma.

Teoricamente, esses ângulos são inicialmente bem conhecidos, por medidas em laboratório antes do lançamento do satélite, durante a fase de integração e testes. Ao longo do tempo ele pode sofrer pequenas variações, que podem ser detectadas a partir do monitoramento contínuo da qualidade geométrica das imagens.

Possíveis mudanças nos valores desses ângulos ocorrem com baixa frequência e os resultados são semelhantes ao estudo apresentado na seção 3.4 (Atitude), relativo à atitude (rotação em torno do eixo X – rolamento, rotação em torno do eixo Y – arfagem e rotação em torno do eixo Z – guinada).

As possíveis variações dos ângulos de *boresight* são muito menores que as relativas à atitude, que são apresentados nas tabelas (3.45 a 3.72), na seção 3.4 (Atitude). No intervalo de tempo relativo à aquisição de uma imagem, os ângulos de *boresight* não sofrem variação. Ou seja, essas variações podem ser desprezadas. O importante é um bom conhecimento prévio dos valores de projeto e medidos durante a fase de integração e testes.

3.3 Efemérides

Os dados de efemérides podem ser obtidos de diferentes fontes, apresentando diversos graus de qualidade. A primeira fonte é o próprio satélite que transmite os dados de efemérides para as estações terrenas, numa determinada frequência fixa.

A segunda fonte é derivada desta primeira, e consiste num processamento realizado sobre as efemérides transmitidas, visando alcançar uma maior precisão nos dados. Esse processamento é realizado na estação terrena, após ter acesso aos dados transmitidos.

Sobre estas fontes é necessário usar um interpolador para obter a posição e a velocidade do satélite num determinado instante relativo a um *pixel* da imagem.

A terceira é a *Web*, que torna disponível os parâmetros orbitais de todos os satélites de sensoriamento remoto, por meio de arquivos, geralmente diários, no formato TLE. Estes arquivos permitem a propagação da órbita para qualquer instante desejado.

Com exceção dos dados processados, os demais estão disponíveis para emprego nos modelos de correção geométrica no mesmo instante em que se tem acesso aos dados de imagem.

Os dois primeiros satélites da série CBERS dispõem de sistemas de aquisição de efemérides de baixa qualidade. O resultado é um grande erro de posicionamento das imagens, porém sem grande reflexo na qualidade da geometria interna da mesma. (D'ALGE 2004)

Nestes casos, o Centro de Controle de Satélites (CCS) faz a previsão da órbita do satélite e transmite diversos parâmetros para o mesmo. O computador de bordo processa esses dados, propagando a órbita e determinando as efemérides que serão transmitidas.

Os próximos satélites da série terão sensores de GPS, os quais reduzirão sobre-maneira esses efeitos, garantindo uma melhor referência geográfica das imagens.

Dois dos principais elementos relacionados com as efemérides são a altitude e velocidade do satélite. Pequenas variações da altitude do satélite refletem na qualidade geométrica das imagens. O efeito é similar ao visto na seção 3.1 (Geometria de Visada) em relação à distância focal, uma variação da escala apenas no sentido transversal à órbita, como se o *pixel* fosse retangular ao invés de quadrado. Novamente isso decorre da característica de projeção cilíndrica associada à aquisição de imagens de satélite, ao invés de projeção cônica associada à aquisição de fotografias aéreas.

As figuras 3.4 e 3.5 apresentam o efeito da variação da altitude do satélite na formação da imagem. Quando a altitude sofre uma variação negativa ($\Delta H < 0$) o resultado é uma redução em cada varredura (lado superior esquerdo da figura 3.4 – A). Não havendo variação nos demais parâmetros (tais como distância focal e velocidade do satélite), haverá intervalos entre as varreduras, conforme pode ser observado nas seqüências do

lado direito da figura 3.4 (B e C). Esses intervalos são preenchidos por interpolação, resultando na simulação mostrada na parte inferior esquerda da figura 3.4 (D), onde pode ser observada uma variação de escala (redução da largura da imagem) apenas no sentido transversal à órbita (anisomorfismo).

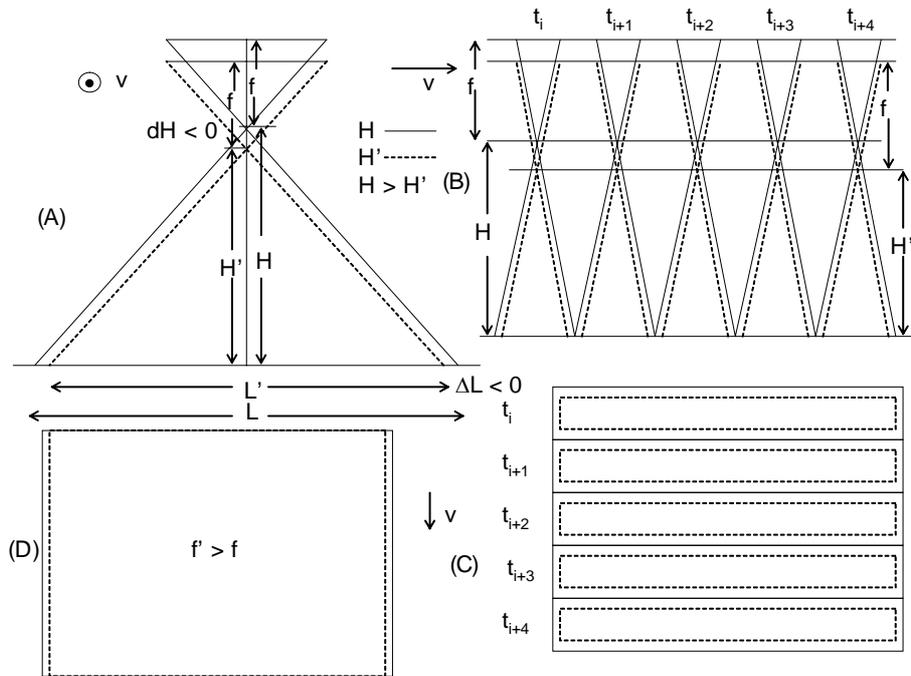


FIGURA 3.4 – Efeito da degradação da altitude do satélite nas imagens.

A figura 3.5 apresenta o efeito do erro na determinação da altitude no posicionamento geométrico de um *pixel*.

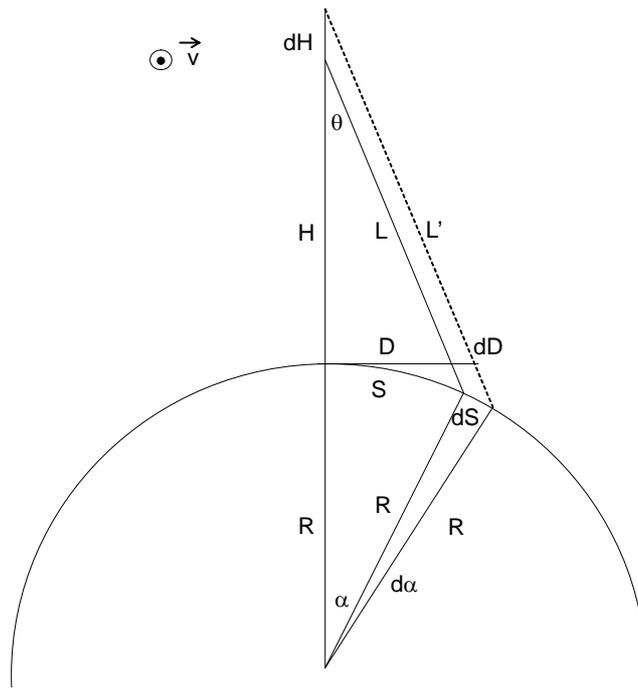


FIGURA 3.5 – Desvio do posicionamento de um *pixel* devido ao erro da altitude.

Se a Terra fosse plana, o efeito seria exatamente uma variação de escala no sentido transversal à órbita, proporcional ao erro da medição da altitude (dH), conforme equações 3.12 e 3.13.

$$dD = \frac{D}{H} . dH \quad (3.12)$$

$$\frac{D'}{D} = 1 + \frac{dH}{H} \quad (3.13)$$

A equação 3.13 mostra que uma variação positiva na altitude do satélite acarreta num aumento da largura da varredura. Considerando a esfericidade da Terra, tem-se:

$$\frac{\sin \theta}{R} = \frac{\sin(\theta + \alpha)}{R + H} = \frac{\sin \alpha}{L} \quad (3.14)$$

$$S = R . \alpha \quad (3.15)$$

$$\frac{\sin \theta}{R} = \frac{\sin(\theta + \alpha + d\alpha)}{R + H + dH} = \frac{\sin \alpha + d\alpha}{L'} \quad (3.16)$$

$$dS = R.d\alpha \quad (3.17)$$

$$\frac{S + dS}{S} = 1 + \frac{d\alpha}{\alpha} \quad (3.18)$$

Pelo exposto nesta seção e na seção 3.1 (Geometria de Visada), variações positivas ou negativas conjuntas da distância focal e da altitude do satélite minimizam o efeito de anisomorfismo. Por outro lado, se um desses parâmetros varia positivamente e o outro negativamente esse efeito se agrava.

Pequenas variações na velocidade do satélite refletem na qualidade geométrica das imagens. O efeito final reproduz um anisomorfismo, porém nesse caso com uma variação de escala no sentido da órbita.

A figura 3.6 apresenta o efeito da variação da velocidade do satélite na formação da imagem. Neste exemplo, a velocidade sofre uma variação positiva ($\Delta v > 0$) e o resultado é um deslocamento entre as varreduras (lados superior esquerdo – A – e inferior direito – C), com hiatos de imageamento. Não havendo variação nos demais parâmetros (tais como distância focal e altitude do satélite), os intervalos entre as varreduras são preenchidos por interpolação resultando na simulação mostrada no lado superior direito da figura (B). O efeito final é uma variação de escala (ampliação do comprimento da imagem) apenas no sentido da órbita (anisomorfismo). O lado inferior esquerdo (D) mostra a situação para a velocidade nominal do satélite, quando ocorre a perfeita justaposição das varreduras.

Se a variação da velocidade for negativa, o resultado é o oposto: sobreposição entre varreduras, com pequenas áreas imageadas duas vezes. O efeito final é uma variação de escala no sentido da órbita, com redução do comprimento da imagem.

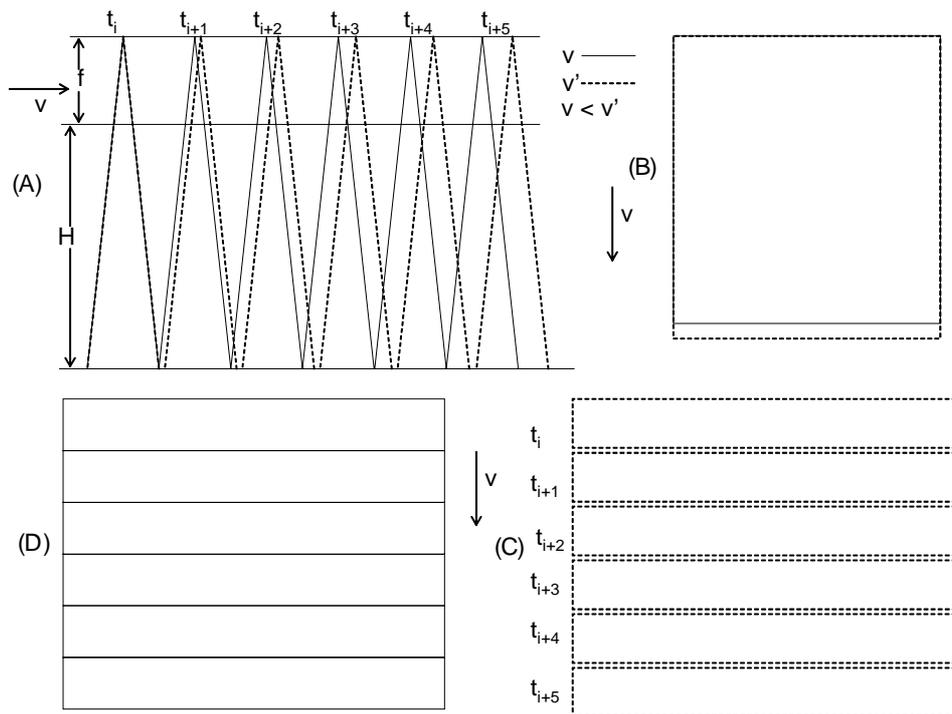


FIGURA 3.6 – Efeito da degradação da velocidade do satélite nas imagens.

Todos esses efeitos afetam mais a geometria interna da imagem, sendo praticamente imperceptíveis no posicionamento da mesma.

As próximas seções apresentarão análises sobre distorções causadas pelos dados de efemérides para diversos sensores da família CBERS. São realizadas duas diferentes análises. Na primeira, o cenário 1 (referência) usa as efemérides transmitidas e o cenário 2 (ruído) acrescenta um valor fixo a estas efemérides (posição e velocidade). Na segunda, o cenário 2 é obtido acrescentando-se um ruído gaussiano às efemérides de média nula (a média teria o mesmo efeito do que é analisado na primeira abordagem).

3.3.1 CCD-CBERS 1, 2 e 2B

As tabelas 3.12 (posição) e 3.13 (velocidade) apresentam os resultados para degradações provocadas por acréscimo de valores constantes aos dados de efemérides. As tabelas 3.14 (posição) e 3.15 (velocidade) apresentam os resultados para degradações causadas por acréscimo de ruído gaussiano de média nula.

TABELA 3.12 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Delta	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
X ± 50m	Direta	-60,4 / -3,02	24,4 / 1,22	65,2 / 3,26
	Translação (N2)	N/A	N/A	2,2 / 0,11
Y ± 50m	Similaridade	N/A	N/A	1,7 / 0,09
Z ± 50m	Afim	N/A	N/A	0,0 / 0,00
X ± 250m	Direta	-302,1 / -15,11	121,1 / 6,11	326,1 / 16,30
	Translação	N/A	N/A	11,1 / 0,55
Y ± 250m	Similaridade	N/A	N/A	8,6 / 0,43
Z ± 250m	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,1 / 0,01

TABELA 3.13 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Delta	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
V_x ± 0,3m/s	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	2,1 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	2,1 / 0,11
V_y ± 0,3m/s	Similaridade	N/A	N/A	1,5 / 0,07
V_z ± 0,3m/s	Afim	N/A	N/A	0,0 / 0,00
V_x ± 30m/s	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	211,6 / 10,58
	Translação	N/A	N/A	211,6 / 10,58
V_y ± 30m/s	Similaridade	N/A	N/A	149,6 / 7,48
V_z ± 30m/s	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	1,8 / 0,09

TABELA 3.14 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Desvio Padrão	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\sigma_x = 2m$	Direta	-0,3 / -0,02	-1,0 / -0,05	2,1 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	1,8 / 0,09
$\sigma_y = 2m$	Similaridade	N/A	N/A	1,7 / 0,09
$\sigma_z = 2m$	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	1,6 / 0,08

TABELA 3.15 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Desvio Padrão	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\sigma_{V_x} = 0,3\text{m/s}$	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	1,7 / 0,09
	Translação (N2)	N/A	N/A	1,7 / 0,09
$\sigma_{V_y} = 0,3\text{m/s}$	Similaridade	N/A	N/A	1,7 / 0,09
$\sigma_{V_z} = 0,3\text{m/s}$	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	1,7 / 0,09

Uma análise na tabela 3.12 permite inferir que as distorções provocadas pela adição de valores constantes à posição do satélite atinge basicamente a geometria externa, afetando o posicionamento da imagem. Até o valor máximo especificado de 250m, é possível obter excelentes resultados para imagens de níveis 3 e 4 de processamento. Porém, quando se pensa em imagens com correção geométrica de sistema (nível 2), esse valor deve ser reduzido para 50m.

Entretanto, o mesmo não ocorre quando a adição é realizada sobre a velocidade do satélite. Mas isso já era esperado. Uma variação na velocidade implica numa variação na escala apenas no sentido da órbita, provocando um anisomorfismo, que só é corrigido com a transformação afin. Isso fica bastante nítido na tabela 3.13. Para imagens de nível 2, o valor máximo tolerado é de 0,3m/s, enquanto para os níveis mais avançados (3 e 4) o valor máximo aceitável é de 30m/s, muito acima da especificação. Ou seja, essas variações aleatórias não terão impacto na qualidade geométrica dos produtos em níveis mais avançados.

A adição de ruído gaussiano aos dados de efemérides praticamente não afeta o posicionamento da imagem, distorcendo apenas a geometria interna. Além disso, não afeta de forma diferenciada as componentes na direção e transversal à órbita. Dessa

forma, quando se atinge uma boa qualidade geométrica para o nível 2, atinge-se também para os níveis 3 e 4, conforme pode ser observado nas tabelas 3.14 e 3.15.

3.3.2 IRMSS-CBERS 1 e 2

As tabelas 3.16 (posição) e 3.17 (velocidade) apresentam os resultados para degradações provocadas por acréscimo de valores constantes aos dados de efemérides. As tabelas 3.18 (posição) e 3.19 (velocidade) apresentam os resultados para degradações causadas por acréscimo de ruído gaussiano de média nula.

TABELA 3.16 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS.

Delta	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
X ± 200m	Direta	-241,7 / -3,02	97,7 / 1,22	260,9 / 3,26
	Translação (N2)	N/A	N/A	9,1 / 0,11
Y ± 200m	Similaridade	N/A	N/A	7,0 / 0,09
Z ± 200m	Afim	N/A	N/A	0,1 / 0,00
X ± 250m	Direta	-306,9 / -3,84	122,9 / 1,54	328,5 / 4,11
	Translação	N/A	N/A	11,6 / 0,14
Y ± 250m	Similaridade	N/A	N/A	8,8 / 0,11
Z ± 250m	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,1 / 0,00

TABELA 3.17 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS.

Delta	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
V_x ± 1,2m/s	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	8,7 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	8,7 / 0,11
V_y ± 1,2m/s	Similaridade	N/A	N/A	6,0 / 0,08
V_z ± 1,2m/s	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,1 / 0,00

TABELA 3.18 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS.

Desvio Padrão	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\sigma_x = 10m$	Direta	-1,7 / -0,02	-5,2 / -0,07	10,6 / 0,13
	Translação (N2)	N/A	N/A	9,1 / 0,11
$\sigma_y = 10m$	Similaridade	N/A	N/A	8,6 / 0,11
$\sigma_z = 10m$	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	8,0 / 0,10

TABELA 3.19 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS.

Desvio Padrão	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\sigma_{V_x} = 1,2\text{m/s}$	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	7,0 / 0,09
	Translação (N2)	N/A	N/A	7,0 / 0,09
$\sigma_{V_y} = 1,2\text{m/s}$	Similaridade	N/A	N/A	7,0 / 0,09
$\sigma_{V_z} = 1,2\text{m/s}$	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	7,0 / 0,09

Novamente é possível inferir que as distorções provocadas pela adição de valores constantes à posição do satélite atinge basicamente a geometria externa, afetando o posicionamento da imagem (tabela 3.16). Até o valor máximo especificado de 250m, é possível obter excelentes resultados para imagens de níveis 3 e 4 de processamento. Porém, quando se pensa em imagens com correção geométrica de sistema (nível 2), esse valor é reduzido para 200m.

Entretanto, quando a adição é realizada sobre a velocidade do satélite ocorre o efeito de anisomorfismo, que só é corrigido com a transformação afim. Isso fica bastante nítido na tabela 3.17. Para imagens de nível 2, o valor máximo tolerado é de 1,2m/s. Não há problemas para atingir a qualidade geométrica desejada para os níveis mais avançados (3 e 4).

Novamente pode-se observar que a adição de ruído gaussiano aos dados de efemérides praticamente não afeta o posicionamento da imagem, distorcendo apenas a geometria interna. Conforme pode ser observado nas tabelas 3.18 e 3.19, quando se atinge uma boa qualidade geométrica para o nível 2, atinge-se também para os níveis 3 e 4.

Do mesmo modo que já havia sido verificado quando da análise da geometria de visada (seção 3.1 – Geometria de Visada), aqui também prevaleceu uma relação próxima a linear para a variação das distorções em função do GSD. Nas tabelas 3.12 (CCD) e 3.16 (IRMSS) há um elemento em comum, que é a adição de 250m aos componentes da posição do satélite. A resposta foi a mesma para os sensores CCD e IRMSS. Além disso, o sensor IRMSS atingiu os limiares aceitáveis para valores quatro vezes maior que no caso do CCD, exatamente a relação entre resoluções espaciais.

3.3.3 WFI-CBERS 1, 2 e 2B

As tabelas 3.20 (posição) e 3.21 (velocidade) apresentam os resultados para degradações provocadas por acréscimo de valores constantes aos dados de efemérides. As tabelas 3.22 (posição) e 3.23 (velocidade) apresentam os resultados para degradações causadas por acréscimo de ruído gaussiano de média nula.

TABELA 3.20 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS.

Delta	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
X ± 100m	Direta	110,2 / 0,46	87,4 / 0,36	142,4 / 0,59
	Translação (N2)	N/A	N/A	22,3 / 0,09
Y ± 100m	Similaridade	N/A	N/A	17,2 / 0,07
Z ± 100m	Afim	N/A	N/A	1,4 / 0,01
X ± 250m	Direta	275,5 / 1,15	218,6 / 0,91	356,1 / 1,48
	Translação	N/A	N/A	55,7 / 0,23
Y ± 250m	Similaridade	N/A	N/A	43,05 / 0,18
Z ± 250m	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	3,4 / 0,01

TABELA 3.21 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS.

Delta	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
V_x ± 0,7m/s	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	24,1 / 0,10
	Translação (N2)	N/A	N/A	24,1 / 0,10
V_y ± 0,7m/s	Similaridade	N/A	N/A	16,9 / 0,07
V_z ± 0,7m/s	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,0 / 0,00

TABELA 3.22 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS.

Desvio Padrão	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\sigma_x = 20m$	Direta	-1,7 / -0,02	-5,2 / -0,07	25,6 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	22,9 / 0,10
$\sigma_y = 20m$	Similaridade	N/A	N/A	22,1 / 0,09
$\sigma_z = 20m$	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	21,9 / 0,09

TABELA 3.23 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS.

Desvio Padrão	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\sigma_{V_x} = 1,0\text{m/s}$	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	25,2 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	25,2 / 0,11
$\sigma_{V_y} = 1,0\text{m/s}$	Similaridade	N/A	N/A	24,7 / 0,10
$\sigma_{V_z} = 1,0\text{m/s}$	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	24,2 / 0,10

Este sensor apresenta um campo de visada muito maior que os anteriores. Esse tipo de sensor é muito contaminado pela distorção panorâmica, com grande variação da resolução espacial do centro da imagem para as bordas. Dessa forma, ele será melhor comparado ao sensor AWFI (seção 3.3.8, AWFI-CBERS 3 e 4).

Apesar de ter uma resolução espacial quase três vezes pior que a do sensor IRMSS (seção anterior), ele apresenta alguns resultados piores do que o desse sensor, ou seja, apresenta mais sensibilidade às variações na velocidade. Observando as tabelas 3.17 e 3.19 observa-se que o sensor IRMSS aceita ruído constante de 1,2 m/s e aleatório com desvio-padrão (σ) de 1,2 m/s, enquanto que o sensor WFI é mais restrito: 0,7 m/s (ruído constante) e 1,0 m/s (desvio-padrão do ruído gaussiano).

3.3.4 HRC-CBERS 2B

As tabelas 3.24 (posição) e 3.25 (velocidade) apresentam os resultados para degradações provocadas por acréscimo de valores constantes aos dados de efemérides. As tabelas 3.26 (posição) e 3.27 (velocidade) apresentam os resultados para degradações causadas por acréscimo de ruído gaussiano de média nula.

TABELA 3.24 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.

Delta	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
X ± 20m	Direta	-24,2 / -9,67	9,7 / 3,88	26,1 / 10,42
	Translação (N2)	N/A	N/A	0,2 / 0,09
Y ± 20m	Similaridade	N/A	N/A	0,2 / 0,07
Z ± 20m	Afim	N/A	N/A	0,0 / 0,00
X ± 250m	Direta	-302,3 / -120,92	121,2 / 48,47	325,7 / 130,28
	Translação	N/A	N/A	2,8 / 1,11
Y ± 250m	Similaridade	N/A	N/A	2,2 / 0,88
Z ± 250m	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,0 / 0,01

TABELA 3.25 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.

Delta	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
V_x ± 0,15m/s	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	0,26 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	0,26 / 0,11
V_y ± 0,15m/s	Similaridade	N/A	N/A	0,19 / 0,08
V_z ± 0,15m/s	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,0 / 0,00

TABELA 3.26 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.

Desvio Padrão	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\sigma_x = 0,3m$	Direta	-0,1 / -0,02	-0,2 / -0,06	0,3 / 0,13
	Translação (N2)	N/A	N/A	0,3 / 0,11
$\sigma_y = 0,3m$	Similaridade	N/A	N/A	0,2 / 0,10
$\sigma_z = 0,3m$	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,2 / 0,10

TABELA 3.27 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.

Desvio Padrão	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\sigma_{V_x} = 0,2\text{m/s}$	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	0,3 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	0,3 / 0,11
$\sigma_{V_y} = 0,2\text{m/s}$	Similaridade	N/A	N/A	0,3 / 0,11
$\sigma_{V_z} = 0,2\text{m/s}$	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,3 / 0,11

Uma análise comparativa entre as tabelas 3.12 a 3.15 (seção 3.3.1, CCD-CBERS 1 e 2B) e as tabelas desta seção (3.24 a 3.27) mostram o quanto o sensor HRC é mais sensível em relação as efemérides, e principalmente em relação à posição do satélite.

Até a adição do valor máximo especificado de 250m, continua não havendo problema em se alcançar excelentes resultados para imagens de níveis 3 e 4 de processamento. Porém, para as imagens em nível 2 de processamento, esse valor é reduzido de 50m, caso do sensor CCD, para 20m (aproximadamente duas vezes e meia).

Em relação ao ruído gaussiano, o desvio-padrão aceitável sofreu uma redução de 2m para 0,3m (entre seis e sete vezes). Ou seja, o sensor de alta resolução se mostrou muito mais sensível à contaminação da posição por ruído gaussiano de média nula.

No tocante à velocidade, a relação entre os resultados alcançados pelo sensor CCD (seção 3.3.1, CCD-CBERS 1, 2 e 2B) e pelo sensor HRC se situam na mesma faixa encontrada para a degradação da distância focal (aproximadamente duas vezes) e que pode ter relação com as variações da resolução espacial (oito vezes) e da largura do campo de imageamento (quatro vezes).

Deve-se destacar que o satélite CBERS-2B carregará um sensor de posicionamento por GPS, o que resultará em dados de efemérides com precisão melhor que as sugeridas nas tabelas de 3.24 a 3.27.

3.3.5 PAN-CBERS 3 e 4 (modo multi-espectral)

As tabelas 3.28 (posição) e 3.29 (velocidade) apresentam os resultados para degradações provocadas por acréscimo de valores constantes aos dados de efemérides. As tabelas 3.30 (posição) e 3.31 (velocidade) apresentam os resultados para degradações causadas por acréscimo de ruído gaussiano de média nula.

TABELA 3.28 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS).

Delta	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
X ± 25m	Direta	-30,2 / -3,02	12,2 / 1,22	32,6 / 3,26
	Translação (N2)	N/A	N/A	1,1 / 0,11
Y ± 25m	Similaridade	N/A	N/A	0,9 / 0,09
Z ± 25m	Afim	N/A	N/A	0,0 / 0,00
X ± 250m	Direta	-301,6 / -30,16	111,7 / 11,17	321,6 / 32,16
	Translação	N/A	N/A	11,4 / 1,14
Y ± 250m	Similaridade	N/A	N/A	8,7 / 0,87
Z ± 250m	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,1 / 0,00

TABELA 3.29 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS).

Delta	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
V_x ± 0,15m/s	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	1,1 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	1,1 / 0,11
V_y ± 0,15m/s	Similaridade	N/A	N/A	0,7 / 0,07
V_z ± 0,15m/s	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,0 / 0,00

TABELA 3.30 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS).

Desvio Padrão	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\sigma_x = 1,0m$	Direta	-0,2 / -0,02	-0,5 / -0,05	1,1 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	0,9 / 0,09
$\sigma_y = 1,0m$	Similaridade	N/A	N/A	0,9 / 0,09
$\sigma_z = 1,0m$	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,8 / 0,08

TABELA 3.31 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS).

Desvio Padrão	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\sigma_{v_x} = 0,2\text{m/s}$	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	1,1 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	1,1 / 0,11
$\sigma_{v_y} = 0,2\text{m/s}$	Similaridade	N/A	N/A	1,1 / 0,11
$\sigma_{v_z} = 0,2\text{m/s}$	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	1,1 / 0,11

O sensor PAN-CBERS, modo multi-espectral, apresenta a mesma largura de campo que os sensores CCD e IRMSS, e com eles guarda uma relação de resultados que varia linearmente com a resolução espacial. Ou seja, ele é duas vezes mais sensível que o CCD e oito vezes mais sensível que o IRMSS.

Este sensor será lançado com os satélites CBERS 3 e 4, que carregarão sensores de posicionamento muito mais precisos que os dos atuais satélites CBERS 1 e 2. Esses resultados deverão ser plenamente alcançados.

3.3.6 PAN-CBERS 3 e 4 (modo pancromático)

As tabelas 3.32 (posição) e 3.33 (velocidade) apresentam os resultados para degradações provocadas por acréscimo de valores constantes aos dados de efemérides. As tabelas 3.34 (posição) e 3.35 (velocidade) apresentam os resultados para degradações causadas por acréscimo de ruído gaussiano de média nula.

TABELA 3.32 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P).

Delta	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
X ± 25m	Direta	-30,2 / -6,05	12,1 / 2,43	32,6 / 6,52
	Translação (N2)	N/A	N/A	0,6 / 0,11
Y ± 25m	Similaridade	N/A	N/A	0,4 / 0,09
Z ± 25m	Afim	N/A	N/A	0,0 / 0,00
X ± 250m	Direta	-302,2 / -60,5	121,5 / 11,21	325,8 / 65,16
	Translação	N/A	N/A	5,5 / 1,11
Y ± 250m	Similaridade	N/A	N/A	4,3 / 0,86
Z ± 250m	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,1 / 0,01

TABELA 3.33 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P).

Delta	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
V_x ± 0,15m/s	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	0,5 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	0,5 / 0,11
V_y ± 0,15m/s	Similaridade	N/A	N/A	0,4 / 0,07
V_z ± 0,15m/s	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,0 / 0,00

TABELA 3.34 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P).

Desvio Padrão	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\sigma_x = 0,6m$	Direta	-0,1 / -0,02	-0,3 / -0,06	0,6 / 0,13
	Translação (N2)	N/A	N/A	0,5 / 0,11
$\sigma_y = 0,6m$	Similaridade	N/A	N/A	0,5 / 0,10
$\sigma_z = 0,6m$	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,5 / 0,10

TABELA 3.35 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P).

Desvio Padrão	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\sigma_{V_x} = 0,2\text{m/s}$	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	0,6 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	0,6 / 0,11
$\sigma_{V_y} = 0,2\text{m/s}$	Similaridade	N/A	N/A	0,6 / 0,11
$\sigma_{V_z} = 0,2\text{m/s}$	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,6 / 0,11

O sensor PAN-CBERS, modo pancromático, apresenta a metade da largura de campo do mesmo sensor no modo multi-espectral, e uma resolução duas vezes melhor (10m – MS e 5m – P). Essas diferenças deveriam manter os mesmos intervalos de tolerância. Isso realmente ocorreu, a menos da contaminação da posição por ruído gaussiano. A exemplo do que já ocorrera com o sensor HRC (seção 3.3.4, HRC-CBERS 2B), houve necessidade de uma maior redução do desvio-padrão (ver tabelas 3.30, PAN-MS e 3.34, PAN-P).

Ainda assim, com os sensores de posicionamento dos satélites CBERS 3 e 4, muito mais precisos que os dos atuais satélites CBERS 1 e 2, esses resultados deverão ser plenamente atingidos.

3.3.7 IRS-CBERS 3 e 4

As tabelas 3.36 (posição) e 3.37 (velocidade) apresentam os resultados para degradações provocadas por acréscimo de valores constantes aos dados de efemérides. As tabelas 3.38 (posição) e 3.39 (velocidade) apresentam os resultados para degradações causadas por acréscimo de ruído gaussiano de média nula.

Os sensores IRMSS e IRS guardam muitas semelhanças, como a mesma largura do campo de visada, e destacando-se como principal diferença a resolução espacial. A comparação entre as tabelas 3.16 a 3.19 (seção 3.3.2, IRMSS-CBERS 1 e 2) e 3.36 a 3.39 mostram que os limiares para o sensor IRS são atingidos na metade do valor, tanto dos acréscimos (termos aditivos) quanto dos desvios-padrões dos ruídos gaussianos, exatamente a relação entre as resoluções espaciais (80m, IRMSS e 40m, IRS).

O sensor IRS estará embarcado nos satélites CBERS 3 e 4 que apresentarão sistemas de determinação de órbitas mais precisos.

TABELA 3.36 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS-CBERS.

Delta	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
X ± 100m	Direta	-120,9 / -3,02	48,9 / 1,22	130,4 / 3,26
	Translação (N2)	N/A	N/A	4,5 / 0,11
Y ± 100m	Similaridade	N/A	N/A	3,5 / 0,09
Z ± 100m	Afim	N/A	N/A	0,0 / 0,00
X ± 250m	Direta	-306,9 / -7,67	122,9 / 3,07	328,5 / 8,21
	Translação	N/A	N/A	11,6 / 0,29
Y ± 250m	Similaridade	N/A	N/A	8,8 / 0,22
Z ± 250m	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,1 / 0,00

TABELA 3.37 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS-CBERS.

Delta	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
V_x ± 0,6m/s	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	8,7 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	8,7 / 0,11
V_y ± 0,6m/s	Similaridade	N/A	N/A	6,0 / 0,08
V_z ± 0,6m/s	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,1 / 0,00

TABELA 3.38 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS-CBERS.

Desvio Padrão	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\sigma_x = 5m$	Direta	-0,8 / -0,02	-2,6 / -0,07	5,3 / 0,13
	Translação (N2)	N/A	N/A	4,5 / 0,11
$\sigma_y = 5m$	Similaridade	N/A	N/A	4,3 / 0,11
$\sigma_z = 5m$	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	4,0 / 0,10

TABELA 3.39 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS-CBERS.

Desvio Padrão	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\sigma_{V_x} = 0,6\text{m/s}$	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	3,4 / 0,09
	Translação (N2)	N/A	N/A	3,4 / 0,09
$\sigma_{V_y} = 0,6\text{m/s}$	Similaridade	N/A	N/A	3,4 / 0,09
$\sigma_{V_z} = 0,6\text{m/s}$	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	3,4 / 0,09

3.3.8 AWFI-CBERS 3 e 4

As tabelas 3.40 (posição) e 3.41 (velocidade) apresentam os resultados para degradações provocadas por acréscimo de valores constantes aos dados de efemérides. As tabelas 3.42 (posição) e 3.43 (velocidade) apresentam os resultados para degradações causadas por acréscimo de ruído gaussiano de média nula.

Os sensores WFI e AWFI apresentam diversas características semelhantes, como a mesma largura do campo de visada, e como principal diferença pode-se destacar a resolução espacial. A comparação entre as tabelas 3.20 a 3.23 (seção 3.3.3, WFI-CBERS 1, 2 e 2B) e 3.40 a 3.43 mostram que os limiares aceitáveis para uma degradação dos dados de efemérides apresentam uma correspondência linear próxima à relação entre as resoluções espaciais destes sensores (260m, WFI e 64m, AWFI).

Pela característica de campo amplo de visada, estes sensores não mantêm o mesmo tipo de relação com os demais. Eles são mais sensíveis que os demais à contaminação por ruído (constante ou gaussiano).

TABELA 3.40 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor AWFI-CBERS.

Delta	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
X ± 30m	Direta	33,1 / 0,52	26,2 / 0,41	42,2 / 0,66
	Translação (N2)	N/A	N/A	6,7 / 0,10
Y ± 30m	Similaridade	N/A	N/A	5,2 / 008
Z ± 30m	Afim	N/A	N/A	0,4 / 0,01
X ± 250m	Direta	275,5 / 4,30	218,6 / 3,42	351,7 / 5,50
	Translação	N/A	N/A	55,7 / 0,87
Y ± 250m	Similaridade	N/A	N/A	43,05 / 0,67
Z ± 250m	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	3,4 / 0,05

TABELA 3.41 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite na qualidade geométrica das imagens do sensor AWFI-CBERS.

Delta	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
Vx ± 0,2m/s	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	6,9 / 0,11
	Translação (N2)	N/A	N/A	6,9 / 0,11
Vy ± 0,2m/s	Similaridade	N/A	N/A	4,8 / 0,08
Vz ± 0,2m/s	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,0 / 0,00

TABELA 3.42 – Impacto da simulação da degradação da posição do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor AWFI-CBERS.

Desvio Padrão	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\sigma_x = 5m$	Direta	6,1 / 0,10	-2,0 / -0,03	6,4 / 0,10
	Translação (N2)	N/A	N/A	5,7 / 0,09
$\sigma_y = 5m$	Similaridade	N/A	N/A	5,5 / 0,09
$\sigma_z = 5m$	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	5,5 / 0,09

TABELA 3.43 – Impacto da simulação da degradação da velocidade do satélite por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor AWFI-CBERS.

Desvio Padrão	Transformação	ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\sigma_{v_x} = 0,3m/s$	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	7,6 / 0,12
	Translação (N2)	N/A	N/A	7,6 / 0,12
$\sigma_{v_y} = 0,3m/s$	Similaridade	N/A	N/A	7,4 / 0,12
$\sigma_{v_z} = 0,3m/s$	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	7,3 / 0,11

3.3.9 Análise Final

Os resultados mostram de forma clara que o efeito provocado pela adição do ruído gaussiano não pode ser corrigido por transformação alguma. Aliás, esse resultado era esperado, senão não seria um ruído aleatório.

Dessa forma, contaminações desse tipo afetam tão somente a geometria interna das imagens, e quando for atingido o limiar satisfatório para os níveis 3 e 4, também estará atingido o limiar para o nível 2.

A adição de valores constantes às efemérides são plenamente compensados por transformações polinomiais inerentes aos modelos de correção geométrica dos níveis 3 e 4. Para o nível 2, a situação se mostrou mais crítica no caso do sensor de alta resolução espacial, HRC, o que também não causa nenhuma surpresa, nem configura um problema, pois o satélite CBERS-2B carregará sensores de posicionamento baseado na tecnologia de GPS.

Ao mesmo tempo, os resultados apontam comprometimento da qualidade geométrica das imagens em nível 2 para o sensor CCD-CBERS 1 e 2. A qualidade das efemérides não é suficiente para garantir uma imagem com nível de correção geométrica de sistema com EMQ melhor que duas vezes a resolução espacial. Os sensores de estrela do satélite CBERS-2B permitirão imagens CCD com melhor qualidade geométrica.

A tabela 3.44 apresenta, para cada um dos sensores que têm a mesma largura de campo de visada, as degradações aceitas para uma boa qualidade geométrica de imagem nível 2, considerando-se o limiar de um décimo da resolução espacial. Nota-se de forma inequívoca que os resultados guardam uma relação linear com as resoluções espaciais.

No caso do valor constante adicionado à posição do satélite a relação é de 2,5, para o valor constante adicionado à velocidade do satélite a relação é de 0,015, para o desvio-padrão do ruído gaussiano da posição a relação é próxima a 0,9, enquanto para o desvio-padrão do ruído gaussiano da velocidade a relação é próxima a 0,018.

TABELA 3.44 – Relação da degradação das efemérides com o GSD.

sensor	CCD	IRMSS	PAN (MS)	IRS
Campo de visada (km)	120	120	120	120
GSD (m)	20	80	10	40
ΔR (m)	50	200	25	100
ΔV (m/s)	0,30	1,20	0,15	0,60
σ_R (m)	2	10	1	5
σ_V (m/s)	0,3	1,2	0,2	0,6

3.4 Atitude

A atitude é composta pelos três ângulos de rotação do satélite em relação à órbita: rolamento (*roll* – eixo X), arfagem (*pitch* – eixo Y) e guinada (*yaw* – eixo Z). Eles representam os três graus de liberdade que um satélite tem de se mover sem sair da órbita. A atitude é controlada e medida pelos sensores que compõem o sistema de controle de atitude e órbita (AOCS) do satélite.

O efeito de um valor constante para a atitude é semelhante ao dos ângulos de *boresight*, e apenas um deles (guinada) pode afetar de forma significativa a geometria interna da imagem.

Porém a medição da atitude apresenta imprecisão bem maior que a dos ângulos de *boresight*. Além disso, apresenta também um comportamento dinâmico, pois o AOCS está constantemente atuando para fazer com que a atitude seja nula. Essas variações da atitude ao longo da imagem provocam distorções na geometria interna.

Os dois primeiros satélites da série CBERS não dispõem de um AOCS de alta qualidade. Como conseqüência, a qualidade da geometria interna das imagens fica comprometida e abaixo do que é esperado pelos usuários, principalmente quando se leva em consideração que o paradigma brasileiro em imagens de satélite, que é o sistema Landsat.

Os satélites CBERS 1 e 2 apresentam como elementos de controle da atitude *thusters*, os volantes de inércia e as barras magnéticas. Para o cálculo da atitude, contam com os sensores de horizonte ou de Terra (IRES – *InfraRed Earth Sensor*), solar (analógico e digital) e os giros. Esses equipamentos não são suficientes para garantir uma boa qualidade na medição da atitude. Por conta disso, os próximos satélites deverão contar com sensores de estrela. Além disso, todos os sensores que compõem o AOCS deverão ser mais precisos, apresentando melhor qualidade na medição dos ângulos de atitude.

As figuras 3.7 a 3.9 apresentam os efeitos das componentes da atitude para órbitas descendentes.

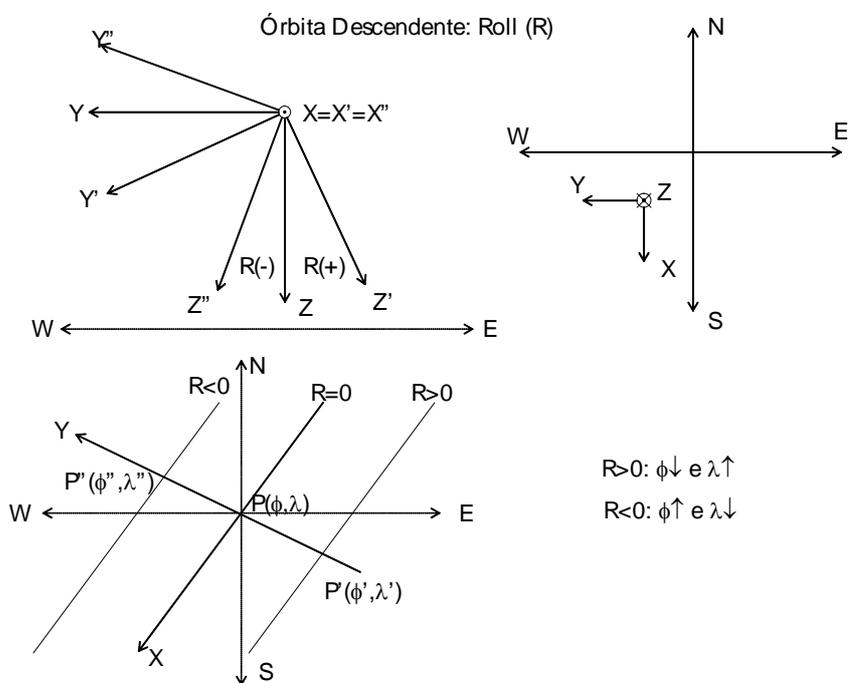


FIGURA 3.7 – Efeito do rolamento na órbita descendente.

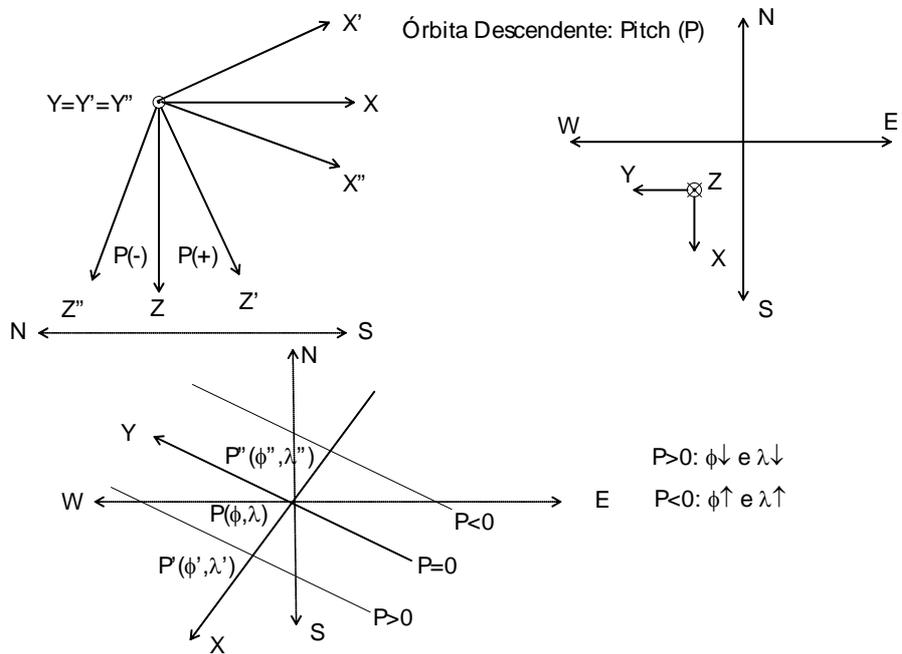


FIGURA 3.8 – Efeito da arfagem na órbita descendente.

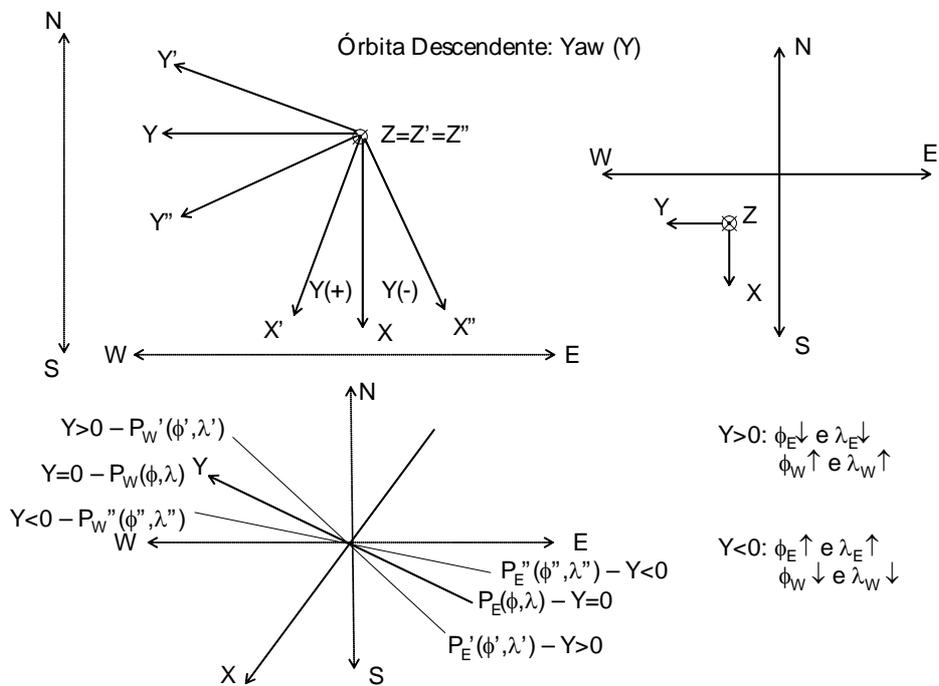


FIGURA 3.9 – Efeito da guinada na órbita descendente.

As figuras 3.10 a 3.12 apresentam a relação entre o erro de posicionamento e os erros de medição dos ângulos de atitude.

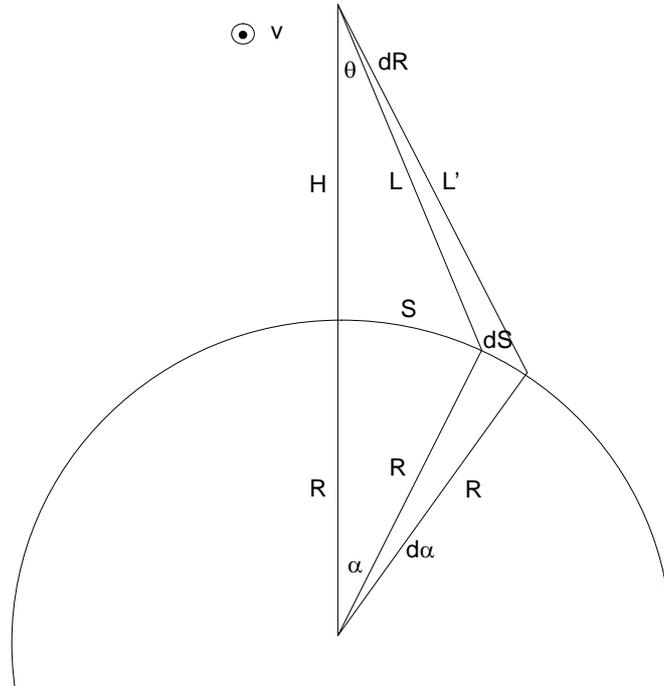


FIGURA 3.10 – Desvio do posicionamento de um *pixel* devido ao erro do rolagento.

O efeito provocado por um erro constante na medição do ângulo de rolagento (R) é um deslocamento (dS) da imagem no sentido transversal à órbita. Da figura 3.10 e das equações 3.19 a 3.22 nota-se que esse deslocamento depende do ângulo de visada (θ), crescendo quando se afasta do nadir:

$$\frac{\sin \theta}{R} = \frac{\sin(\theta + \alpha)}{R + H} = \frac{\sin \alpha}{L} \quad (3.19)$$

$$S = R \cdot \alpha \quad (3.20)$$

$$\frac{\sin(\theta + dR)}{R} = \frac{\sin(\theta + dR + \alpha + d\alpha)}{R + H} = \frac{\sin(\alpha + d\alpha)}{L'} \quad (3.21)$$

$$dS = R \cdot d\alpha \quad (3.22)$$

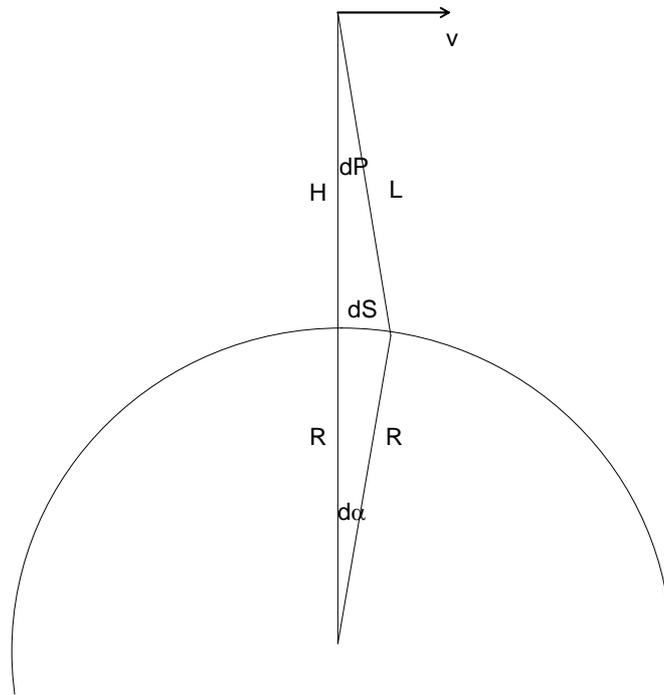


FIGURA 3.11 – Desvio do posicionamento de um *pixel* devido ao erro da arfagem.

O efeito provocado por um erro constante na medição do ângulo de arfagem (P) é um deslocamento (dS) da imagem no sentido da órbita:

$$\frac{\sin dP}{R} = \frac{\sin(dP + d\alpha)}{R + H} = \frac{\sin d\alpha}{L} \quad (3.23)$$

$$dS = R.d\alpha \quad (3.24)$$

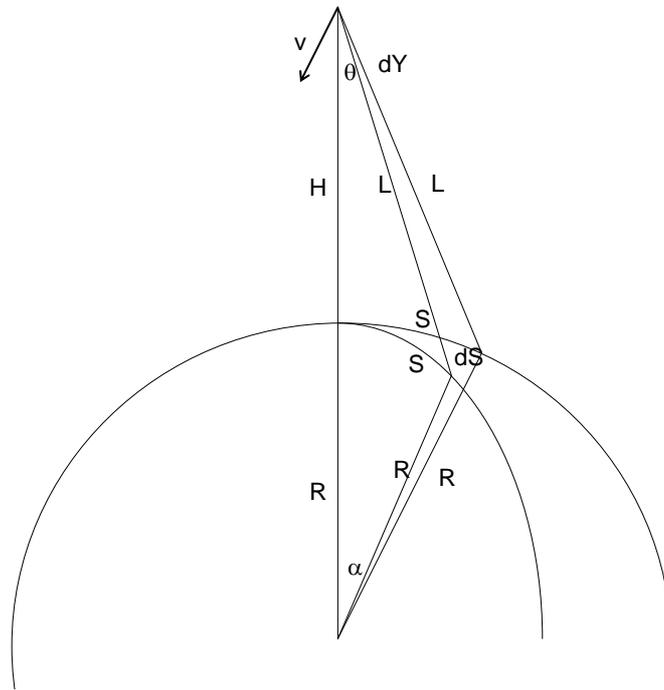


FIGURA 3.12 – Desvio do posicionamento de um *pixel* devido ao erro da guinada.

O efeito provocado por um erro constante na medição do ângulo de guinada (Y) é um cisalhamento da imagem no sentido da órbita:

$$\frac{\sin \theta}{R} = \frac{\sin(\theta + \alpha)}{R + H} = \frac{\sin \alpha}{L} \quad (3.25)$$

$$S = R \cdot \alpha \quad (3.26)$$

$$\cos d\alpha = \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \cdot \cos dY \quad (3.27)$$

$$dS = R \cdot d\alpha \quad (3.28)$$

As próximas seções apresentarão análises sobre distorções causadas pelos dados de atitude para diversos sensores da família CBERS.

São realizadas duas análises diferentes. Na primeira, o cenário 1 (referência) usa as atitudes transmitidas e o cenário 2 (ruído) acrescenta um valor fixo a estes ângulos, como se o erro tivesse um comportamento sistemático, porém não conhecido. Na segunda, o cenário 2 é obtido acrescentando-se um ruído gaussiano aos ângulos de

atitude de média nula (a média teria o mesmo efeito do que é analisado na primeira abordagem). Nesse caso o erro varia dentro de um determinado intervalo de confiança.

3.4.1 CCD-CBERS 1, 2 e 2B

A influência da atitude na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS foi estudada dentro do intervalo definido de precisão de medição dos ângulos: 0.15° (3σ) (CAST, 1996), para os satélites CBERS 1 e 2 e 0.03° (3σ) (CAST, 2005), para os satélites CBERS 3 e 4. É importante destacar que os satélites CBERS 1 e 2 não carregam sensores estelares, o que compromete a qualidade dos dados do AOCS. E o intervalo de precisão para os satélites CBERS 3 e 4 não consideram o uso dos sensores estelares. Ou seja, para os novos satélites, a precisão dos dados de atitude deverá ser ainda maior. As tabelas 3.45 a 3.58 apresentam os resultados para diversos valores e diversas combinações entre as componentes de atitude.

Essas tabelas apresentam dois conjuntos de valores relativos à especificação da precisão da medição da atitude, que serão considerados como limitantes para os erros sistemático e aleatório da medição dos ângulos de atitude. Um, de 0.15° e 0.001° (apêndice C, Características dos Satélites CBERS e seus Sensores), corresponde à especificação do AOCS dos satélites CBERS 1 e 2, e o outro, de 0.03° e 0.0001° , corresponde à especificação do AOCS dos satélites CBERS 3 e 4. Isto foi feito para simular o efeito deste nível de erro nas imagens do sensor MUX, desses satélites, que não está sendo considerado neste trabalho dado a sua forte semelhança com o sensor CCD.

TABELA 3.45 – Impacto da simulação da degradação do rolamento na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Rolamento		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\pm 0,030^\circ$ (espec .)	Direta	395,2 / 19,76	97,1 / 48,5	407,0 / 20,35
	Translação	N/A	N/A	1,0 / 0,05
	Similaridade	N/A	N/A	1,0 / 0,05
	Afim	N/A	N/A	0,9 / 0,05
$\pm 0,060^\circ$	Direta	790,6 / 39,53	194,2 / 9,71	814,1 / 40,70
	Translação (N2)	N/A	N/A	2,0 / 0,10
	Similaridade	N/A	N/A	2,0 / 0,10
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	1,9 / 0,10
$\pm 0,150^\circ$ (espec.)	Direta	1.976,5 / 98,82	485,5 / 24,27	2.035,2 / 101,76
	Translação	N/A	N/A	5,0 / 0,25
	Similaridade	N/A	N/A	5,0 / 0,25
	Afim	N/A	N/A	4,8 / 0,24

TABELA 3.46 – Impacto da simulação da degradação da arfagem na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Arfagem		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\pm 0,030^\circ$ (espec.)	Direta	96,8 / 4,84	394,3 / 19,72	406,0 / 20,30
	Translação	N/A	N/A	0,2 / 0,01
	Similaridade	N/A	N/A	0,2 / 0,01
	Afim	N/A	N/A	0,2 / 0,01
$\pm 0,150^\circ$ (espec.)	Direta	484,2 / 24,21	1.971,5 / 98,58	2.030,1 / 101,51
	Translação (N2)	N/A	N/A	1,2 / 0,06
	Similaridade	N/A	N/A	0,9 / 0,05
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,4 / 0,02

TABELA 3.47 – Impacto da simulação da degradação da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Guinada		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\pm 0,003^\circ$	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	1,9 / 0,10
	Translação (N2)	N/A	N/A	1,9 / 0,10
	Similaridade	N/A	N/A	1,4 / 0,07
	Afim	N/A	N/A	0,0 / 0,00
$\pm 0,030^\circ$ (espec .)	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	19,3 / 0,96
	Translação	N/A	N/A	19,3 / 0,96
	Similaridade	N/A	N/A	13,6 / 0,68
	Afim	N/A	N/A	0,2 / 0,01
$\pm 0,150^\circ$ (espec.)	Direta	0,0 / 0,00	0,0 / 0,00	96,3 / 4,82
	Translação	N/A	N/A	96,3 / 4,82
	Similaridade	N/A	N/A	68,1 / 3,40
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,8 / 0,04

TABELA 3.48 – Impacto da simulação da degradação do rolamento e da arfagem na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Rolamento e Arfagem		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\pm 0,030^\circ$ (espec.)	Direta	298,4 / 14,92	491,4 / 24,57	574,9 / 28,75
	Translação	N/A	N/A	1,0 / 0,05
	Similaridade	N/A	N/A	1,0 / 0,05
	Afim	N/A	N/A	1,0 / 0,05
$\pm 0,060^\circ$	Direta	596,9 / 29,85	982,8 / 49,14	1.149,85 / 57,49
	Translação (N2)	N/A	N/A	2,0 / 0,10
	Similaridade	N/A	N/A	2,0 / 0,10
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	1,9 / 0,10
$\pm 0,150^\circ$ (espec.)	Direta	1.492,3 / 74,61	2.457,0 / 122,85	2.874,7 / 143,73
	Translação	N/A	N/A	5,2 / 0,26
	Similaridade	N/A	N/A	5,1 / 0,26
	Afim	N/A	N/A	4,8 / 0,24

TABELA 3.49 – Impacto da simulação da degradação do rolamento e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Rolamento e Guinada		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\pm 0,003^\circ$	Direta	-39,5 / -1,98	9,7 / 0,49	40,7 / 2,04
	Translação (N2)	N/A	N/A	1,9 / 0,10
	Similaridade	N/A	N/A	1,4 / 0,07
	Afim	N/A	N/A	0,1 / 0,00
$\pm 0,030^\circ$ (espec .)	Direta	395,3 / 19,76	9,71 / 4,85	407,5 / 20,37
	Translação	N/A	N/A	19,3 / 0,96
	Similaridade	N/A	N/A	13,6 / 0,68
	Afim	N/A	N/A	1,0 / 0,05
$\pm 0,060^\circ$	Direta	790,6 / 39,53	194,2 / 9,71	815,0 / 40,75
	Translação	N/A	N/A	38,6 / 1,93
	Similaridade	N/A	N/A	27,3 / 1,36
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	2,0 / 0,10
$\pm 0,150^\circ$ (espec.)	Direta	1.976,5 / 98,82	484,4 / 24,27	2.035,2 / 101,76
	Translação	N/A	N/A	96,4 / 4,82
	Similaridade	N/A	N/A	68,2 / 3,41
	Afim	N/A	N/A	4,9 / 0,25

TABELA 3.50 – Impacto da simulação da degradação da arfagem e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Arfagem e Guinada		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\pm 0,003^\circ$	Direta	9,7 / 0,48	39,4 / 1,97	40,6 / 2,03
	Translação (N2)	N/A	N/A	1,9 / 0,10
	Similaridade	N/A	N/A	1,3 / 0,07
	Afim	N/A	N/A	0,0 / 0,00
$\pm 0,030^\circ$ (espec .)	Direta	96,8 / 4,84	394,3 / 19,71	406,5 / 20,33
	Translação	N/A	N/A	19,26 / 0,96
	Similaridade	N/A	N/A	13,4 / 0,67
	Afim	N/A	N/A	0,2 / 0,01
$\pm 0,150^\circ$ (espec.)	Direta	484,3 / 24,21	1.971,5 / 98,57	2.032,4 / 101,62
	Translação	N/A	N/A	96,2 / 4,81
	Similaridade	N/A	N/A	67,3 / 3,36
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,9 / 0,05

TABELA 3.51 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Rolamento, Arfagem e Guinada		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\pm 0,003^\circ$	Direta	-29,8 / -1,49	49,1 / 2,46	57,5 / 2,88
	Translação (N2)	N/A	N/A	1,9 / 0,10
	Similaridade	N/A	N/A	1,3 / 0,07
	Afim	N/A	N/A	0,1 / 0,00
$\pm 0,030^\circ$ (espec .)	Direta	298,4 / 14,92	491,4 / 24,57	575,1 / 28,76
	Translação	N/A	N/A	32,1 / 1,60
	Similaridade	N/A	N/A	22,4 / 1,12
	Afim	N/A	N/A	1,6 / 0,08
$\pm 0,060^\circ$	Direta	596,9 / 29,84	982,8 / 49,14	1.150,5 / 57,52
	Translação	N/A	N/A	38,5 / 1,92
	Similaridade	N/A	N/A	26,9 / 1,35
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	2,0 / 0,10
$\pm 0,150^\circ$ (espec.)	Direta	1.492,2 / 74,61	2.457,0 / 122,85	2.876,2 / 143,81
	Translação	N/A	N/A	96,0 / 4,80
	Similaridade	N/A	N/A	67,2 / 3,36
	Afim	N/A	N/A	4,9 / 0,25

TABELA 3.52 – Impacto da simulação da degradação do rolamento por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Rolamento Desvio-padrão	$\sigma = 0,0001^\circ$ (especificação)	$\sigma = 0,0002^\circ$ (Níveis 2, 3 e 4)	$\sigma = 0,0010^\circ$ (especificação)
Transformação	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
Direta	1,0 / 0,05	2,0 / 0,10	10,1 / 0,51
Translação (N2)	1,0 / 0,05	1,9 / 0,10	9,7 / 0,49
Similaridade	1,0 / 0,05	1,9 / 0,10	9,6 / 0,48
Afim (N3 e N4)	0,9 / 0,05	1,9 / 0,09	9,4 / 0,47

TABELA 3.53 – Impacto da simulação da degradação da arfagem por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Arfagem Desvio-padrão	$\sigma = 0,0001^\circ$ (especificação) (Níveis 2, 3 e 4)	$\sigma = 0,0010^\circ$ (especificação)
Transformação	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
Direta	1,4 / 0,07	14,1 / 0,71
Translação (N2)	1,4 / 0,07	13,9 / 0,69
Similaridade	1,3 / 0,07	13,0 / 0,65
Afim (N3 e N4)	1,2 / 0,06	12,2 / 0,61

TABELA 3.54 – Impacto da simulação da degradação da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Guinada Desvio-padrão	$\sigma = 0,0001^\circ$ (especificação)	$\sigma = 0,0010^\circ$ (Níveis 2, 3 e 4) (especificação)
Transformação	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
Direta	0,1 / 0,00	0,6 / 0,03
Translação (N2)	0,1 / 0,00	0,6 / 0,03
Similaridade	0,1 / 0,00	0,6 / 0,03
Afim (N3 e N4)	0,1 / 0,00	0,5 / 0,03

TABELA 3.55 – Impacto da simulação da degradação do rolamento e da arfagem por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Rolamento + Arfagem Desvio-padrão	$\sigma = 0,0001^\circ$ (especificação) (Níveis 2, 3 e 4)	$\sigma = 0,0010^\circ$ (especificação)
Transformação	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
Direta	1,7 / 0,09	17,4 / 0,87
Translação (N2)	1,7 / 0,09	16,9 / 0,85
Similaridade	1,6 / 0,08	16,2 / 0,81
Afim (N3 e N4)	1,5 / 0,08	15,4 / 0,77

TABELA 3.56 – Impacto da simulação da degradação do rolamento e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Rolamento + Guinada Desvio-padrão	$\sigma = 0,0001^\circ$ (especificação)	$\sigma = 0,0002^\circ$ (Níveis 2, 3 e 4)	$\sigma = 0,0010^\circ$ (especificação)
Transformação	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
Direta	1,0 / 0,05	2,0 / 0,10	10,2 / 0,51
Translação (N2)	1,0 / 0,05	2,0 / 0,10	9,8 / 0,49
Similaridade	1,0 / 0,05	1,9 / 0,10	9,6 / 0,48
Afim (N3 e N4)	0,9 / 0,05	1,9 / 0,09	9,4 / 0,47

TABELA 3.57 – Impacto da simulação da degradação da arfagem e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Arfagem + Guinada Desvio-padrão	$\sigma = 0,0001^\circ$ (especificação) (Níveis 2, 3 e 4)	$\sigma = 0,0010^\circ$ (especificação)
Transformação	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
Direta	1,4 / 0,07	14,2 / 0,71
Translação (N2)	1,4 / 0,07	13,9 / 0,69
Similaridade	1,3 / 0,07	13,1 / 0,65
Afim (N3 e N4)	1,2 / 0,06	12,2 / 0,61

TABELA 3.58 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Rolamento + Arfagem + Guinada Desvio-padrão	$\sigma = 0,0001^\circ$ (especificação) (Níveis 2, 3 e 4)	$\sigma = 0,0010^\circ$ (especificação)
Transformação	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
Direta	1,7 / 0,09	17,4 / 0,87
Translação (N2)	1,7 / 0,09	17,0 / 0,85
Similaridade	1,6 / 0,08	16,2 / 0,81
Afim (N3 e N4)	1,5 / 0,08	15,4 / 0,77

Uma análise nas tabelas 3.45 a 3.51 mostra claramente que os ângulos de rolamento e arfagem provocam um efeito muito similar a de um simples deslocamento da imagem, refletindo quase que somente na geometria externa. O deslocamento devido ao rolamento se dá na direção transversal à órbita (mais próxima à direção leste-oeste), enquanto o deslocamento devido à arfagem se dá na direção da órbita (mais próxima à direção norte-sul). Isso é facilmente verificado nas tabelas pela observação das médias dos desvios ξ_E e ξ_N .

Em relação à componente arfagem (tabela 3.46), o erro residual depois da correção da translação está muito abaixo do limiar de um décimo da resolução do sensor, qualquer que seja o valor apurado, desde que dentro da especificação do AOCS. Isso é válido não apenas para os futuros satélites, mas também para os CBERS 1 e 2.

Uma análise cuidadosa na tabela 3.45 mostra que o efeito da distorção provocada pelo rolamento é não linear, e que, mesmo após a transformação afim, encontramos um resíduo superior ao limiar estipulado quando a distorção atinge o valor máximo de $0,15^\circ$, relativo à especificação para as satélites CBERS 1 e 2. Para esta componente da

atitude, o limiar é atingido para um ângulo próximo a $0,06^\circ$, abaixo da precisão especificada para o dado. Ou seja, para esses satélites há um claro comprometimento da qualidade geométrica das imagens devido à especificação da atitude. Porém esse problema não ocorrerá nos futuros satélites da série.

A tabela 3.47 mostra que a guinada afeta tão somente a geometria interna, e que a distorção equivale a um cisalhamento na imagem. Portanto, a qualidade geométrica satisfatória (abaixo de duas vezes a resolução espacial) só é atingida após a aplicação da transformação afim, independente do satélite. Esta tabela mostra também que o erro residual após essa transformação fica abaixo do limiar estipulado para todos os valores testados.

Os resultados indicam ainda que a qualidade geométrica das imagens em nível 2 de processamento está fortemente comprometida pela baixa precisão do ângulo de guinada. O EMQ da imagem ultrapassa o valor da resolução espacial para muitos dos valores destes ângulos, chegando a alcançar a marca de cinco vezes o valor da resolução espacial (tabela 3.47). Para este nível de processamento, a precisão dos dados de atitude deveria ser igual ou melhor que $0,003^\circ$ (tabela 3.51). Porém, este nível de precisão só deverá ser alcançado para os próximos satélites da série CBERS, que serão dotados de sensores estelares.

Porém, em se tratando de níveis mais avançados, o rolamento é a componente mais crítica, pois seu resíduo mesmo após a transformação afim é uma ordem de grandeza superior aos das demais componentes de atitude. Isso decorre do caráter não linear da distorção provocada pelo rolamento devido à esfericidade da Terra. A distorção cresce à medida que o ponto se afasta do nadir.

Analisando a variação do erro na medição da atitude, simulada por meio da adição de ruído gaussiano de média nula (tabelas 3.52 a 3.58), verifica-se que os resultados não são satisfatórios para a especificação relativa aos satélites CBERS 1 e 2 ($0,001^\circ$), a menos do ângulo relativo à guinada. A distorção resultante ultrapassa a metade da resolução espacial do sensor. Isto configura mais um elemento a comprometer a

qualidade geométrica das imagens, e neste caso compromete inclusive a qualidade geométrica das imagens em níveis 3 e 4.

Por outro lado, os resultados dessas tabelas mostram que a especificação para o sistema AOCS dos satélites CBERS 3 e 4 ($0,0001^\circ$) resolverá esses problemas. Para essa especificação, todos os resultados das tabelas 3.52 a 3.58 são muito bons tanto para os níveis 3 e 4 quanto para o nível 2.

3.4.2 IRMSS-CBERS 1 e 2

A influência da atitude na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS fica restrita à especificação do AOCS para os satélites CBERS 1 e 2. O sensor IRMSS deve apresentar resultados absolutos semelhantes ao do CCD-CBERS, uma vez que apresentam praticamente a mesma largura de campo de visada e, conseqüentemente, dimensões de imagens próximas. Em termos relativos, os resultados deverão ser quatro vezes melhores, considerando a relação entre as resoluções espaciais.

A tabela 3.59 apresenta os resultados para o erro sistemático, enquanto a tabela 3.60 apresenta os resultados para o erro aleatório da atitude.

Comparando os resultados das tabelas 3.51 e 3.59 para o valor comum de $0,15^\circ$, verifica-se que as distorções, conforme esperado, estão muito próximas quanto a valores absolutos.

TABELA 3.59 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS.

Rolamento, Arfagem e Guinada		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\pm 0,015^\circ$	Direta	149,3 / 1,87	245,7 / 3,07	287,7 / 3,60
	Translação (N2)	N/A	N/A	9,9 / 0,12
	Similaridade	N/A	N/A	6,8 / 0,09
	Afím	N/A	N/A	0,5 / 0,01
$\pm 0,150^\circ$ (espec.)	Direta	1.492,5 / 18,66	2.457,0 / 30,71	2.876,5 / 35,96
	Translação	N/A	N/A	98,5 / 1,23
	Similaridade	N/A	N/A	68,0 / 0,85
	Afím (N3 e N4)	N/A	N/A	5,2 / 0,06

TABELA 3.60 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS.

Rolamento + Arfagem + Guinada Desvio-padrão	$\sigma = 0,0005^\circ$ (Níveis 2, 3 e 4)	$\sigma = 0,0010^\circ$ (especificação)
Transformação	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
Direta	8,7 / 0,11	17,5 / 0,22
Translação (N2)	8,5 / 0,11	17,1 / 0,21
Similaridade	8,1 / 0,10	16,2 / 0,20
Afim (N3 e N4)	7,7 / 0,10	15,4 / 0,19

Os resultados da tabela 3.59 indicam então que para os níveis 3 e 4 a atitude, mesmo que de má qualidade, dos satélites CBERS 1 e 2 não compromete a geometria das imagens IRMSS. Para o nível 2, entretanto, o AOCS deveria gerar valores de atitude com precisão pelo menos dez vezes melhor.

A tabela 3.60 apresenta os resultados para a variação do erro de medição da atitude. Os resultados são melhores que para o sensor CCD-CBERS tão somente pela diferença nas resoluções espaciais. Ainda assim, a especificação deveria ser duas vezes melhor para atender de forma satisfatória o sensor IRMSS, qualquer que seja o nível de processamento.

3.4.3 WFI-CBERS 1, 2 e 2B

A influência da atitude na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS fica restrita à especificação do AOCS para os satélites CBERS 1 e 2. O sensor WFI apresenta uma maior sensibilidade a erros no apontamento por conta da distorção

panorâmica. Isto explica a relação entre os resultados desse sensor com outros que apresentam poder resolutivo muito superior.

A tabela 3.61 apresenta os resultados relativos ao erro sistemático, enquanto a tabela 3.62 apresenta os resultados para o erro aleatório da atitude.

TABELA 3.61 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS.

Rolamento, Arfagem e Guinada		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\pm 0,006^\circ$	Direta	-77,4 / -0,32	94,2 / 0,39	124,8 / 0,52
	Translação (N2)	N/A	N/A	26,3 / 0,11
	Similaridade	N/A	N/A	19,4 / 0,08
	Afim	N/A	N/A	8,3 / 0,03
$\pm 0,020^\circ$	Direta	-258,0 / -1,07	314,2 / 1,31	415,8 / 1,73
	Translação	N/A	N/A	87,6 / 0,37
	Similaridade	N/A	N/A	64,6 / 0,27
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	27,7 / 0,12
$\pm 0,150^\circ$ (espec.)	Direta	-1.934,6 / 8,21	2.355,6 / 9,82	3.117,8 / 12,99
	Translação	N/A	N/A	655,3 / 2,73
	Similaridade	N/A	N/A	483,2 / 2,01
	Afim	N/A	N/A	207,2 / 0,86

TABELA 3.62 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS.

Rolamento + Arfagem + Guinada Desvio-padrão	$\sigma = 0,001^\circ$ (Níveis 2, 3 e 4) (especificação)
Transformação	EMQ (m / GSD)
Direta	12,1 / 0,05
Translação (N2)	11,7 / 0,05
Similaridade	11,7 / 0,05
Afim (N3 e N4)	11,1 / 0,05

Os resultados da tabela 3.61 são não satisfatórios nem para os níveis 3 e 4, que fazem uso de pontos de controle para reduzir os resíduos, enquanto o erro aleatório (tabela 3.62) não compromete a qualidade geométrica de nenhum nível de processamento.

Os resultados relativos (em GSD) para o erro sistemático da atitude são compatíveis com os de sensor de alta resolução espacial. Isso é explicado pela distorção panorâmica que, que cresce significativamente quando a região da imagem se afasta do nadir. Devido à característica de projeção cilíndrica dos sensores, a única componente que não acarreta em distorção panorâmica é a arfagem.

3.4.4 HRC-CBERS 2B

O sensor HRC estará presente no satélite CBERS-2B. Este, por sua vez, levará a bordo sensores estelares para uma melhor medição dos ângulos de atitude (CAST, 2005). Entretanto, não há divulgação sobre a precisão da medição dos ângulos de atitude destes sensores.

A tabela 3.63 apresenta resultados que fogem às especificações dos satélites CBERS, mas satisfatórios para o nível 2 de processamento e também para os mais avançados, pois os sistemas estelares apresentam precisão melhor que $0,002^\circ$ ($3^\circ\sigma$).

A tabela 3.64 indica a necessidade de um sistema de grande precisão para garantir a qualidade geométrica das imagens de alta resolução espacial, da ordem de cem vezes a precisão dos satélites CBERS 3 e 4 e mil vezes a dos satélites CBERS 1 e 2. Sensores estelares podem alcançar tal precisão. Os resultados desta tabela mostram uma liberdade muito mais restrita que a do sensor CCD, o que indica que sensores de alta resolução espacial são mais sensíveis a erros aleatórios que a erros sistemáticos.

TABELA 3.63 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.

Rolamento, Arfagem e Guinada		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\pm 0,002^\circ$	Direta	19,8 / 7,92	32,8 / 13,10	38,3 / 15,31
	Translação(N2)	N/A	N/A	0,3 / 0,13
	Similaridade	N/A	N/A	0,2 / 0,09
	Afim	N/A	N/A	0,0 / 0,00
$\pm 0,030^\circ$	Direta	990,6 / 396,23	1.637,7 / 655,07	1.914,0 / 765,61
	Translação	N/A	N/A	16,0 / 6,40
	Similaridade	N/A	N/A	11,6 / 4,63
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,24 / 0,10
$\pm 0,150^\circ$ (espec.)	Direta	-1.485,9 / 594,35	2.456,5 / 982,61	2.871,1 / 1.148,42
	Translação	N/A	N/A	24,0 / 9,59
	Similaridade	N/A	N/A	17,3 / 6,93
	Afim	N/A	N/A	0,4 / 0,14

TABELA 3.64 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.

Rolamento + Arfagem + Guinada Desvio-padrão	$\sigma = 0,00001^\circ$ (Níveis 2, 3 e 4)	$\sigma = 0,00100^\circ$ (especificação)
Transformação	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
Direta	0,2 / 0,07	17,2 / 6,88
Translação (N2)	0,2 / 0,07	17,2 / 6,87
Similaridade	0,2 / 0,07	16,6 / 6,64
Afim (N3 e N4)	0,2 / 0,06	15,2 / 6,08

3.4.5 PAN-CBERS 3 e 4 (modo multi-espectral)

A influência da atitude na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS) fica restrita à especificação do AOCS para os satélites CBERS 3 e 4. O sensor PAN, modo multi-espectral, deve apresentar resultados absolutos semelhantes aos do CCD e IRMSS CBERS. Em termos relativos, os resultados esperados devem ser duas e oito vezes piores, respectivamente.

A tabela 3.65 (erro sistemático) apresenta os resultados para degradações provocadas por acréscimo de valores constantes aos dados de atitude. A tabela 3.66 (erro aleatório) apresenta os resultados para degradações causadas por acréscimo de ruído gaussiano de média nula.

A comparação entre as tabelas 3.51 (CCD) e 3.65 e entre as tabelas 3.48 (CCD) e 3.66 apresentam resultados compatíveis com a relação entre as resoluções espaciais dos sensores CCD e PAN, modo multi-espectral.

A tabela 3.65 demonstra que o erro sistemático não compromete a qualidade geométrica das imagens em níveis 3 e 4 de processamento. Para o nível 2, a precisão do sistema AOCS deveria ser pelo menos quinze vezes melhor.

Os resultados da tabela 3.66 mostram que a especificação para os satélites CBERS 3 e 4 não são suficientes para gerar imagens de boa qualidade geométrica, mesmo em níveis avançados de processamento. O erro aleatório permitido deveria ser pelo menos duas vezes menor.

TABELA 3.65 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS).

Rolamento, Arfagem e Guinada		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\pm 0,002^\circ$	Direta	19,9 / 1,99	32,8 / 3,28	38,3 / 3,83
	Translação (N2)	N/A	N/A	1,3 / 0,13
	Similaridade	N/A	N/A	0,9 / 0,09
	Afim	N/A	N/A	0,1 / 0,01
$\pm 0,030^\circ$ (espec.)	Direta	298,4 / 29,84	491,3 / 49,13	575,2 / 57,52
	Translação	N/A	N/A	19,3 / 1,93
	Similaridade	N/A	N/A	13,5 / 1,35
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	1,0 / 0,10

TABELA 3.66 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS).

Rolamento + Arfagem + Guinada Desvio-padrão	$\sigma = 0,00006^\circ$ (Níveis 2, 3 e 4)	$\sigma = 0,00010^\circ$ (especificação)
Transformação	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
Direta	1,0 / 0,10	1,7 / 0,17
Translação (N2)	1,0 / 0,10	1,7 / 0,17
Similaridade	1,0 / 0,10	1,6 / 0,16
Afim (N3 e N4)	1,0 / 0,10	1,5 / 0,15

Novamente, a precisão esperada para os dados provenientes do sensor estelar deverá ser suficiente para garantir a qualidade geométrica das imagens.

3.4.6 PAN-CBERS 3 e 4 (modo pancromático)

A influência da atitude na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P) fica restrita à especificação do AOCS para os satélites CBERS 3 e 4. Conforme visto na seção anterior, o sensor PAN também requer precisão nos dados de atitude superior à projetada para os satélites CBERS 3 e 4.

A tabela 3.67 (erro sistemático) apresenta os resultados para degradações provocadas por acréscimo de valores constantes aos dados de atitude. A tabela 3.68 (erro aleatório) apresenta os resultados para degradações causadas por acréscimo de ruído gaussiano de média nula.

TABELA 3.67 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P).

Rolamento, Arfagem e Guinada		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\pm 0,002^\circ$	Direta	19,8 / 3,97	32,8 / 6,55	38,3 / 7,66
	Translação (N2)	N/A	N/A	0,6 / 0,13
	Similaridade	N/A	N/A	0,4 / 0,09
	Afim	N/A	N/A	0,0 / 0,00
$\pm 0,030^\circ$ (espec.)	Direta	-297,4 / -59,49	491,3 / 98,26	574,4 / 114,88
	Translação	N/A	N/A	9,6 / 1,92
	Similaridade	N/A	N/A	6,7 / 1,34
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	0,3 / 0,05

TABELA 3.68 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P).

Rolamento + Arfagem + Guinada Desvio-padrão	$\sigma = 0,00003^\circ$ (Níveis 2, 3 e 4)	$\sigma = 0,00010^\circ$ (especificação)
Transformação	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
Direta	0,5 / 0,10	1,7 / 0,35
Translação (N2)	0,5 / 0,10	1,7 / 0,34
Similaridade	0,5 / 0,10	1,6 / 0,32
Afim (N3 e N4)	0,5 / 0,10	1,5 / 0,31

Comparando os resultados das tabelas 3.65 (PAN-MS) com os da tabela 3.67 (PAN-P), nota-se ambos necessitam de mesma precisão quanto à componente sistemática do erro de medição, pois a redução no EMQ em valor absoluto é compensada pela redução da resolução espacial, resultando em valores relativos de EMQ próximos.

Já os resultados das tabelas 3.66 (PAN-MS) e 3.68 (PAN-P) apresentam valores absolutos muito semelhantes, para erros gaussianos de mesmo desvio-padrão, o que acarreta num erro relativo do modo pancromático duas vezes pior que o erro relativo do modo multi-espectral. Ou seja, a precisão do AOCS deveria ser três vezes melhor que o especificado.

As distorções observadas para este sensor, independente do modo de operação, só atingirão um nível satisfatório de correção quando forem usados os dados fornecidos pelo sensor estelar. OS dois modos de operação necessitam de sistemas mais precisos que as especificações do AOCS dos satélites CBERS-3 e 4.

3.4.7 IRS-CBERS 3 e 4

A influência das degradações dos ângulos de atitude na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS fica restrita à especificação do AOCS para os satélites CBERS 3 e 4. Ela está apresentada nas tabelas 3.69 (erro sistemático) e 3.70 (erro aleatório).

Como este sensor é em muitos aspectos semelhante ao IRMSS, são esperados resultados absolutos próximos aos das tabelas 3.59 e 3.60 (seção 3.4.2), e relativos duas vezes piores, decorrente da relação entre as resoluções espaciais desses sensores.

TABELA 3.69 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS-CBERS.

Rolamento, Arfagem e Guinada		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\pm 0,006^\circ$	Direta	-59,7 / -1,49	98,3 / 2,46	115,1 / 2,88
	Translação (N2)	N/A	N/A	4,0 / 0,10
	Similaridade	N/A	N/A	2,7 / 0,07
	Afim	N/A	N/A	0,2 / 0,01
$\pm 0,030^\circ$	Direta	-298,5 / -7,46	491,4 / 12,29	575,3 / 14,38
	Translação	N/A	N/A	19,7 / 0,49
	Similaridade	N/A	N/A	13,6 / 0,34
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	1,0 / 0,03

TABELA 3.70 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS-CBERS.

Rolamento + Arfagem + Guinada Desvio-padrão	$\sigma = 0,0002^\circ$ (Níveis 2, 3 e 4)	$\sigma = 0,0001^\circ$ (especificação)
Transformação	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
Direta	3,5 / 0,09	1,7 / 0,04
Translação (N2)	3,4 / 0,08	1,7 / 0,04
Similaridade	3,2 / 0,08	1,6 / 0,04
Afim (N3 e N4)	3,1 / 0,08	1,5 / 0,04

Comparando os resultados das tabelas 3.59 (IRMSS) e 3.69 (IRS), pode-se verificar que as relações entre os valores absolutos (em metro) dos EMQ's e dos ruídos constantes adicionados à atitude são muito semelhantes. Como a resolução espacial do sensor IRS é duas vezes melhor que a resolução espacial do sensor IRMSS, ele necessita de dados de atitude duas vezes mais precisos.

A especificação do AOCS relativa à precisão de medição da atitude para os satélites CBERS 3 e 4 deverá atender de forma satisfatória a geração de produtos em níveis 3 e 4 de processamento. Mas fica aquém do necessário para atender a geração de produtos em nível 2 (deveria ser pelo menos cinco vezes melhor). Entretanto, a adição da informação fornecida pelos sensores estelares deverá ser suficiente para garantir a excelência dos produtos nesse nível também.

Em relação à variação da medição do erro (tabela 3.70), a especificação definida para os satélites CBERS 3 e 4 deverá atender bem a todos os níveis de processamento.

3.4.8 AWFI-CBERS 3 e 4

A influência das degradações dos ângulos de atitude na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS fica restrita à especificação do AOCS para os satélites CBERS 3 e 4. As tabelas 3.71 e 3.72 apresentam a reação do sensor AWFI à contaminação da atitude por erros sistemáticos e aleatórios, respectivamente.

TABELA 3.71 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada na qualidade geométrica das imagens do sensor AWFI-CBERS.

Rolamento, Arfagem e Guinada		ξ_E (m / GSD)	ξ_N (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
$\pm 0,001^\circ$	Direta	-12,9 / -0,20	15,7 / 0,25	20,8 / 0,32
	Translação (N2)	N/A	N/A	4,4 / 0,07
	Similaridade	N/A	N/A	3,2 / 0,05
	Afim	N/A	N/A	1,4 / 0,02
$\pm 0,005^\circ$	Direta	64,7 / 1,01	78,8 / 1,23	102,0 / 1,59
	Translação	N/A	N/A	21,1 / 0,35
	Similaridade	N/A	N/A	16,1 / 0,25
	Afim (N3 e N4)	N/A	N/A	7,0 / 0,11
$\pm 0,030^\circ$	Direta	322,7 / 5,04	392,8 / 6,14	508,4 / 7,94
	Translação	N/A	N/A	109,6 / 1,71
	Similaridade	N/A	N/A	81,3 / 1,27
	Afim	N/A	N/A	34,9 / 0,55

TABELA 3.72 – Impacto da simulação da degradação do rolamento, da arfagem e da guinada por ruído gaussiano na qualidade geométrica das imagens do sensor AWFI-CBERS.

Rolamento + Arfagem + Guinada Desvio-padrão	$\sigma = 0,0001^\circ$ (Níveis 2, 3 e 4) (especificação)
Transformação	EMQ (m / GSD)
Direta	1,2 / 0,02
Translação (N2)	1,2 / 0,02
Similaridade	1,2 / 0,02
Afim (N3 e N4)	1,1 / 0,02

Os resultados apresentados na tabela 3.71, do mesmo modo que o ocorrido para o sensor WFI (tabela 3.61), não são satisfatórios nem para os níveis 3 e 4, que fazem uso de pontos de controle e modelos de elevação do terreno para reduzir os resíduos. Novamente a largura do campo de visada torna o sensor extremamente sensível a erros sistemáticos na medição da atitude.

Para os níveis 3 e 4 o sistema de medição deveria ser pelo menos seis vezes mais preciso, enquanto que para o nível 2 deveria ser trinta vezes mais preciso.

Ainda comparando com o sensor WFI (tabela 3.62), essa fonte de distorção não compromete a qualidade geométrica de nenhum nível de processamento das imagens do sensor AWFI (tabela 3.72), mesmo com o aumento do poder resolutivo deste sensor. Isso se deve à melhora precisão da medição da variação do erro de atitude dos satélites CBERS 3 e 4, quando comparado com os satélites CBERS 1 e 2.

3.4.9 Análise Final

O sistema AOCS especificado para os satélites CBERS 1 e 2 compromete sobremaneira a qualidade geométrica das imagens em nível 2 de processamento. Torna-se imperativo

o uso de pontos de controle para refinar o modelo e melhorar a qualidade geométrica das imagens.

As distorções provocadas pela adição tanto do erro sistemático quanto do aleatório aos ângulos de atitude apresentam um comportamento praticamente linear com a magnitude destes ângulos, a menos dos sensores de amplo campo de visada (WFI e AWFII).

A melhora prometida para o sistema AOCS dos satélites CBERS 3 e 4 não acompanha a melhoria das resoluções espaciais dos sensores que serão lançados com esses satélites. Resta esperar que os sensores estelares, aqui não considerados por falta de especificação, garantam produtos em nível 2 com excelente qualidade geométrica.

O ângulo de guinada representa, entre todos os ângulos de atitude, a maior contribuição para a distorção interna, com a introdução de um cisalhamento à imagem (no sentido da órbita). É, portanto, a maior fonte de distorção da imagem em nível 2 de processamento, comprometendo seriamente a qualidade geométrica das imagens CCD dos satélites CBERS 1 e 2. Entretanto, o ângulo de rolamento é quem apresenta os maiores resíduos após a transformação afim, sendo então a maior causa de degradação da qualidade geométrica em níveis mais elevados.

A tabela 3.73 apresenta os limiares alcançados para os sensores que têm campos de visada semelhante, mostrando a relação linear que existe entre estes e as resoluções espaciais.

TABELA 3.73 – Relação da degradação da atitude com o GSD.

sensor	CCD	IRMSS	PAN (MS)	IRS
Campo de visada (km)	120	120	120	120
GSD (m)	20	80	10	40
(N2) $\Delta\alpha$ (°)	0,003	0,015	0,002	0,006
(N3 e N4) $\Delta\alpha$ (°)	0,06	0,25	0,03	0,12
σ_α (°)	0,00010	0,00050	0,00006	0,00020

3.5 Registro Temporal

O sistema de registro temporal (*time-code*) é de suma importância no processo de correção geométrica. Quando o sistema é o mesmo para registrar varredura, efemérides e atitude, os possíveis problemas ficam restritos à frequência e à precisão do registro temporal.

Quando os sistemas são diversos, é necessário que haja um perfeito sincronismo entre eles para evitar a associação errada entre *pixel* e dados de atitude e efemérides.

O problema decorre da associação do *time-code* com a varredura, que deve ser feita para um determinado ponto, como, por exemplo, o centro da mesma. Porém, não há garantia alguma de que aquele tempo tenha sido registrado no exato instante que corresponderia ao centro da varredura. Ou seja, como o sistema de registro temporal é discreto, há problemas na associação exata entre tempo e posição da varredura (figura 3.13).

Esta associação é tanto mais problemática quanto menor for a frequência de registro temporal, e quanto mais linhas por varredura houver. Ou seja, esse problema se agrava nos sensores de varredura mecânica, que apresentam múltiplas linhas por varredura.

Ou seja, no caso dos satélites CBERS, esse problema é mais grave para o sensor IRMSS (8 linhas por varredura) do que para os sensores CCD e WFI (1 linha por varredura).

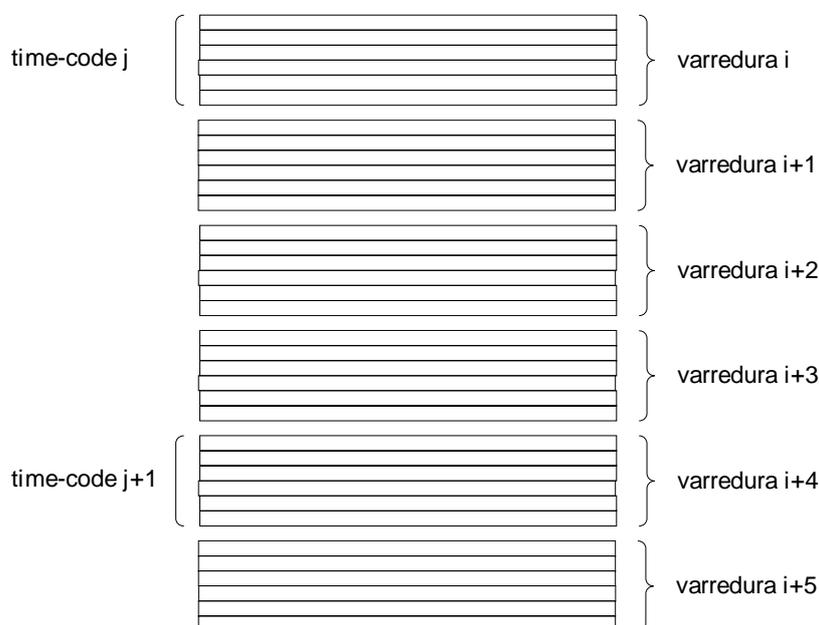


FIGURA 3.13 – Associação entre *time-code* e varredura.

3.6 Esfericidade

A esfericidade da Terra é uma fonte de distorção geométrica de fácil correção. Essa distorção cresce na medida em que o *pixel* se afasta do nadir. Ou seja, ela está mais presente nas imagens em visada oblíqua, ou nos sensores de visada ampla, como o WFI-CBERS e MODIS-Aqua ou Terra.

A distorção provocada pela esfericidade é conhecida como panorâmica, e faz com que as dimensões dos *pixels* cresçam na medida em que o mesmo se afasta do nadir.

Entretanto, não há incerteza sobre a fonte de distorção, nem variações temporais que afetem a qualidade geométrica da imagem. A adoção de um elipsóide como modelo representativo da Terra é um meio bastante eficiente de se corrigir esse problema. A figura 3.14 apresenta o efeito da curvatura da Terra na geometria da imagem.

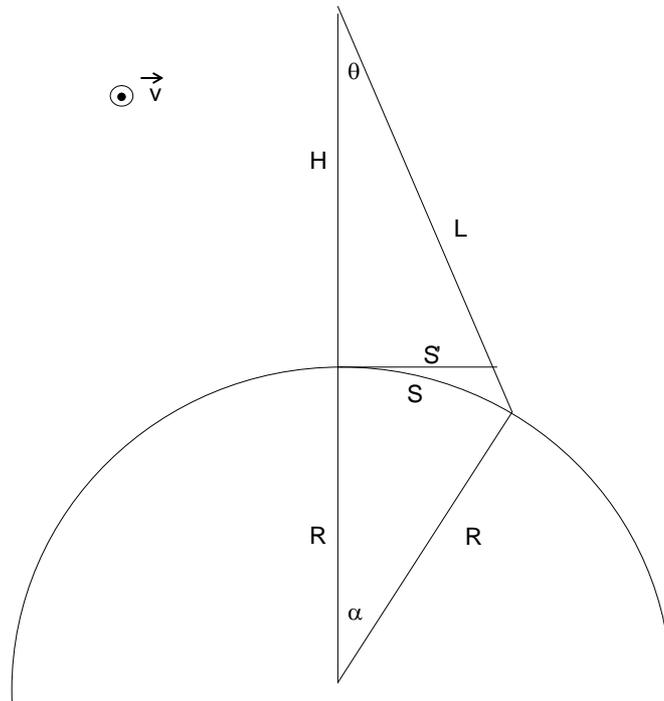


FIGURA 3.14 – Efeito da curvatura da Terra.

De acordo com a figura 3.14, o erro associado à curvatura da Terra (dS) é dado por:

$$\frac{\sin \theta}{R} = \frac{\sin(\theta + \alpha)}{R + H} = \frac{\sin \alpha}{L} \quad (3.29)$$

$$S = R \cdot \alpha \quad (3.30)$$

$$S' = H \cdot \tan \theta \quad (3.31)$$

$$dS = H \cdot \tan \theta - R \cdot \alpha \quad (3.32)$$

Nos sensores de amplo campo de visada, que apresentam baixa resolução espacial, ocorre a distorção conhecida como *bowtie* (MARCARI, 2007), onde os *pixels* das bordas das imagens se deformam de tal forma que guardam informações repetidas (figura 3.15). Esse efeito também está presente nas imagens de sensores de média e alta resolução obtidas com grande ângulo de inclinação (acima de 20°).

A distorção panorâmica é mais importante nos sensores de amplo campo de visada, pois atua de forma distinta ao longo da varredura, sendo insignificante no centro da imagem

e altamente presente nas bordas. Por isso ela afeta mais esse tipo de sensor do que nos sensores de média resolução em visada oblíqua, onde toda a cena se encontra afastada do nadir e a influência da distorção panorâmica é mais homogênea. Essa distorção é a causa maior da alta sensibilidade desses sensores à degradações de parâmetros que provoquem distorção na direção da varredura, como distância focal, rolamento, relevo, entre outros.

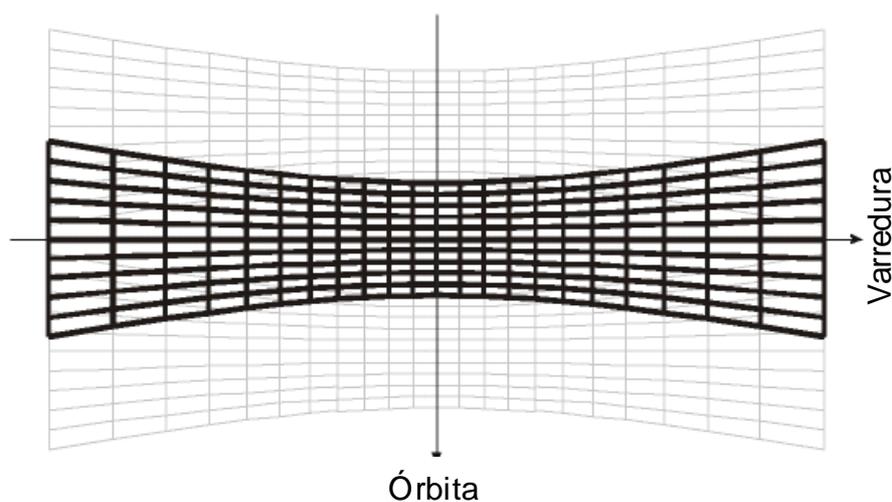


FIGURA 3.15 – Efeito *bowtie* (distorção panorâmica).

3.7 Rotação

O efeito de rotação da Terra, que causa deslocamento entre varreduras sucessivas, é diretamente proporcional ao período de varredura do sensor. Ele é o responsável pela forma de paralelogramo das imagens de satélite (figura 3.16).

Mais uma vez não há incerteza sobre a fonte de distorção, nem variações temporais que afetem a qualidade geométrica da imagem. Ele é facilmente corrigido na transformação entre o Sistemas de Referência Geocêntrico Inercial (SRI) e o Sistema de Referência Geocêntrico (SRG) (ver apêndice A, Sistemas de Coordenadas).

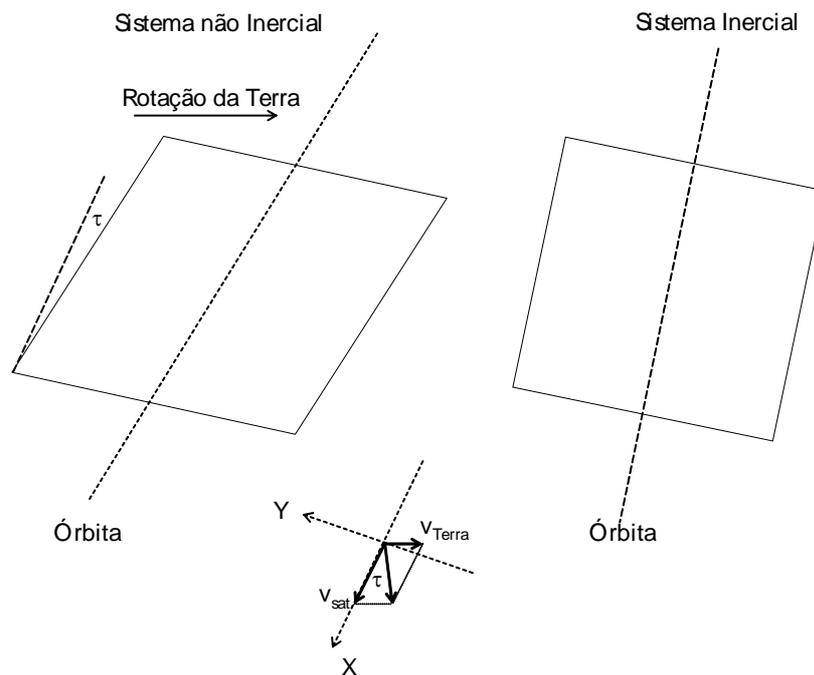


FIGURA 3.16 – Efeito da rotação da Terra.

Na verdade, o efeito não é contínuo, mas sim discreto com os deslocamentos entre varreduras sucessivas criando um efeito de degraus. Esse efeito é mais nítido nos sensores que apresentam maior período de varredura, pois o efeito de rotação da Terra atua mais tempo sobre ela.

Ou seja, esse efeito é mais nítido nos sensores de varredura mecânica, que costumam apresentar grandes períodos de varredura por acumularem múltiplas linhas.

Há mais um agravante nesse tipo de sensor. As varreduras não são adquiridas instantaneamente. Dessa forma, as varreduras que têm o mesmo sentido da rotação da Terra sofrem uma contração, enquanto que as varreduras com sentido oposto ao da rotação da Terra apresentam uma expansão.

Os sensores de varredura mecânica bi-direcional (ex.: TM-Landsat e IRMSS-Landsat) são mais contaminados pelo efeito de rotação da Terra do que aqueles que apresentam varredura mono-direcional (ex.: MSS-Landsat).

3.8 Relevo

O relevo é uma das principais fontes de distorção geométrica nas imagens, e uma das mais difíceis de se corrigir. Não é possível modelar as distorções por um polinômio, por exemplo. O uso dos RPC's não invalida essa assertiva, pois esses representam um polinômio que necessita dos dados de altitude e que têm uso limitado pela inclinação da visada.

Nas imagens em visada nadir de sensores de média ou baixa resolução espacial, o efeito causado pelo relevo pode, muitas vezes, ser desprezado em função da qualidade geométrica da imagem.

Porém, para as imagens em visada oblíqua ou de sensores de alta resolução espacial, a topografia do terreno tem que ser considerada no modelo de correção geométrica.

O mais comum, nesses casos, é adotar um MNET da região de interesse. Os fatores que definem a qualidade do MNET são: resolução e precisão dos dados de altitude e resolução espacial da grade do MNET.

A resolução espacial da grade tem que permitir que a interpolação da altitude para os pontos internos à grade apresentem altitudes com precisão compatível com o cenário de aquisição da imagem: inclinação da visada e resolução espacial do sensor.

Nessa seção será estudada a influência da distorção do relevo nas imagens de satélite. A figura 3.17 apresenta o deslocamento relativo a um ponto da imagem (dS) quando sua altitude não é considerada.

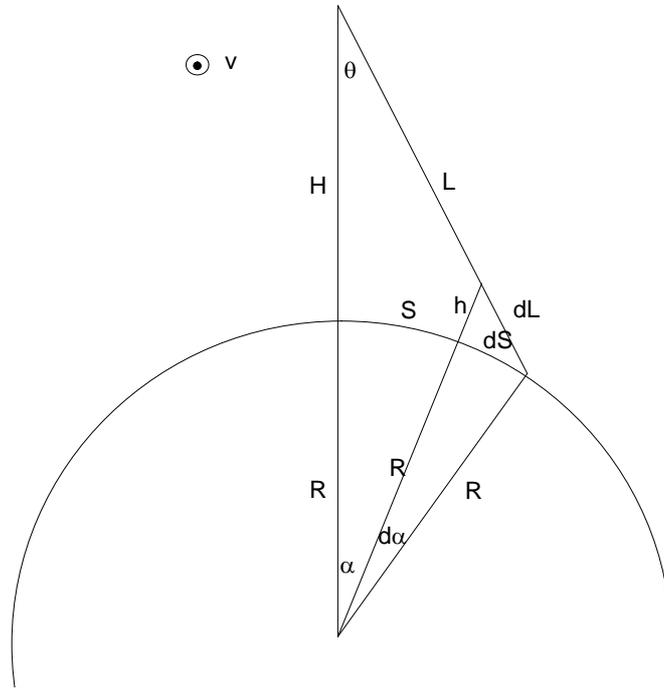


FIGURA 3.17 – Desvio do posicionamento de um *pixel* devido à não consideração de sua altitude.

Nota-se claramente que o deslocamento provocado pelo relevo cresce na medida que a visada (θ) se afasta do nadir e também na proporção direta da altitude do ponto (h).

$$\frac{\sin \theta}{R+h} = \frac{\sin(\theta+\alpha)}{R+H} = \frac{\sin \alpha}{L} \quad (3.33)$$

$$S = R.\alpha \quad (3.34)$$

$$\frac{\sin \theta}{R} = \frac{\sin(\theta+\alpha+d\alpha)}{R+H} = \frac{\sin(\alpha+d\alpha)}{L+dL} \quad (3.35)$$

$$dS = R.d\alpha \quad (3.36)$$

A figura 3.18 apresenta seis curvas representando o deslocamento provocado pelo relevo (dS) em função do ângulo de visada (θ), conforme figura 3.17 e equações 3.33 a 3.36. As curvas estão associadas a diferentes altitudes de pontos, variando de 500 a 3.000m.

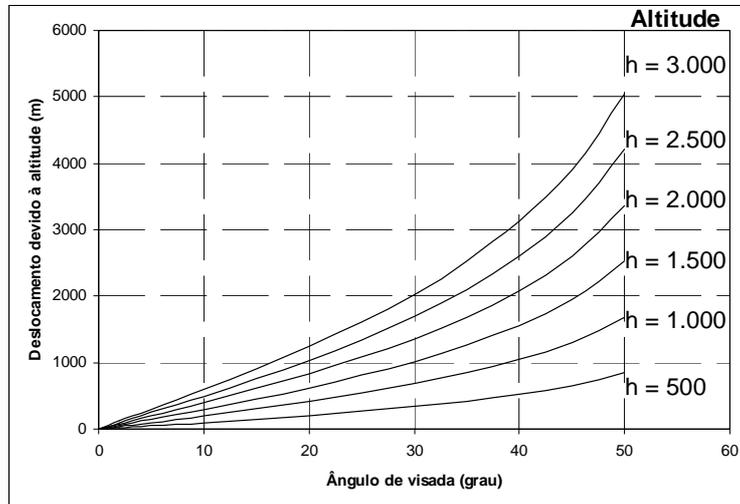


FIGURA 3.18 – Desvio do posicionamento de um *pixel* em função da altitude e do ângulo de visada.

Para todos os sensores foi empregado o mesmo MNET, variando-se o exagero vertical para simular diferentes variações de altitude (multiplicando-se as altitudes por um fator de escala), e variando-se a resolução da grade do MNET para ajustar às resoluções das grades de pontos amostrais das imagens.

Em todos os casos, foram analisadas quatro diferentes faixas de variação da altitude (diferença entre as altitudes máxima e mínima): 300m, 600m, 900m e 1.200m, que permitem uma boa caracterização das cenas CBERS distribuídas pelo território brasileiro.

Nesse momento, a precisão da altitude não será considerada, deixando-se a análise dessa fonte de distorção para a seção 3.10 (MNET).

Em função do exposto, a análise da distorção provocada pelo relevo incorpora a altitude no cenário 1 (referência), e no cenário 2 (ruído) usa apenas o elipsóide padrão, de um *datum* previamente selecionado, como representação da superfície da Terra.

3.8.1 CCD-CBERS 1, 2 e 2B

O sensor CCD, de média resolução espacial, apresenta capacidade de visada lateral, decorrente de um espelho móvel. Esse espelho pode variar em relação ao nadir de -32° (oeste) a $+32^\circ$ (leste), em passos de $2'$, totalizando 1.921 possíveis posições para tomada de cena.

A tabela 3.74 apresenta resultados para cinco diferentes ângulos de visada, em passos de 8° . Na realidade, os resultados englobam nove ângulos, pois eles independem do sentido do deslocamento do espelho.

Para cada nó da grade amostral foi associada uma altitude proveniente do MNET. Foram então calculados dois pares de coordenadas planas de projeção, uma considerando a altitude (cenário 1) e o outro sem considerar as altitudes dos pontos (cenário 2).

Os resultados da tabela 3.74 mostram o EMQ resultante da comparação entre os cenários, de forma direta ou após as transformações para ajustar os dois conjuntos de coordenadas.

O primeiro resultado que se observa é que em todos os casos analisados o resíduo final é superior ao limiar estipulado de um décimo da resolução espacial. A variação desse resíduo chega a cem vezes quando comparados o melhor resultado (imagem nadir com variação de altitude de 300m e transformação afim: aproximadamente um quarto de resolução espacial – 5m) com o pior (imagem com 32° de inclinação, variação de altitude de 1.200m e comparação direta: aproximadamente vinte e cinco vezes a resolução espacial – 500m).

Para as imagens em visada nadir (ou vertical: 0°), não há diferença entre os resultados alcançados pela comparação direta dos cenários 1 e 2, e pela comparação após a transformação de translação. Isso é explicado pelo fato de que as distorções provocadas pelo relevo atuam em sentidos opostos, dependendo do lado da imagem em relação ao traço da órbita que o ponto se encontra. Os pontos à oeste do traço da órbita têm os seu

deslocamento projetado para oeste, enquanto os pontos à leste têm o deslocamento projetado para leste (figura 3.19).

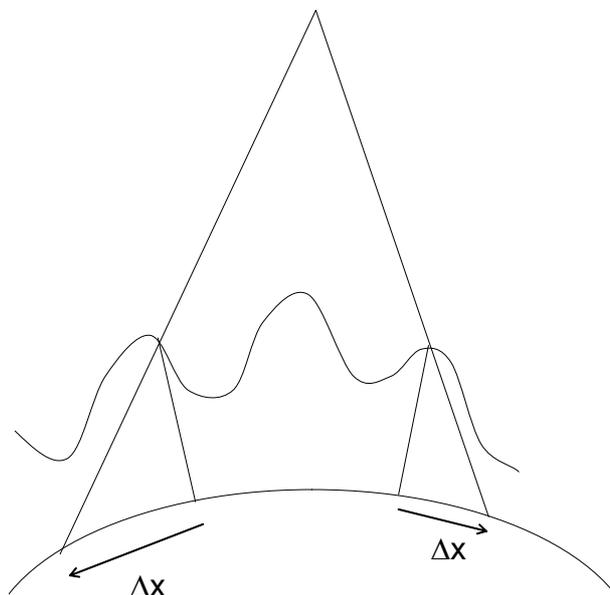


FIGURA 3.19 – Efeito provocado pela distorção do relevo.

Em todos os outros casos (imagens em visada oblíqua), há uma brutal diferença (redução de quase cinquenta por cento) entre os resultados alcançados pela comparação direta dos cenários 1 e 2, e pela comparação após a transformação de translação. Novamente isso é fácil de ser explicado, pois nesses casos a distorção do relevo atua num único sentido, independente da posição do ponto na imagem (figura 3.20).

Em todos os casos, há reduções significativas quando as transformações de similaridade e afim são empregadas, sendo mais acentuada nessa última. A explicação é que a variação da altitude atua como um redutor de escala na direção das varreduras. O efeito é semelhante ao da redução da altitude do satélite (seção 3.3, Efemérides). Isso provoca então uma distorção de anisomorfismo (figura 3.21). O fator de escala da transformação de similaridade tende a compensar parte esse efeito, mas apenas a transformação afim consegue corrigi-lo. Em ambas as transformações, o ângulo de rotação pode ser desprezado, pois sua contribuição é praticamente nula.

TABELA 3.74 – Avaliação do efeito da altitude na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

		Altitude Máxima / Altitude Média (m)			
Transformação	θ	300 / 140,7	600 / 281,5	900 / 422,2	1.200 / 563,0
Direta	0°	9,1 / 0,46	18,2 / 0,91	27,4 / 1,37	36,5 / 1,82
Translação	0°	9,1 / 0,46	18,2 / 0,91	27,3 / 1,37	36,4 / 1,82
Similaridade	0°	7,3 / 0,36	14,6 / 0,73	21,9 / 1,09	29,2 / 1,46
Afim	0°	4,8 / 0,24	9,6 / 0,48	14,4 / 0,72	19,2 / 0,96
Direta	$\pm 8^\circ$	27,6 / 1,38	55,1 / 2,76	82,7 / 4,14	110,3 / 5,51
Translação	$\pm 8^\circ$	16,6 / 0,83	33,2 / 1,66	49,7 / 2,49	66,3 / 3,32
Similaridade	$\pm 8^\circ$	15,7 / 0,78	31,4 / 1,57	47,1 / 2,36	62,8 / 3,14
Afim	$\pm 8^\circ$	14,8 / 0,74	29,6 / 1,48	44,4 / 2,22	59,2 / 2,96
Direta	$\pm 16^\circ$	54,6 / 2,73	109,1 / 5,46	163,7 / 8,18	218,2 / 10,91
Translação	$\pm 16^\circ$	30,0 / 1,50	60,0 / 3,00	89,9 / 4,50	119,9 / 6,00
Similaridade	$\pm 16^\circ$	29,4 / 1,47	58,9 / 2,94	88,3 / 4,41	117,8 / 5,89
Afim	$\pm 16^\circ$	29,0 / 1,45	57,9 / 2,90	86,9 / 4,35	115,9 / 5,80
Direta	$\pm 24^\circ$	85,5 / 4,28	171,1 / 8,55	256,6 / 12,83	342,1 / 17,11
Translação	$\pm 24^\circ$	46,1 / 2,30	92,1 / 4,61	138,2 / 6,91	184,2 / 9,21
Similaridade	$\pm 24^\circ$	45,6 / 2,28	91,2 / 4,56	136,7 / 6,84	182,3 / 9,12
Afim	$\pm 24^\circ$	45,2 / 2,26	90,5 / 4,52	135,7 / 6,79	181,0 / 9,05
Direta	$\pm 32^\circ$	123,3 / 6,16	246,5 / 12,33	369,8 / 18,49	493,0 / 24,65
Translação	$\pm 32^\circ$	66,0 / 3,30	132,0 / 6,60	198,0 / 9,90	264,0 / 13,20
Similaridade	$\pm 32^\circ$	65,4 / 3,27	130,8 / 6,54	196,3 / 9,81	261,7 / 13,09
Afim	$\pm 32^\circ$	65,1 / 3,25	130,2 / 6,51	195,3 / 9,77	260,5 / 13,02

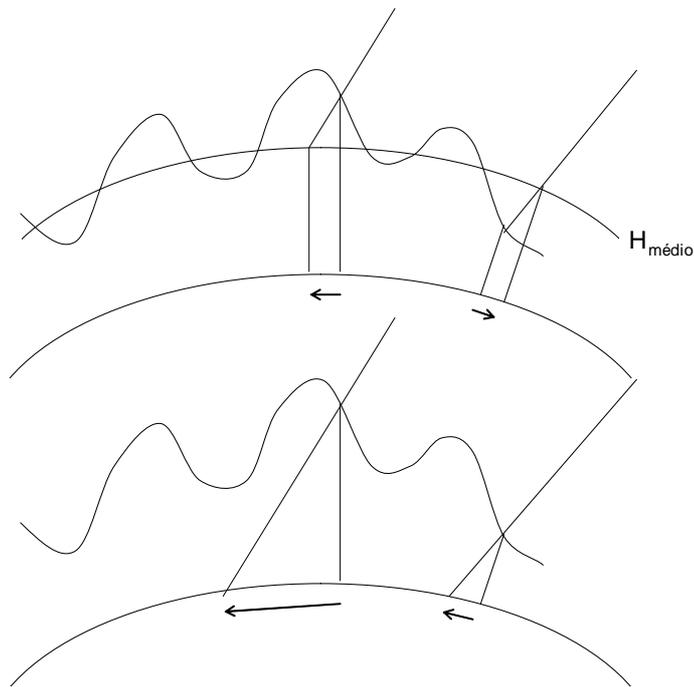


FIGURA 3.20 – Efeito provocado pela relevo considerando a altitude média.

Essas conclusões levam à hipótese de que a adoção de um elipsóide auxiliar, definido pela altitude média da região da imagem poderia reduzir esses problemas. Para testar essa hipótese foram realizadas as mesmas análises, modificando o cenário 2 para incorporar o elipsóide auxiliar.

A tabela 3.75 apresenta um quadro comparativo para quatro situações extremas (menor e maior ângulo de visada e menor e maior faixa de variação da altitude).

A adoção do elipsóide auxiliar reduz o erro médio, pois as distorções voltam a se anular, não mais em função da posição geográfica do ponto, mas em função de estar acima ou abaixo da altitude média (figura 3.20). Ela também reduz a distorção de anisomorfismo, conforme destacado na figura 3.21.

Os resultados da tabela 3.75 mostram claramente que a hipótese formulada estava certa, pois após a adoção do elipsóide auxiliar não houve mais diferença nos resultados para as diferentes transformações.

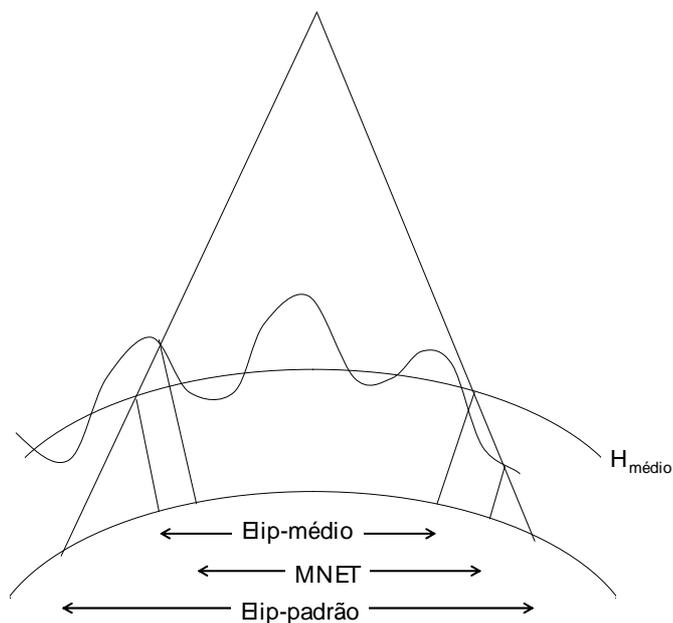


FIGURA 3.21 – Anisomorfismo devido à distorção do relevo.

Procedendo assim, a qualidade geométrica passa a não depender mais da altitude da região, mas apenas e tão somente variação desta ao longo da região da imagem.

Observando novamente a tabela 3.75, e concentrando a atenção nos resultados após a transformação afim, pode-se concluir que resultados satisfatórios para os níveis 2 e 3 (abaixo de uma vez a resolução espacial) são alcançados para visada nadir com variação de relevo até 1.200m; visada oblíqua de 4° e variação de relevo até 600m e visada oblíqua de 8° e variação de relevo de 300m. Para os demais casos é recomendada a ortorretificação (nível 4).

TABELA 3.75 – Avaliação da compensação da altitude média na qualidade geométrica das imagens no sensor CCD-CBERS.

		Altitude Máxima / Altitude Média (m)			
Transformação	θ	300 / 140,7 elip. padrão	300 / 140,7 elip. médio	1200 / 563,0 elip. padrão	1200 / 563,0 elip. médio
Direta	0°	9,1 / 0,46	4,8 / 0,24	36,5 / 1,82	19,3 / 0,96
Translação	0°	9,1 / 0,46	4,8 / 0,24	36,4 / 1,82	19,3 / 0,96
Similaridade	0°	7,3 / 0,36	4,8 / 0,24	29,2 / 1,46	19,2 / 0,96
Afim	0°	4,8 / 0,24	4,8 / 0,24	19,2 / 0,96	19,2 / 0,96
Direta	32°	123,3 / 6,16	65,2 / 3,26	493,0 / 24,65	260,7 / 13,03
Translação	32°	66,0 / 3,30	65,2 / 3,26	264,0 / 13,20	260,7 / 13,03
Similaridade	32°	65,4 / 3,27	65,1 / 3,26	261,7 / 13,09	260,5 / 13,02
Afim	32°	65,1 / 3,25	65,1 / 3,25	260,5 / 13,02	260,2 / 13,01

3.8.2 IRMSS-CBERS 1 e 2

A tabela 3.76 apresenta os resultados para imagens IRMSS, sensor de média para baixa resolução espacial. As imagens deste sensor são obtidas sempre ao nadir.

Esses resultados indicam excelente qualidade geométrica para variações de altitude até 600m. Além disso, os resultados são bastante satisfatórios para as demais situações testadas (sempre inferior a um quarto da resolução espacial).

Em princípio, não há necessidade de ortorretificar as imagens deste sensor, mas sim de adotar o elipsóide auxiliar baseado na altitude média.

TABELA 3.76 – Avaliação do efeito da altitude na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS.

Transformação	Altitude Máxima / Altitude Média (m)			
	300 / 140,7	600 / 281,5	900 / 422,2	1.200 / 563,0
Direta	9,4 / 0,12	18,7 / 0,23	28,1 / 0,35	37,4 / 0,47
Translação	9,3 / 0,12	18,7 / 0,23	28,0 / 0,35	37,4 / 0,47
Similaridade	7,4 / 0,09	14,8 / 0,19	22,3 / 0,28	29,7 / 0,37
Afim	4,9 / 0,06	9,9 / 0,12	14,8 / 0,18	19,7 / 0,25

3.8.3 WFI-CBERS 1, 2 e 2B

O sensor WFI é de baixa resolução espacial, amplo campo de visada e imagens obtidas sempre ao nadir. A tabela 3.77 apresenta os resultados decorrentes das distorções provocadas pelo relevo para esse sensor.

TABELA 3.77 – Avaliação do efeito da altitude na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS.

Transformação	Altitude Máxima / Altitude Média (m)			
	300 / 140,7	600 / 281,5	900 / 422,2	1.200 / 563,0
Direta	59,7 / 0,25	119,4 / 0,50	179,0 / 0,75	238,7 / 0,99
Translação	59,7 / 0,25	119,4 / 0,50	179,0 / 0,75	238,7 / 0,99
Similaridade	47,5 / 0,20	95,0 / 0,40	142,5 / 0,59	190,0 / 0,79
Afim	31,5 / 0,13	63,0 / 0,26	94,6 / 0,39	126,1 / 0,53

Num s pode-se ficar surpreso com os resultados, principalmente quando analisado em GSD's, pelo EMQ estar acima dos sensores de média resolução. Mas os pontos das bordas laterais dessas imagens são observados com grande inclinação (acima de 20°). Esse efeito combinado com a distorção panorâmica torna ainda maior a distorção da altitude (pontos com a mesma altitude apresentam distorções diferentes em função da sua posição em relação ao nadir – figura 3.22).

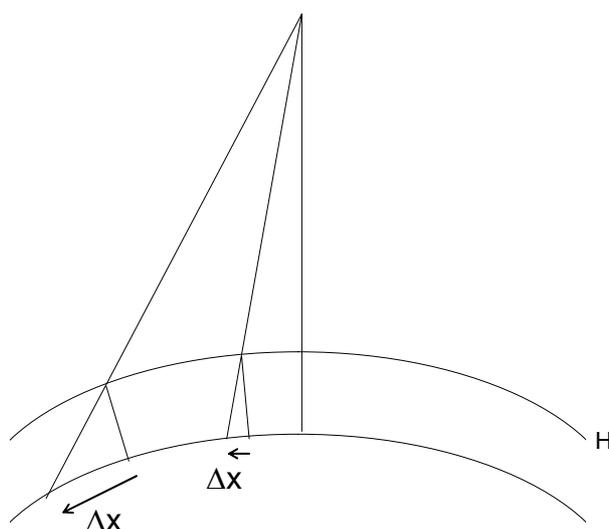


FIGURA 3.22 – Efeito combinada relevo e distorção panorâmica.

Ou seja, de certa forma essas imagens, para efeito da distorção do relevo, já podem ser consideradas em visada oblíqua.

Comparando com os resultados do sensor IRMSS (tabela 3.76), nota-se que as distorções referentes ao WFI são duas vezes maiores. Ainda assim a qualidade geométrica da imagem não ortoretificada pode ser satisfatória.

É importante destacar que, por seu amplo campo de visada, com as correspondentes amplas dimensões das imagens, é mais comum encontrar situações em que a variação de altitude ultrapasse os 1.200m.

3.8.4 HRC-CBERS 2B

O sensor HRC é de alta resolução espacial, o que aumenta o impacto da distorção do relevo. O aspecto atenuante é que ele apresenta um campo de visada (FOV) reduzido e baixa capacidade de visada oblíqua (até 4°).

A tabela 3.78 apresenta os resultados decorrentes das distorções provocadas pelo relevo para esse sensor. O que se pode concluir de forma inequívoca é a necessidade de se ortorretificar as imagens geradas pela câmera HRC. A qualidade do MNET a ser usado no processo de ortorretificação será discutida na seção 3.10 (MNET).

TABELA 3.78 – Avaliação do efeito da altitude na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.

		Altitude Máxima / Altitude Média (m)			
Transformação	θ	300 / 140,7	600 / 281,5	900 / 422,2	1.200 / 563,0
Direta	0°	2,3 / 0,94	4,7 / 1,87	7,0 / 2,81	9,4 / 3,74
Translação	0°	2,3 / 0,92	4,6 / 1,83	6,9 / 2,75	9,2 / 3,67
Similaridade	0°	1,9 / 0,75	3,7 / 1,50	5,6 / 2,24	7,5 / 2,99
Afim	0°	1,2 / 0,49	2,5 / 0,99	3,7 / 1,48	4,9 / 1,97
Direta	2°	6,7 / 2,69	13,5 / 5,38	20,2 / 8,08	26,9 / 10,77
Translação	2°	4,0 / 1,62	8,1 / 3,24	12,1 / 4,85	16,2 / 6,47
Similaridade	2°	3,8 / 1,54	7,7 / 3,08	11,5 / 4,62	15,4 / 6,16
Afim	2°	3,6 / 1,44	7,2 / 2,89	10,8 / 4,34	14,4 / 5,78
Direta	4°	13,0 / 5,21	26,0 / 10,41	39,0 / 15,62	52,1 / 20,82
Translação	4°	7,1 / 2,85	14,2 / 5,69	21,3 / 8,54	28,5 / 11,38
Similaridade	4°	7,0 / 2,81	14,0 / 5,61	21,0 / 8,42	28,1 / 11,22
Afim	4°	6,9 / 2,76	13,8 / 5,52	20,7 / 8,28	27,6 / 11,05

3.8.5 PAN-CBERS 3 e 4 (modo multi-espectral)

O sensor PAN é um sensor de imagens nadir. Os resultados da distorção provocada pelo relevo para esse sensor, operando no modo multi-espectral, estão apresentados na tabela 3.79. Esses resultados apontam para a necessidade de se ortorretificar as imagens geradas por esse sensor, principalmente quando a variação do relevo ultrapassar 300m.

TABELA 3.79 – Avaliação do efeito da altitude na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS).

Transformação	Altitude Máxima / Altitude Média (m)			
	300 / 140,7	600 / 281,5	900 / 422,2	1.200 / 563,0
Direta	9,1 / 0,91	18,2 / 1,82	27,4 / 2,74	36,5 / 3,65
Translação	9,1 / 0,91	18,2 / 1,82	27,3 / 2,73	36,4 / 3,64
Similaridade	7,3 / 0,73	14,6 / 1,46	21,9 / 2,19	29,2 / 2,92
Afim	4,8 / 0,48	9,6 / 0,96	14,4 / 1,44	19,2 / 1,92

3.8.6 PAN-CBERS 3 e 4 (modo pancromático)

A tabela 3.80 apresenta os resultados relativos à distorção do relevo nas imagens do sensor PAN operando no modo pancromático. Esses resultados apontam para a necessidade de se ortorretificar as imagens geradas por esse sensor, principalmente quando a variação do relevo ultrapassar 300m.

A comparação desses resultados com os da seção anterior demonstram claramente a influência de dois fatores na medida da distorção do relevo: a largura do campo de visada e a resolução espacial. Esse efeito combinado explica os mesmos resultados para as duas tabelas quando os valores são observados em GSD's.

TABELA 3.80 – Avaliação do efeito da altitude na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P).

Transformação	Altitude Máxima / Altitude Média (m)			
	300 / 140,7	600 / 281,5	900 / 422,2	1.200 / 563,0
Direta	4,6 / 0,92	9,2 / 1,83	13,8 / 2,75	18,3 / 3,67
Translação	4,6 / 0,91	9,1 / 1,82	13,7 / 2,73	18,2 / 3,65
Similaridade	3,7 / 0,73	7,3 / 1,46	11,0 / 2,19	14,6 / 2,92
Afim	2,4 / 0,48	4,8 / 0,97	7,3 / 1,45	9,7 / 1,94

3.8.7 IRS-CBERS 3 e 4

O IRS é um sensor de média resolução espacial, com características semelhantes ao do IRMSS. A tabela 3.81 apresenta os resultados decorrentes das distorções provocadas pelo relevo para esse sensor. Eles indicam que as imagens IRS ainda podem prescindir da ortorretificação.

A relação entre os valores desta tabela e os da tabela 3.76 (IRMSS) é exatamente a relação entre as resoluções espaciais desses sensores.

TABELA 3.81 – Avaliação do efeito da altitude na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS-CBERS.

Transformação	Altitude Máxima / Altitude Média (m)			
	300 / 140,7	600 / 281,5	900 / 422,2	1.200 / 563,0
Direta	9,4 / 0,24	18,7 / 0,47	28,1 / 0,70	37,4 / 0,94
Translação	9,3 / 0,23	18,7 / 0,47	28,0 / 0,70	37,4 / 0,94
Similaridade	7,4 / 0,18	14,8 / 0,37	22,3 / 0,56	29,7 / 0,74
Afim	4,9 / 0,12	9,9 / 0,25	14,8 / 0,37	19,7 / 0,49

3.8.8 AWFI-CBERS 3 e 4

O sensor AWFI conjuga características insólitas, pois é um sensor de média resolução espacial com amplo campo de visada. Isso agrava todos os problemas descritos para o sensor WFI (seção 3.8.3).

A tabela 3.82 apresenta os resultados decorrentes das distorções provocadas pelo relevo para esse sensor. A relação deles com os do sensor WFI (tabela 3.77) está diretamente ligada à relação entre as resoluções espaciais.

As imagens deste sensor devem ser ortoretificadas, principalmente quando a variação de altitude for superior a 300m.

TABELA 3.82 – Avaliação do efeito da altitude na qualidade geométrica das imagens do sensor AWFI-CBERS.

Transformação	Altitude Máxima / Altitude Média (m)			
	300 / 140,7	600 / 281,5	900 / 422,2	1.200 / 563,0
Direta	59,7 / 0,93	119,4 / 1,87	179,0 / 2,80	238,7 / 3,73
Translação	59,7 / 0,93	119,4 / 1,87	179,0 / 2,80	238,7 / 3,73
Similaridade	47,5 / 0,74	95,0 / 1,48	142,5 / 2,23	190,0 / 2,97
Afim	31,5 / 0,49	63,0 / 0,98	94,6 / 1,48	126,1 / 1,97

3.8.9 Análise Final

Os resultados apresentados apontam claramente três fortes influências sobre a distorção devido ao relevo numa imagem: a resolução espacial, a largura do campo de visada e a inclinação da visada.

Quanto maior o poder resolutivo, maior a degradação causada pelo relevo. O mesmo critério vale para a largura do campo de visada (que explica os maus resultados dos sensores WFI e AWFI) e para a inclinação da visada em relação ao nadir.

Isso explica os resultados praticamente idênticos alcançados pelos sensores PAN-MS (tabela 3.79), PAN-P (tabela 3.80) e AWFI (tabela 3.82).

As imagens de sensores de alta resolução apresentam campo de visada mais reduzido. Por outro lado, eles geralmente (não é o caso do sensor HRC) apresentam alta capacidade de visada oblíqua para compensar o campo de visada estreito e, com isso, permitir uma grande capacidade de revisita a qualquer região da superfície da Terra e a formação de pares estereoscópicos. Isso torna a ortorretificação um processo obrigatório para se obter imagens com boa qualidade geométrica.

Em todos os casos, a adoção de um elipsóide auxiliar, cujos parâmetros são definidos em função da altitude média da região, reduz de forma significativa a influência do relevo, inclusive para as imagens ao nadir (visada vertical).

A tabela 3.83 mostra claramente a relação entre o EMQ em GSD e a resolução espacial de sensores com a mesma largura de campo de visada.

TABELA 3.83 – Relação da distorção do relevo com o GSD.

sensor	CCD	IRMSS	PAN (MS)	IRS
Campo de visada (km)	120	120	120	120
GSD (m)	20	80	10	40
$\Delta H = 300m$	0,24	0,06	0,48	0,12
$\Delta H = 600m$	0,48	0,12	0,96	0,25
$\Delta H = 900m$	0,72	0,18	1,44	0,37
$\Delta H = 1.200m$	0,96	0,25	1,92	0,49

3.9 Pontos de Controle

Pontos de controle são elementos utilizados para melhorar a qualidade geométrica das imagens. A função deles é reduzir distorções que restam na imagem devido às imprecisões dos dados utilizados no modelo de correção geométrica. Em hipótese alguma os pontos de controle podem substituir um modelo rígido de correção geométrica, baseado no pleno conhecimento da geometria de visada, da órbita do satélite, do modelo de referência para a Terra, entre outros. Eles são extremamente úteis para refinar dados que compõem o modelo rígido, como os dados orbitais (atitude e

efemérides), por exemplo, de modo a se obter imagens com melhor qualidade geométrica.

Mal empregados, eles podem agravar os problemas de distorção da imagem. Para evitar isso, eles devem apresentar coordenadas geográficas com precisão pelo menos duas vezes melhor que a esperada para a imagem. A densidade e, principalmente, a distribuição espacial dos pontos de controle também exercem forte influência sobre a qualidade geométrica do produto final. É interessante que a área externa aos pontos de controle seja a menor possível.

Pontos de controle podem ser obtidos automaticamente, e este caso requer cuidados redobrados. A identificação automática deve fazer uso de imagens ampliadas, de modo a permitir uma precisão *sub-pixel*.

Foram utilizados dois cenários para análise da influência dos pontos de controle. O primeiro (referência ou ponto de controle) usou o modelo de correção geométrica, incorporando a altitude, para gerar as coordenadas de projeção. O segundo usou o mesmo modelo, mas com diversos parâmetros (atitude, efemérides, geometria de visada, etc.) contaminados por ruídos, e sem considerar a altitude dos mesmos.

Esses dois cenários foram então comparados de doze maneiras distintas, numa combinação de três (precisão dos pontos de controle) por quatro (densidade e distribuição dos pontos) diferentes configurações.

Em relação à precisão, a primeira é considerada exata, ou verdade terrestre. Nas outras duas, as coordenadas de referência foram contaminadas por ruído gaussiano de média nula para representar a precisão dos pontos de controle. Ou seja, o desvio-padrão do ruído está diretamente associado à precisão desejada para o ponto de controle.

As precisões obedecem a norma CE90 (*circle error 90%*), que estipula que noventa por cento dos resíduos nas medições das coordenadas dos pontos de controle estejam abaixo de um determinado valor.

As cartas topográficas trabalham com o conceito de CE90 associado a 0,5mm na escala da carta. Por exemplo, os pontos obtidos de cartas topográficas na escala de 1:50.000 atendem ao CE90-25m.

Em relação à densidade e à distribuição, inicialmente foram usados 121 pontos de controle e os mesmos 121 pontos para teste, ocupando 100% da imagem. Em seguida, foram usados 9 pontos de controle, cobrindo respectivamente 100%, 64% e 36% da imagem, e 112 pontos de teste. A figura 3.23 apresenta a densidade e distribuição dos pontos de controle e teste.

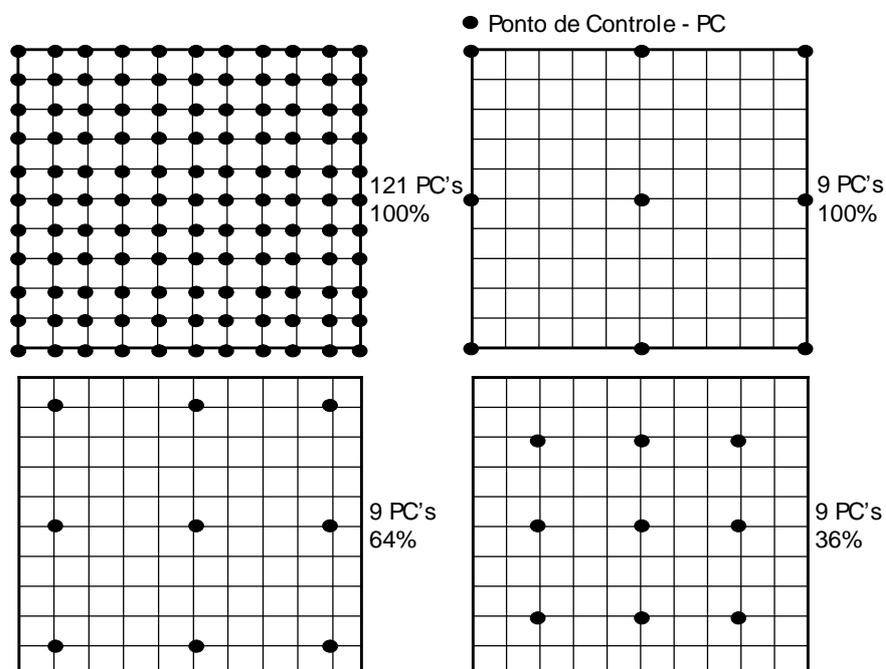


FIGURA 3.23 – Densidade e distribuição dos pontos de controle.

3.9.1 CCD-CBERS 1, 2 e 2B

Para o sensor CCD foram analisados pontos extraídos de cartas 1:25.000 e 1:50.000, que representam precisões respectivamente próximas à metade da resolução espacial do sensor e igual à resolução espacial do sensor.

A tabela 3.84 apresenta os resultados encontrados para as doze configurações.

Os resultados são excelentes para pontos CE90-25m (carta 1:50.000), com um aumento do EMQ de dez a vinte por cento quando comparados com a verdade terrestre. Os resultados também são satisfatórios quando os pontos atendem ao padrão CE90-50m (carta 1:100.000).

Em relação à distribuição de pontos, não foram notadas variações significativas na qualidade geométrica final da imagem. Isso pode ser explicado pelo fato dos cenários estudados apresentarem distorções bem modeladas por transformação afim.

TABELA 3.84 – Avaliação do efeito da densidade e distribuição de pontos de controle na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Distribuição dos Pontos de Controle	Precisão dos Pontos de Controle		
	CE90: 0m	1:25.000 CE90: 12,5m EMQ: 5,8m	1:50.000 CE90: 25,0m EMQ: 11,6m
121 (100%)	15,2 / 0,76	16,7 / 0,86	20,0 / 1,00
9 (100%)	16,1 / 0,80	19,1 / 0,95	23,4 / 1,17
9 (64%)	17,1 / 0,86	19,4 / 0,97	24,0 / 1,20
9 (36%)	18,0 / 0,90	20,1 / 1,00	24,4 / 1,22

3.9.2 IRMSS-CBERS 1 e 2

O sensor IRMSS foi analisado com pontos simulados de cartas 1:100.000 e 1:250.000, que também representam precisões respectivamente próximas à metade da resolução espacial do sensor e igual à resolução espacial do sensor.

A tabela 3.85 apresenta os resultados encontrados para as doze configurações.

Aqui se nota uma diferença na qualidade dos pontos. Os resultados referentes aos pontos CE90-50m são excelentes, mas o mesmo não ocorre para os pontos que atendem ao padrão CE90-125m.

Novamente não foram notadas variações significativas na qualidade geométrica final da imagem por conta da distribuição espacial dos pontos.

TABELA 3.85 – Avaliação do efeito da densidade e distribuição de pontos de controle na qualidade geométrica das imagens do sensor IRMSS-CBERS.

Distribuição dos Pontos de Controle	Precisão dos Pontos de Controle		
	CE90: 0m	1:100.000 CE90: 50,0m EMQ: 23,3m	1:250.000 CE90: 125,0m EMQ: 58,1m
121 (100%)	56,6 / 0,71	62,1 / 0,78	82,9 / 1,04
9 (100%)	57,7 / 0,72	63,0 / 0,79	86,8 / 1,08
9 (64%)	70,1 / 0,88	74,6 / 0,93	94,8 / 1,19
9 (36%)	74,8 / 0,94	81,9 / 1,02	103,5 / 1,29

3.9.3 WFI-CBERS 1, 2 e 2B

A tabela 3.86 apresenta os resultados para pontos de controle compatíveis com cartas topográficas nas escalas de 1:250.000 e de 1:500.000.

3.9.4 HRC-CBERS 2B

A tabela 3.87 apresenta os resultados para pontos de controle compatíveis com cartas topográficas nas escalas de 1:5.000 e de 1:10.000.

3.9.5 PAN-CBERS 2B (modo multi-espectral)

A tabela 3.88 apresenta os resultados para pontos de controle compatíveis com cartas topográficas nas escalas de 1:10.000 e de 1:25.000.

3.9.6 PAN-CBERS 2B (modo pancromático)

A tabela 3.89 apresenta os resultados para pontos de controle compatíveis com cartas topográficas nas escalas de 1:5.000 e de 1:10.000.

TABELA 3.86 – Avaliação do efeito da densidade e distribuição de pontos de controle na qualidade geométrica das imagens do sensor WFI-CBERS.

Distribuição dos Pontos de Controle	Precisão dos Pontos de Controle		
	CE90: 0m	1:250.000 CE90: 125,0m EMQ: 58,1m	1:500.000 CE90: 250,0m EMQ: 116,3m
121 (100%)	216,5 / 0,90	230,2 / 0,96	258,0 / 1,07
9 (100%)	220,2 / 0,92	244,0 / 1,02	285,7 / 1,19
9 (64%)	246,4 / 1,03	253,9 / 1,06	282,0 / 1,17
9 (36%)	281,8 / 1,17	308,2 / 1,28	345,3 / 1,44

TABELA 3.87 – Avaliação do efeito da densidade e distribuição de pontos de controle na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.

Distribuição dos Pontos de Controle	Precisão dos Pontos de Controle		
	CE90: 0m	1:5.000 CE90: 2,5m EMQ: 1,2m	1:10.000 CE90: 5,0m EMQ: 2,3m
121 (100%)	2,0 / 0,78	2,4 / 0,95	3,7 / 1,29
9 (100%)	2,1 / 0,86	2,7 / 1,08	3,7 / 1,48
9 (64%)	2,0 / 0,82	2,8 / 1,10	3,9 / 1,57
9 (36%)	2,4 / 0,97	3,0 / 1,18	4,0 / 1,60

TABELA 3.88 – Avaliação do efeito da densidade e distribuição de pontos de controle na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (MS).

Distribuição dos Pontos de Controle	Precisão dos Pontos de Controle		
	CE90: 0m	1:10.000 CE90: 5,0m EMQ: 2,3m	1:25.000 CE90: 12,5m EMQ: 5,8m
121 (100%)	7,4 / 0,74	7,9 / 0,79	9,8 / 0,98
9 (100%)	7,8 / 0,78	8,8 / 0,88	11,1 / 1,11
9 (64%)	8,1 / 0,81	8,9 / 0,89	11,8 / 1,18
9 (36%)	8,7 / 0,87	9,4 / 0,94	12,0 / 1,20

TABELA 3.89 – Avaliação do efeito da densidade e distribuição de pontos de controle na qualidade geométrica das imagens do sensor PAN-CBERS (P).

Distribuição dos Pontos de Controle	Precisão dos Pontos de Controle		
	CE90: 0m	1:5.000 CE90: 2,5m EMQ: 1,2m	1:10.000 CE90: 5,0m EMQ: 2,3m
121 (100%)	3,9 / 0,79	4,2 / 0,84	4,8 / 0,97
9 (100%)	4,2 / 0,83	4,7 / 0,95	5,7 / 1,13
9 (64%)	4,7 / 0,95	5,2 / 1,04	5,9 / 1,18
9 (36%)	4,9 / 0,98	5,5 / 1,10	6,2 / 1,24

3.9.7 IRS-CBERS 3 e 4

A tabela 3.90 apresenta os resultados para pontos de controle compatíveis com cartas topográficas nas escalas de 1:50.000 e de 1:100.000.

TABELA 3.90 – Avaliação do efeito da densidade e distribuição de pontos de controle na qualidade geométrica das imagens do sensor IRS-CBERS.

Distribuição dos Pontos de Controle	Precisão dos Pontos de Controle		
	CE90: 0m	1:50.000 CE90: 25,0m EMQ: 11,6m	1:100.000 CE90: 50,0m EMQ: 23,3m
121 (100%)	56,6 / 1,42	58,2 / 1,46	62,1 / 1,55
9 (100%)	57,7 / 1,44	58,9 / 1,47	63,0 / 1,57
9 (64%)	70,1 / 1,75	71,2 / 1,78	74,6 / 1,86
9 (36%)	74,8 / 1,87	77,5 / 1,94	81,9 / 2,05

3.9.8 AWFI-CBERS 3 e 4

A tabela 3.91 apresenta os resultados para pontos de controle compatíveis com cartas topográficas nas escalas de 1:100.000 e de 1:250.000.

TABELA 3.91 – Avaliação do efeito da densidade e distribuição de pontos de controle na qualidade geométrica das imagens do sensor AWFI-CBERS.

Distribuição dos Pontos de Controle	Precisão dos Pontos de Controle		
	CE90: 0m	1:100.000 CE90: 50,0m EMQ: 23,3m	1:250.000 CE90: 125,0m EMQ: 58,1m
121 (100%)	60,5 / 0,94	67,2 / 1,05	89,7 / 1,40
9 (100%)	61,8 / 0,97	73,3 / 1,15	104,9 / 1,64
9 (64%)	69,5 / 1,09	74,6 / 1,17	100,4 / 1,60
9 (36%)	78,5 / 1,23	90,0 / 1,41	116,8 / 1,82

3.9.9 Análise Final

As tabelas 3.84 a 3.91 mostram que pontos de controle com precisão melhor ou igual a metade da resolução espacial do sensor conduzem a excelentes resultados na geração de imagens de nível 3 de processamento.

Enquanto a precisão não ultrapassa a resolução espacial, os resultados ainda são satisfatórios.

Um ponto que não foi abordado nesta análise foi o erro de apontamento do ponto de controle, seja por correlação automática ou por identificação visual. Em ambos os casos haverá um erro adicional mínimo de metade do tamanho do *pixel*, pela associação de um par de coordenadas contínuas a um espaço imagem discreto.

Por esse motivo, é interessante, tanto no processo automático quanto no visual, ampliar a imagem para reduzir esse erro. É importante destacar que o erro está relacionado ao tamanho do *pixel* da imagem de trabalho e não à resolução espacial.

Ainda restará o erro de registro do ponto, o qual, também em ambos os casos, aumenta quando se amplia a imagem.

3.10 Modelo Numérico de Elevação do Terreno – MNET

Modelos numéricos de elevação do terreno também são elementos externos empregados para melhorar a qualidade geométrica da imagem. Eles devem apresentar uma resolução espacial de grade não inferior à requerida pelos modelos de correção geométrica.

Para que apresente resultados satisfatórios, o MNET tem que ter um excelente registro com a imagem, de modo a haver uma perfeita associação entre *pixel* e altitude. Caso isso não ocorra e, dependendo da topografia do terreno, o emprego do MNET pode não trazer vantagens para o processo de correção geométrica.

A seção 3.8 deste Capítulo (Relevo) apresenta algumas características desejáveis para o MNET. Naquele momento, foi analisada apenas a influência do relevo na qualidade geométrica da imagem. Esta seção observa a influência da precisão dos dados de relevo nesta qualidade. A figura 3.24 apresenta o erro de posicionamento de um ponto na imagem (dS) em função do erro da altitude associada a esse ponto (dh). É fácil observar que o erro de posicionamento cresce à medida que o ponto se afasta do nadir.

$$\frac{\sin \theta}{R+h} = \frac{\sin(\theta + \alpha)}{R+H} = \frac{\sin \alpha}{L} \quad (3.37)$$

$$S = R.\alpha \quad (3.38)$$

$$\frac{\sin \theta}{R+h-dh} = \frac{\sin(\theta + \alpha - d\alpha)}{R+H} = \frac{\sin(\alpha - d\alpha)}{L-dL} \quad (3.39)$$

$$dS = R.d\alpha \quad (3.40)$$

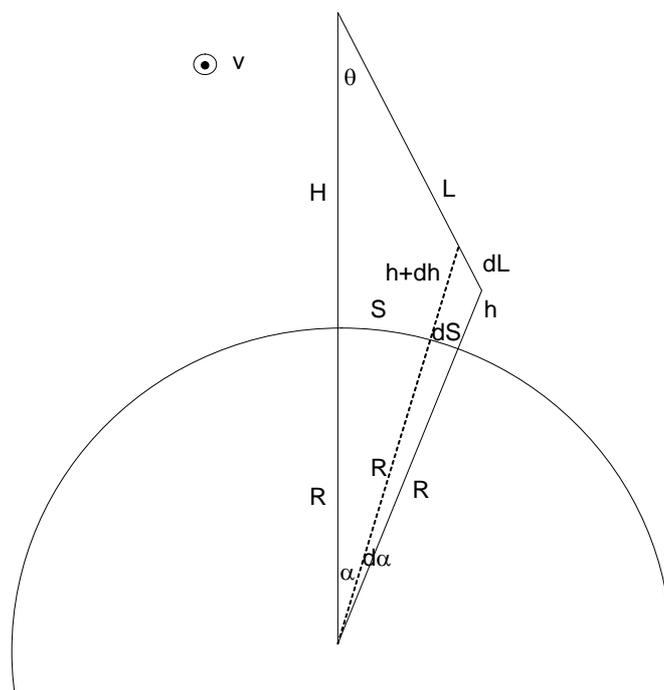


FIGURA 3.24 – Desvio do posicionamento de um *pixel* devido ao erro de altitude.

A figura 3.25 apresenta cinco curvas representando o deslocamento provocado pelo erro da altitude de um ponto (dS) em função do ângulo de visada (θ), conforme figura 3.24 e equações 3.37 a 3.40. As curvas estão associadas a diferentes erros de altitude, variando de 10 a 50m.

Para análise da precisão do MNET, são comparados dois cenários que utilizam o mesmo modelo e os mesmos parâmetros, ambos incorporando a altitude. A diferença é que a altitude do cenário 2 é contaminada por ruído gaussiano de média nula que representa a precisão do MNET.

As precisões obedecem a norma LE90 (*linear error 90%*), que estipula que noventa por cento dos resíduos nas medições das altitudes dos pontos do MNET estarão abaixo de um determinado valor.

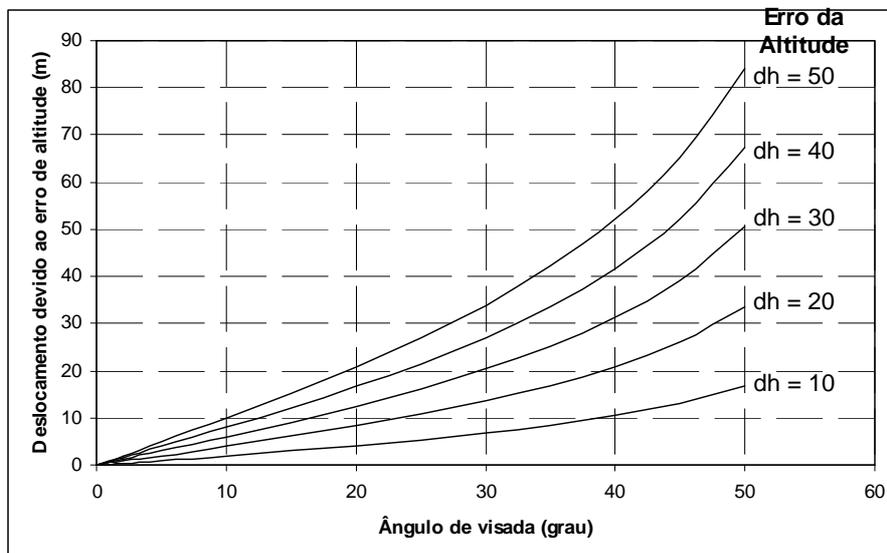


FIGURA 3.25 – Desvio do posicionamento de um *pixel* em função do erro da altitude e do ângulo de visada.

As cartas topográficas trabalham com o conceito de LE90 associado à metade da equidistância. Por exemplo, as altitudes obtidas de cartas topográficas na escala de 1:100.000, com equidistância de 40m, atendem ao LE90-20m.

Esses dois cenários foram então comparados de diferentes maneiras distintas, variando-se a precisão dos dados de altitude do MNET e buscando-se a precisão que corresponderia ao limiar de um décimo da resolução espacial.

3.10.1 CCD-CBERS 1, 2 e 2B

A tabela 3.92 apresenta os resultados da influência da imprecisão do MNET na ortorretificação de imagens do sensor CCD, sob diferentes ângulos de visada.

TABELA 3.92 – Avaliação do efeito da precisão do MNET na qualidade geométrica das imagens do sensor CCD-CBERS.

Precisão do MNET	Ângulo de Visada				
	0°	8°	16°	24°	32°
LE90 = 5m EMQ = 3,0m	0,2 / 0,01	0,5 / 0,02	1,0 / 0,05	1,6 / 0,08	2,2 / 0,11
LE90 = 7m EMQ = 4,2m	0,2 / 0,01	0,7 / 0,03	1,4 / 0,07	2,2 / 0,11	3,1 / 0,16
LE90 = 10m EMQ = 6,1m	0,3 / 0,02	1,0 / 0,05	2,0 / 0,10	3,1 / 0,16	4,4 / 0,22
LE90 = 20m EMQ = 12,1m	0,7 / 0,03	2,0 / 0,10	4,0 / 0,20	6,2 / 0,31	9,0 / 0,45
LE90 = 50m EMQ = 30,3m	1,7 / 0,08	4,9 / 0,25	9,9 / 0,49	15,6 / 0,78	22,4 / 1,12

Os resultados indicam que dados altimétricos obtidos de cartas 1:250.000 (LE90-50m) são suficientes para ortorretificar as imagens verticais ou quase verticais. As cartas 1:100.000 (LE90-20m) atendem as imagens em visada oblíqua até 8°, as cartas 1:50.000 (LE90-10m) as imagens em visada oblíqua até 16°, enquanto as cartas 1:25.000 atendem até a inclinação de 32°.

O SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) apresenta precisão suficiente para ortorretificar imagens CCD-CBERS com inclinação fora do nadir de até 8°.

3.10.2 HRC-CBERS 1, 2 e 2B

A tabela 3.93 apresenta os resultados da influência da imprecisão do MNET na ortorretificação de imagens do sensor HRC, sob diferentes ângulos de visada.

TABELA 3.93 – Avaliação do efeito da precisão do MNET na qualidade geométrica das imagens do sensor HRC-CBERS.

Precisão do MNET	Ângulo de Visada		
	0°	2°	4°
LE90 = 5m EMQ = 3,0m	0,0 / 0,02	0,1 / 0,05	0,2 / 0,09
LE90 = 10m EMQ = 6,1m	0,1 / 0,03	0,2 / 0,10	0,5 / 0,19
LE90 = 25m EMQ = 15,2m	0,2 / 0,09	0,6 / 0,24	1,2 / 0,47

Os resultados indicam que dados altimétricos obtidos de cartas 1:100.000 (LE90-20m) podem ser usados para ortorretificar as imagens verticais. As cartas 1:50.000 (LE90-10m) devem ser empregadas na ortorretificação de imagens com até 2° de visada oblíqua, enquanto as cartas 1:25.000 (LE90-5m) podem ser usadas em qualquer situação prevista (inclinação máxima de 4°).

O SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) apresenta precisão suficiente para ortorretificar imagens HRC-CBERS obtidas ao nadir.

3.10.3 IRMSS, WFI, PAN, IRS e AWFI-CBERS

A tabela 3.94 apresenta os resultados da imprecisão do MNET para diferentes sensores, tais como: IRMSS (CBERS 1 e 2), WFI (CBERS 1, 2 e 2B), PAN-MS (CBERS 3 e 4), PAN-P (CBERS 3 e 4) e AWFI (CBERS 3 e 4).

TABELA 3.94 – Avaliação do efeito da precisão do MNET na qualidade geométrica das imagens de sensores CBERS.

Precisão do MNET		LE90 = 30m EMQ = 18,2m	LE90 = 100m EMQ = 60,6m	LE90 = 200m EMQ = 121,2m
CBERS 1 e 2	IRMSS			6,9 / 0,09
	WFI		21,4 / 0,09	
CBERS 3 e 4	PAN-MS	1,0 / 0,10		
	PAN-P	0,5 / 0,10		
	IRS		3,4 / 0,09	
	AWFI	6,6 / 0,10		

Os resultados da tabela 3.94 indicam que as cartas topográficas nas escalas de 1:100.000 (LE90-20m) podem ser usadas na ortorretificação das imagens dos sensores PAN (modos multi-espectral e pancromático) e AWFI, todos dos satélites CBERS 3 e 4.

As imagens dos sensores WFI (CBERS 1, 2 e 2B) e IRS (CBERS 3 e 4) podem ser ortorretificadas usando dados altimétricos provenientes de cartas 1:500.000 (LE90-100m), enquanto as imagens do sensor IRMSS (CBERS 1 e 2) podem usar cartas 1:1.000.000 (LE90-200m) para o processo de ortorretificação.

3.11 Coeficientes Polinomiais Racionais – RPC

Os coeficientes polinomiais racionais representam uma alternativa ao processo de ortorretificação baseado no modelo rígido.

Os fatores que mais influenciam a qualidade dos RPC's são: resolução espacial do sensor, amplitude da área geográfica de atuação dos RPC's, variação de altitude desta área e inclinação da visada central da imagem, ou ângulo de elevação do satélite, no

caso das imagens Ikonos. É importante destacar que o cálculo dos coeficientes polinomiais racionais (RPC) não contempla nenhum conhecimento da topografia da cena, a menos das altitudes mínima (H_{\min}), média (H_{med}) e máxima (H_{\max}).

Para avaliação dos RPC's foram construídos dois cenários, nos quais o primeiro contém as coordenadas planas de projeção ortorretificadas pelo modelo de nível 4 de processamento (seção 3.2.3 Mapeamento direto nível 4) e o segundo contém as coordenadas planas de projeção ortorretificadas pelos coeficientes polinomiais racionais (seção 3.2.7 Polinômios racionais).

3.11.1 Ikonos

O estudo começará com o sensor Ikonos pelo seu pioneirismo. O sensor Ikonos (pancromático) foi o primeiro sensor orbital de alta resolução espacial (1m). Ele é um sensor de varredura eletrônica, com faixa de imageamento de 11km. Ele não apresenta a divisão das passagens segundo uma grade de referência. Neste estudo considerou-se uma imagem quadrada de $11 \times 11 \text{ km}^2$.

Conforme visto na seção 3.2.7 (Polinômios racionais), foi com este satélite que foi introduzido o conceito de coeficientes polinomiais racionais para ortorretificar imagens de satélite.

O estudo sobre a eficiência desses coeficientes engloba diversas configurações, variando-se o ângulo de visada e o intervalo entre as altitudes mínima e máxima.

A tabela 3.95 apresenta os resultados para o sensor Ikonos, com o ângulo de visada variando de 0° a 40° , em passos de 10° , e com os mesmos MNET's usados nas seções 3.8 (Relevo) e 3.10 (MNET).

Os resultados da tabela indicam que para ângulos de visada até 10° , os RPC's permitem a geração de produtos compatíveis com a escala de 1:10.000, para todos os modelos de terreno estudados. Para ângulos de visada até 20° , essa escala é alcançada para modelos de terreno com desnível de altitude inferior a 900m. Para ângulos de visada maiores (até 40°), o desnível altimétrico máximo fica restrito a 300m.

Em todas as configurações testadas, o resultado alcançado é compatível com a escala de 1:25.000.

TABELA 3.95 – Avaliação do uso de RPC's na ortorretificação de imagens Ikonos.

θ	Altitude Máxima / Altitude Média (m)			
	300 / 140,7	600 / 281,5	900 / 422,2	1200 / 563,0
0°	0,8 / 0,78	1,0 / 1,02	1,3 / 1,31	1,6 / 1,57
±10°	2,1 / 2,09	2,7 / 2,71	3,3 / 3,31	3,9 / 3,90
±20°	3,4 / 3,40	4,4 / 4,41	5,3 / 5,32	6,2 / 6,24
±30°	4,8 / 4,81	6,1 / 6,10	7,3 / 7,32	8,6 / 8,58
±40°	6,2 / 6,23	7,8 / 7,80	9,3 / 9,33	10,9 / 10,91

3.11.2 CCD-CBERS 1, 2 e 2B

A tabela 3.96 apresenta os resultados da influência da imprecisão dos RPC's na ortorretificação de imagens do sensor CCD, com o ângulo de visada variando de 0° a 32°, em passos de 8°, e com os mesmos MNET's usados nas seções 3.8 (Relevo) e 3.10 (MNET).

Os resultados da tabela indicam que estes coeficientes podem ser usados no processo de ortorretificação em qualquer cenário.

TABELA 3.96 – Avaliação do uso de RPC's na ortorretificação de imagens CCD-CBERS.

θ	Altitude Máxima / Altitude Média (m)			
	300 / 140,7	600 / 281,5	900 / 422,2	1200 / 563,0
0°	1,7 / 0,08	2,5 / 0,12	3,3 / 0,17	4,2 / 0,21
±8°	3,9 / 0,19	5,7 / 0,28	7,6 / 0,38	9,6 / 0,48
±16°	6,1 / 0,30	9,0 / 0,45	12,0 / 0,60	15,1 / 0,75
±24°	8,2 / 0,41	12,3 / 0,61	16,4 / 0,82	20,6 / 1,03
±32°	10,4 / 0,52	15,6 / 0,78	20,8 / 1,04	26,1 / 1,31

3.11.3 HRC-CBERS 2B

A tabela 3.97 apresenta os resultados da influência da imprecisão dos RPC's na ortorretificação de imagens do sensor HRC, com o ângulo de visada variando de 0° a 4°, em passos de 2°, e com os mesmos MNET's usados nas seções 3.8 (Relevo) e 3.10 (MNET).

Os resultados da tabela indicam que estes coeficientes podem ser usados no processo de ortorretificação em qualquer cenário, mesmo quando a escala almejada seja de 1:10.000.

TABELA 3.97 – Avaliação do uso de RPC's na ortorretificação de imagens HRC-CBERS.

θ	Altitude Máxima / Altitude Média (m)			
	300 / 140,7	600 / 281,5	900 / 422,2	1200 / 563,0
0°	1,1 / 0,43	1,4 / 0,57	1,7 / 0,69	2,1 / 0,84
±2°	1,3 / 0,53	1,6 / 0,64	1,9 / 0,76	2,3 / 0,92
±4°	1,6 / 0,65	1,9 / 0,77	2,3 / 0,92	2,7 / 1,08

3.12 Modelo de Correção Geométrica

O modelo de correção geométrica também é uma fonte de distorção geométrica, uma vez que simplificações são necessárias para tornar viável a implementação do *software* de geração de imagens corrigidas.

A simplificação mais importante é a adoção de uma grade amostral para aplicação do modelo rígido. Apenas os nós da grade (menos de 1% da imagem) têm a relação entre os planos-imagem níveis 1 e 2 (ou 3, ou 4) estabelecida por um modelo matemático baseado na aquisição da imagem. Os demais pontos têm a relação firmada por interpolação dos nós da grade.

Quanto maior o espaçamento entre os nós da grade, mais ágil é o modelo, porém à custa da precisão. O importante é encontrar o ponto ótimo entre qualidade e agilidade.

3.13 Resultados Sobre Imagens CCD-CBERS

Afim de avaliar de forma prática os modelos de correção geométrica em seus diferentes níveis, selecionou-se uma área para geração de três imagens formando um terno estereográfico. Essas foram adquiridas com ângulos de inclinação do espelho diferentes, isto é, uma com visada à oeste de 18,6°, a segunda em vida nadir, ou vertical (0°), e

finalmente, uma terceira com visa à leste de $17,0^\circ$. Essas imagens foram geradas em três níveis de processamento: 2, 3 e 4.

Para a avaliação das imagens geradas utilizou-se como referência uma imagem nível 3, só que produzida manualmente. Para o georreferenciamento desta imagem foram utilizados pontos de controle extraídos de imagens *GeoCover Landsat* disponíveis livremente na Internet.

Foram medidos 24 pontos de controle em cada imagem e o processo de avaliação empregado para cada uma das imagens, em cada nível de processamento, para cálculo do erro médio quadrático EMQ, seguiu o seguinte processo:

- Comparação direta entre as coordenadas das imagens e a coordenadas da imagem de referência (erro 1);
- Eliminação do erro sistemático das coordenadas medidas nas imagens sob avaliação e comparação com as coordenadas de referência (erro 2);
- Aplicação de uma transformação de similaridade às coordenadas medidas nas imagens sob avaliação e comparação com as coordenadas de referência (erro 3);
- Aplicação de uma transformação afim às coordenadas medidas nas imagens sob avaliação e comparação com as coordenadas de referência (erro 4);

Foram selecionados 9 pontos (pontos de controle) para o cálculo dos parâmetros das transformações de similaridade e afim. A comparação entre coordenadas das imagens sob avaliação e a imagem de referência usou os 15 (pontos de teste) pontos restantes. A figura 3.26 apresenta a distribuição espacial destes pontos.

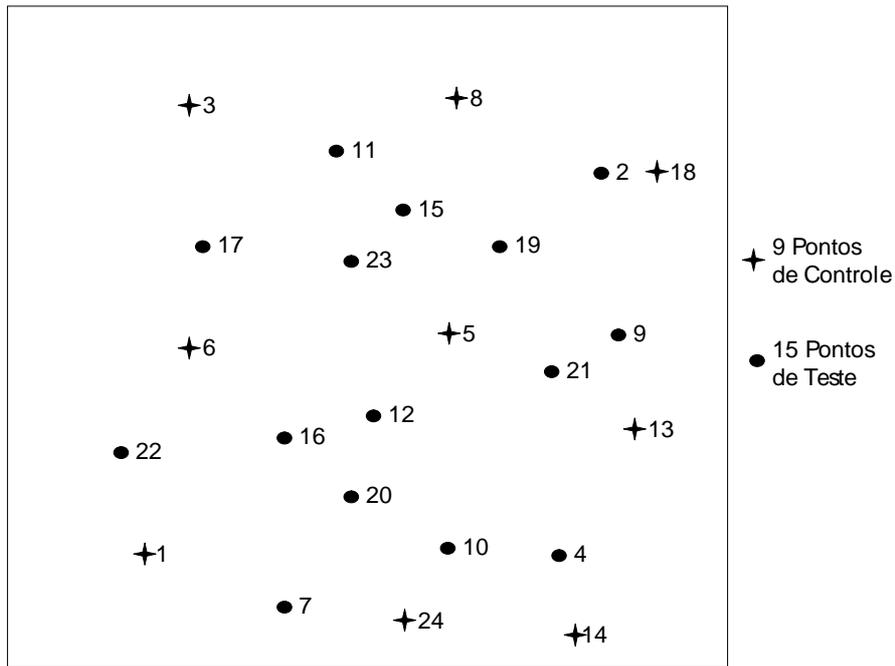


FIGURA 3.26 – Distribuição dos pontos de controle e teste.

As tabelas 3.98 a 3.100 apresentam os resultados das avaliações realizadas sobre as imagens selecionadas para o teste. Cada célula da tabela apresenta o EMQ medido em metros e em GSD.

TABELA 3.98 – Avaliação geométrica das imagens CCD-CBERS com inclinação de 0° (nadir).

	Nível 2	Nível 3	Nível 4
	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
Direta (Erro 1)	4905,4 / 245,22	34,1 / 1,71	32,7 / 1,63
Translação (Erro 2)	131,3 / 6,56	31,0 / 1,55	28,6 / 1,43
Similaridade (Erro 3)	111,3 / 5,57	31,0 / 1,55	28,4 / 1,42
Afim (Erro 4)	33,6 / 1,68	30,8 / 1,53	27,2 / 1,36

TABELA 3.99 – Avaliação geométrica das imagens CCD-CBERS com inclinação de - 18,6° (oeste).

	Nível 2	Nível 3	Nível 4
	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
Direta (Erro 1)	12.827,3 / 641,37	47,0 / 2,34	33,5 / 1,67
Translação (Erro 2)	137,0 / 6,85	45,1 / 2,25	30,2 / 1,51
Similaridade (Erro 3)	81,7 / 4,08	43,7 / 2,18	29,7 / 1,48
Afim (Erro 4)	43,6 / 2,18	42,9 / 2,15	29,1 / 1,46

TABELA 3.100 – Avaliação geométrica das imagens CCD-CBERS com inclinação de 17,0° (leste).

	Nível 2	Nível 3	Nível 4
	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)	EMQ (m / GSD)
Direta (Erro 1)	9.144,6 / 457,23	54,2 / 2,71	40,4 / 2,02
Translação (Erro 2)	370,0 / 18,50	50,3 / 2,51	37,3 / 1,87
Similaridade (Erro 3)	297,5 / 14,87	49,2 / 2,46	36,8 / 1,84
Afim (Erro 4)	59,3 / 2,96	49,2 / 2,46	36,8 / 1,84

Os resultados para as imagens de nível 2 de processamento indicam a má qualidade dos dados orbitais, que provocam um erro de posicionamento muito acentuado, de alguns quilômetros.

O uso de pontos de controle para eliminação do erro sistemático reduz sobre-maneira as distorções das imagens neste nível de processamento. Porém as tabelas 3.98 a 3.100 continuam indicando nível de distorção muito elevado (131,3m a 370,0m). Ou seja, as imagens nível 2 apresentam má qualidade tanto na geometria externa (posicionamento) quanto interna.

Os mais fortes candidatos como fontes causadoras destas distorções são dos dados de efemérides e atitude, pela má qualidade, fruto da especificação.

Os resultados das transformações de similaridade e afim sobre as imagens em nível 2 indicam que o EMQ deve diminuir muito para os níveis mais elevados. Além disso, as significativas diferenças entre os resultados relativos a estas transformações indicam que as imagens em nível 2 ainda contêm distorções de cisalhamento e anisomorfismo, típicas de má qualidade de dados de efemérides (seção 3.3) e atitude (seção 3.4). Os resultados da transformação afim (erro 4) na coluna referente ao nível 2 servem como indicador para os resultados referente ao nível 3.

Os resultados para as imagens em nível 3 mostram uma melhora significativa quando comparados com os resultados para as imagens em nível 2. Entretanto, os resultados das tabelas 3.99 e 3.100 quando comparados com os da tabela 3.98, mostram que pontos de controle não são suficientes para reduzir o EMQ para valores inferiores a duas vezes a resolução espacial para imagens em visada oblíqua. Nestas imagens, eles variaram de 47,0m (2,34 GSD) a 54,2m (2,71 GSD).

Além disso, a comparação dos erros 2, 3 e 4 para este nível de processamento mostra que esta queda não será obtida por transformação polinomial. Ela deverá ser obtida pela correção da distorção relativa ao relevo.

Observando a coluna relativa ao nível 4 conclui-se que, independente do ângulo de visada, as imagens neste nível de processamento apresentam um excelente resultado, com o EMQ não ultrapassando o dobro da resolução espacial do sensor em nenhum dos três casos. A melhora em relação ao nível 3 se situou próxima a dois terços da resolução espacial.

Para imagens em visada nadir, o nível 3 apresenta um resultado excelente, muito próximo ao do nível 4, corroborando a tese de que não há necessidade de se ortorretificar imagens em tomada vertical para sensores de média ou baixa resolução espacial.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA OS SENSORES DOS SATÉLITES CBERS

O capítulo anterior (Simulação e Análise da Geometria das Imagens) apresenta diversos resultados que serão analisados aqui, no intuito de mostrar as limitações dos diversos sensores e apontar as necessidades de melhoria para os futuros satélites da série CBERS.

4.1 Geometria de Visada

O primeiro ponto a ser analisado refere-se ao modelo de geometria do sensor, componente importante da geometria de visada. Nos sensores de varredura mecânica (IRMSS e IRS), ele é definido por meio de uma equação do movimento do espelho que associa ângulo de visada a um determinado instante (ou a um determinado *pixel* da varredura, posto que a taxa de amostragem de *pixels* é considerada constante). Infelizmente, no caso do sensor IRMSS há um grande grau de incerteza sobre os parâmetros que definem a equação do movimento.

Nos sensores de varredura eletrônica (CCD, WFI, HRC, PAN, MUX e AWF1), a principal componente é a distância focal do instrumento. Ela pode sofrer variações dinâmicas por conta da temperatura, além de variação em relação ao valor nominal de projeto, por ocasião da construção e montagem do sensor no satélite. No caso de sensores de amplo campo de visada (WFI e AWF1), há o fato agravante de haver dois sistemas óticos independentes, com equações de compensação da distorção panorâmica. Os parâmetros destas equações não são precisamente conhecidos.

A figura 4.1 apresenta os valores máximos de variação dos parâmetros da geometria de visada em termos percentuais para diversos sensores, tanto para o nível 2 quanto para os níveis 3 e 4 de processamento. Esses valores mostram dois resultados interessantes. Há uma relação linear entre o GSD e a distorção máxima para todos os sensores que

apresentam o mesmo campo de visada (Pan-MS, CCD, IRS e IRMSS); e as variações permitidas para que uma imagem em nível 2 de processamento apresente qualidade geométrica similar às em níveis 3 e 4 são cem vezes menores. Ou seja, esses parâmetros têm que ser muito bem medidos durante a fase de integração e testes, pois o conhecimento permite um pequeno erro, na ordem de trinta em cada milhão de unidades medidas (ex.: 30 μ m em cada 1m).

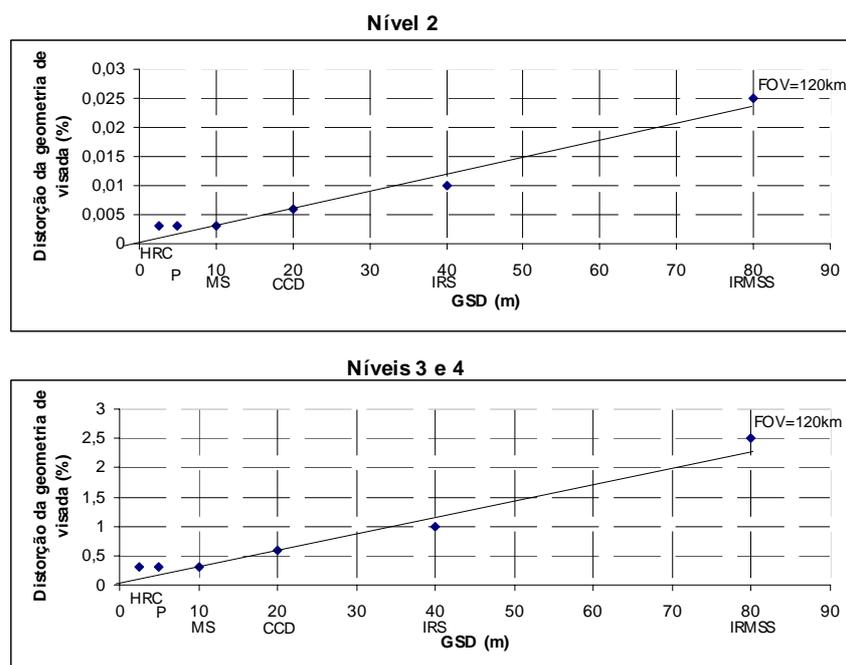


FIGURA 4.1 – Distorção relativa dos parâmetros da geometria de visada.

Os sensores de melhor resolução espacial apresentam o mesmo resultado que a câmera CCD, pois o aumento do poder resolutivo é acompanhado pela redução do campo de visada.

Os sensores de amplo campo de visada não foram incluídos na figura 4.1, pois apresentam comportamento que foge ao dos demais. O sensor WFI apresentou resultados semelhantes ao do instrumento IRS, que tem um poder resolutivo seis vezes melhor, enquanto a câmera AWFÍ apresentou resultados semelhantes aos dos sensores HRC, PAN-P e PAN-MS. Isso é explicado pela grande distorção panorâmica associada a esses sensores.

A figura 4.2 apresenta as variações máximas permitidas para a distância focal dos seis sensores de varredura eletrônica dos satélites CBERS, tanto para o nível 2 quanto para os níveis 3 e 4. Os sensores de maior poder resolutivo apresentam maior distância focal (figura 4.3), permitindo uma maior variação em valor absoluto, compensando, em parte, a restrição de menores variações percentuais.

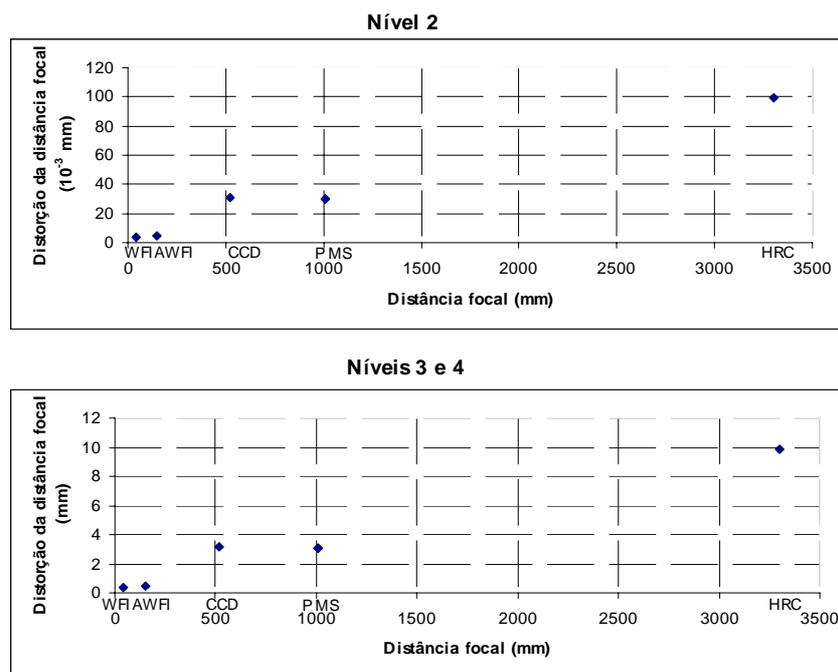


FIGURA 4.2 – Distorção absoluta da distância focal.

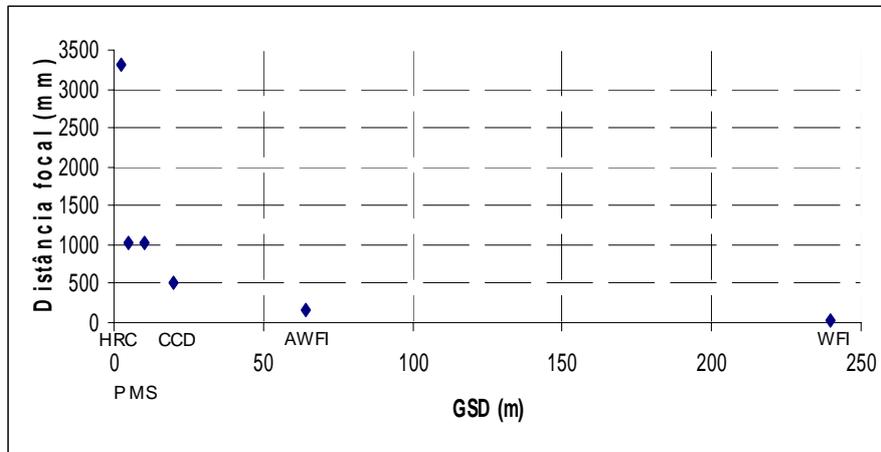


FIGURA 4.3 – Distância focal em função do GSD.

4.2 Efemérides

As efemérides dos satélites CBERS 1 e 2 apresentam qualidade inferior à especificação definida em projeto. Essa especificação permanecerá, em princípio, a mesma para os próximos satélites da série (2B, 3 e 4).

As figuras 4.4 e 4.5 apresentam os valores máximos para os erros sistemáticos da posição e velocidade do satélite para geração de imagens em níveis de processamento 2, 3 e 4 com qualidade geométrica melhor que duas vezes a resolução espacial. A figura 4.6 apresenta os valores máximos para os desvios-padrões dos erros aleatórios das efemérides, também para os níveis de processamento 2, 3 e 4.

Esses valores mostram dois resultados interessantes, já verificados no tocante à geometria de visada (seção 4.1). Há uma relação linear entre o GSD e a distorção máxima para todos os sensores que apresentam o mesmo campo de visada (Pan-MS, CCD, IRS e IRMSS); e as variações permitidas para o nível 2 são cem vezes menores que as permitidas para os níveis 3 e 4, a menos do desvio-padrão.

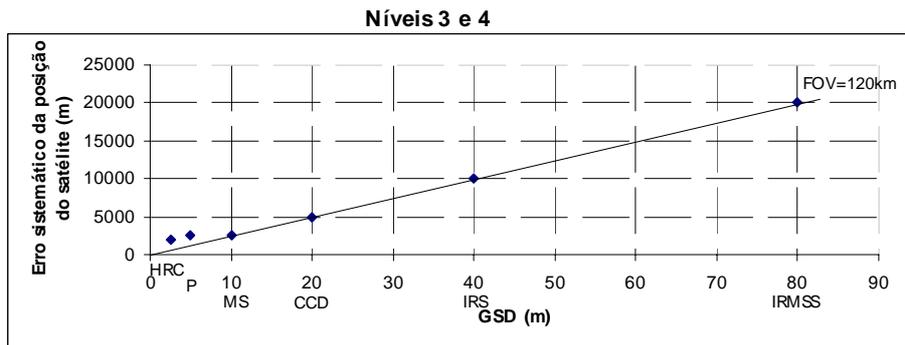
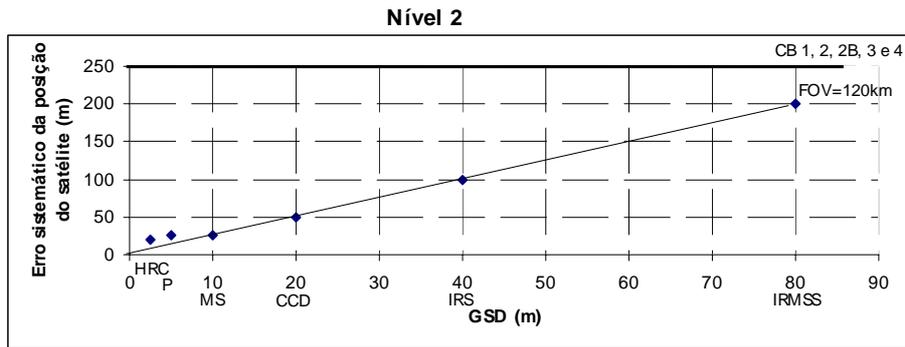


FIGURA 4.4 – Erro sistemático da posição do satélite.

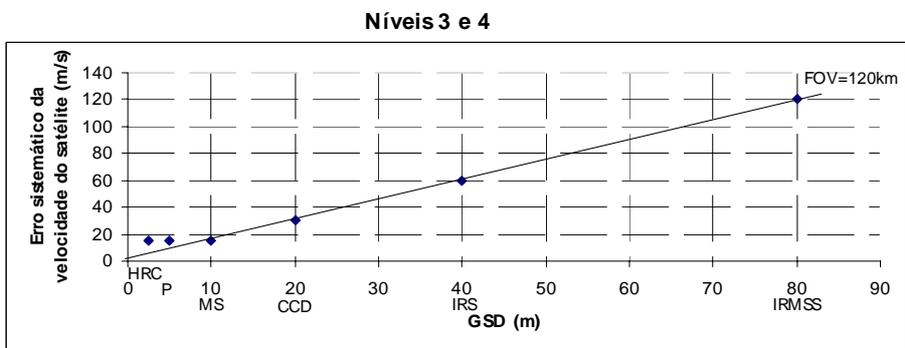
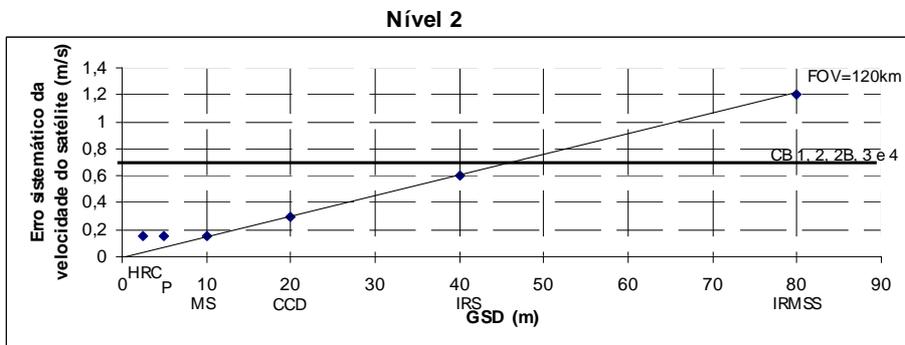


FIGURA 4.5 – Erro sistemático da velocidade do satélite.

Os valores máximos permitidos para os erros sistemáticos das efemérides para os níveis mais avançados superam em muito os valores especificados e superam também os valores que têm se verificado na prática. Ou seja, esses erros não constituem um problema para geração de produtos em níveis 3 e 4 de processamento. Entretanto, para geração de imagens em nível 2 seria necessário que os satélites CBERS 1 e 2 apresentassem dados relativos à posição do satélite com precisão cinco vezes melhor (250 para 50m) e velocidade da ordem de duas vezes melhor (0,7 para 0,3m/s). Para os satélites CBERS 3 e 4, com sensores de maior poder resolutivo, a precisão da posição do satélite deveria ser dez vezes melhor (250 para 25m), enquanto a da velocidade deveria ser da ordem de cinco vezes melhor (0,7 para 0,15m/s).

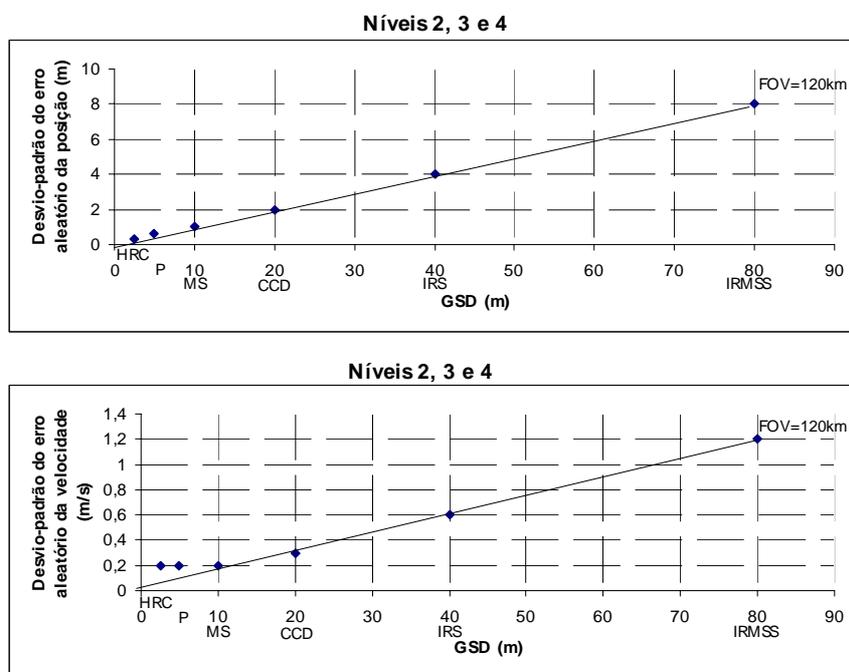


FIGURA 4.6 – Erro aleatório das efemérides do satélite.

O impacto dos erros aleatórios independem do nível de processamento. Os valores máximos tolerados para as efemérides (ex. CCD: 2m (1 σ) e 0,3m/s (1 σ)) são inferiores aos valores encontrados na prática. Não existe especificação disponível sobre esses parâmetros. De qualquer forma, a conclusão obtida dos resultados apresentados nessa seção e na seção 4.3 (Efemérides) é que pode haver um comprometimento da qualidade geométrica das imagens, inclusive em níveis mais avançados.

Em suma, os dados de efemérides dos satélites CBERS 1, 2, 2B, 3 e 4 apresentam qualidade incompatível com os sensores transportados, a menos do sensor WFI. Para este, o comprometimento é apenas da posição do satélite para o nível 2 de processamento. Para os demais, incluindo a câmera AWFI, os dados de efemérides tinham que apresentar maior precisão.

Essas análises não levam em consideração o sensor GPS que estará presente nos futuros satélites CBERS. Porém, as características dos sensores GPS permitem afirmar que, em função dos resultados apresentados nas figuras 4.4 a 4.6, as efemérides não constituirão mais um problema para a alta qualidade geométrica das imagens em qualquer nível de processamento dos sensores dos satélites CBERS 2B, 3 e 4.

4.3 Atitude

Os dados de atitude dos satélites CBERS 1 e 2 apresentam valores muito próximos a zero, parecendo ser mais um erro de medição que alta qualidade do sistema de controle. A figura 4.7 apresenta os valores máximos para os erros sistemáticos da atitude do satélite para geração de imagens em níveis de processamento 2, 3 e 4 com qualidade geométrica melhor que duas vezes a resolução espacial. A figura 4.8 apresenta os valores máximos para os desvios-padrões dos erros aleatórios da atitude, também para os níveis de processamento 2, 3 e 4.

Uma característica que já se configura como padrão, torna a aparecer nos dados de atitude: há uma relação linear entre o GSD e a distorção máxima permitida para todos os sensores que apresentam o mesmo campo de visada (Pan-MS, CCD, IRS e IRMSS).

Para a geração de imagens em nível 2 de processamento, os dados de atitude apresentam uma precisão muito pior do que o necessário, independente do satélite e do sensor. Entretanto, para os níveis 3 e 4, apenas os sensores CCD (CBERS 1, 2 e 2B) e HRC (CBERS 2B) ficam comprometidos pela qualidade dos dados de atitude. A figura 4.7 mostra claramente que o valor especificado para a precisão da atitude destes satélites é maior que o valor máximo aceito para o erro sistemático da atitude em relação a esses sensores.

Nessa lista, pode-se incluir também os sensores de amplo campo de visada (WFI – CBERS 1, 2 e 2B – e AWFI – CBERS 3 e 4). Para ambos, os valores especificados de precisão de atitude para os respectivos satélites são maiores que os valores máximos tolerados para esses sensores.

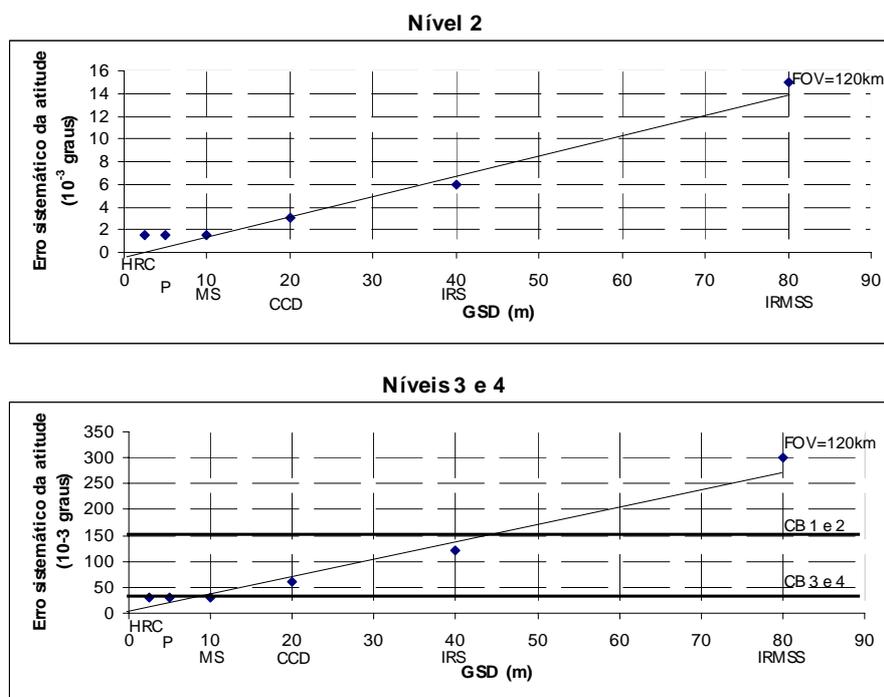


FIGURA 4.7 – Erro sistemático da atitude do satélite.

Em relação ao erro aleatório, todas as imagens dos sensores dos satélites 1, 2 e 2B têm a qualidade geométrica comprometida, pois o valor especificado é maior que o máximo tolerado para os sensores desses satélites.

Os sensores PAN modo P e modo MS dos satélites CBERS 3 e 4 ainda apresentarão problemas decorrentes dos dados de atitude, mesmo em níveis mais avançados. No entanto, os sensores MUX, IRS e AWFI não deverão apresentar problemas decorrentes do erro aleatório da atitude.

Níveis 2, 3 e 4

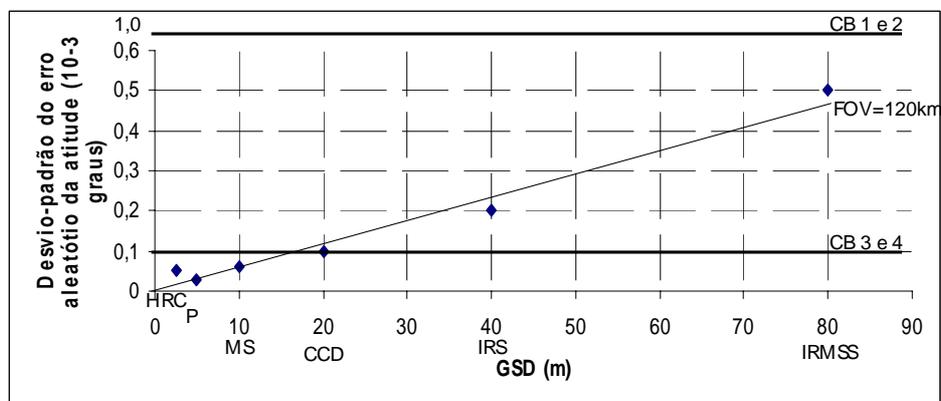


FIGURA 4.8 – Erro aleatório da atitude do satélite.

Essas análises não levam em consideração os sensores estelares que estarão a bordo dos futuros satélites CBERS. As características dos sensores estelares permitem afirmar que, em função dos resultados apresentados nas figuras 4.7 e 4.8, os dados de atitude não deverão comprometer a qualidade geométrica das imagens dos sensores dos satélites CBERS 2B, 3 e 4.

4.4 Pontos de Controle

Os pontos de controle são largamente usados para melhorar a qualidade geométrica das imagens de satélites de sensoriamento remoto. Eles podem ser incorporados no sistema da estação para refinar o modelo de correção geométrica (seção 3.2.3, Mapeamento Direto Nível 3) ou podem ser usados pelos usuários para gerar uma nova imagem com melhor qualidade geométrica.

Para garantir que os pontos de controle vão trazer ganho para o processo de correção geométrica é necessário que eles apresentem precisão igual ou melhor à metade da resolução espacial do sensor (seção 4.9, Pontos de Controle).

A figura 4.9 apresenta a precisão requerida para os pontos de controle para cada um dos sensores, e indica a escala das cartas topográficas, caso essas venham a ser usadas como fonte para obtenção das coordenadas desses.

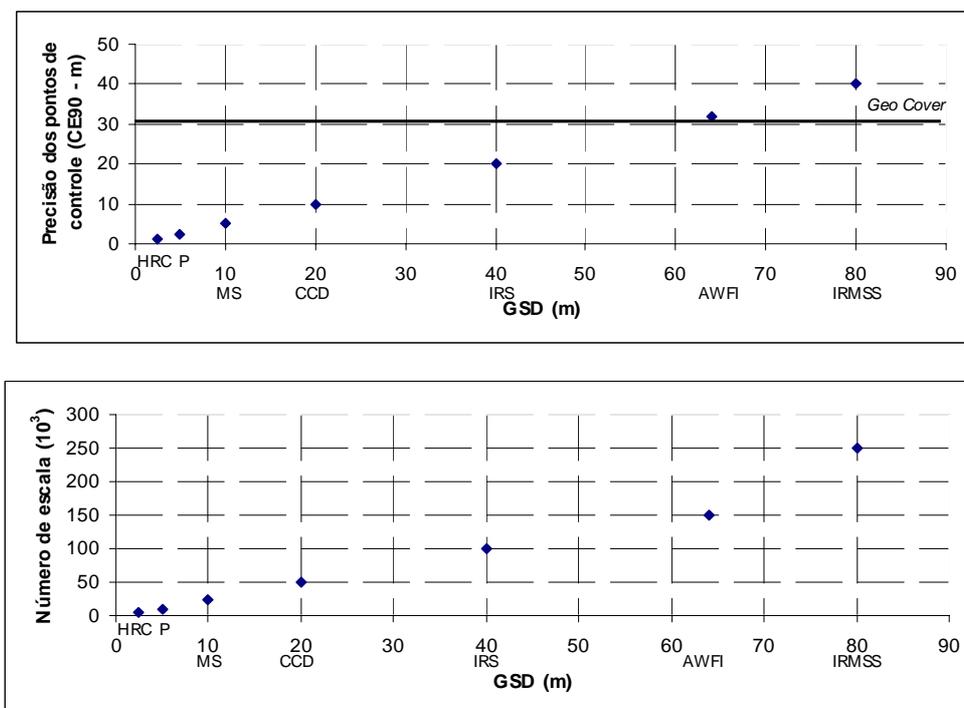


FIGURA 4.9 – Pontos de controle e a resolução espacial.

As cartas topográficas nas escalas de 1:250.000 até 1:25.000 atendem plenamente aos sensores PAN modo MS, MUX, CCD, IRS, AWFI e IRMSS. Para os sensores PAN modo P e HRC são necessárias cartas topográficas nas escalas 1:10.000 e 1:5.000, respectivamente. Essas escalas são mais difíceis de se encontrar, estando mais restritas às áreas urbanas das grandes cidades.

O produto *Geo Cover*, resultado do mosaico de imagens ortorretificados do sensor ETM+ do satélite Landsat-7, apresenta precisão incompatível para servir como fonte de pontos de controle para a maior parte dos sensores CBERS. Ele pode ser usado como fonte de pontos de controle dos sensores de amplo campo de visada (WFI e AWFI).

4.5 Modelo Numérico de Elevação do Terreno – MNET

Os sensores de alta resolução espacial, bem como os de média resolução espacial em visada oblíqua, necessitam de melhor caracterização da topografia do terreno, de modo a eliminar as distorções provocadas pelo relevo. Em suma, essas imagens precisam ser ortorretificadas.

No caso dos satélites CBERS, há dois sensores que merecem especial atenção em relação à ortorretificação: o CCD (CBERS 1, 2 e 2B), pela capacidade de visada oblíqua lateral e o HRC (CBERS 2B), pela alta resolução espacial.

O sensor CCD possui a capacidade de visada lateral de 32° oeste a 32° leste. A figura 4.10 apresenta a precisão do MNET em função do ângulo de inclinação e a respectiva escala da carta topográfica, caso essa seja a fonte para aquisição do MNET. As cartas topográficas nas escalas de 1:25.000 a 1:250.000 atendem todo o espectro da visada lateral do sensor CCD. O SRTM pode ser usado para imagens com visada oblíqua inferior a 10°.

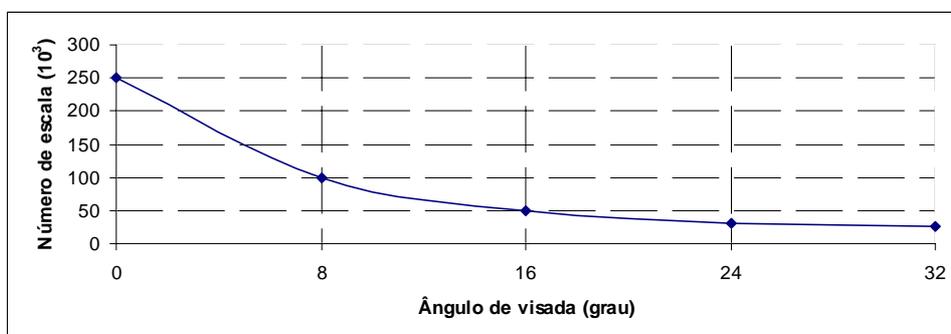
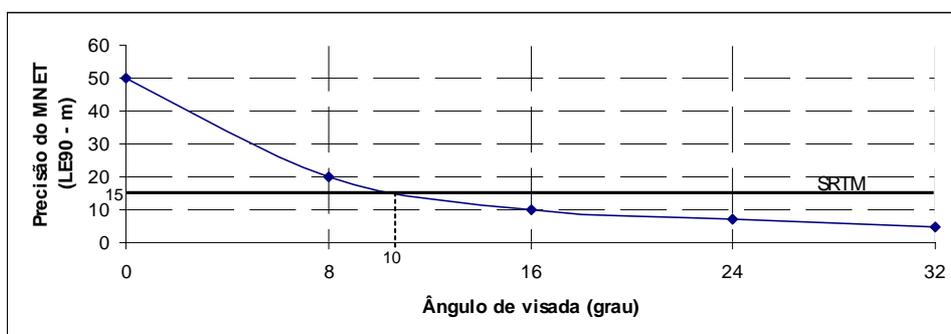


FIGURA 4.10 – Precisão do MNET em função da visada oblíqua do sensor CCD.

O sensor HRC apresenta um campo de visada de apenas 27km. Por conta disso, para que haja uma cobertura global de imagens desse sensor, é necessário que o satélite rode de modo a que sucessivas passagens permitam a completa cobertura da superfície terrestre. Em princípio, haverá cinco diferentes conjuntos de aquisição de imagens HRC, uma ao nadir, duas próximas a 2° de inclinação (uma a oeste e outra a leste) e duas próximas a 4° de inclinação (uma a oeste e outra a leste). A figura 4.11 apresenta a precisão do MNET em função do ângulo de inclinação e a respectiva escala da carta topográfica, caso essa seja a fonte para aquisição do MNET. As cartas topográficas nas escalas de 1:25.000 a 1:250.000 atendem a configuração projetada para o sensor HRC. O SRTM pode ser usado para o conjunto de imagens em visada nadir. As cartas topográficas na escala de 1:50.000 podem ser usadas para as tomadas a 2°, enquanto que as cartas topográficas na escala de 1:25.000 podem ser usadas para as tomadas a 4°.

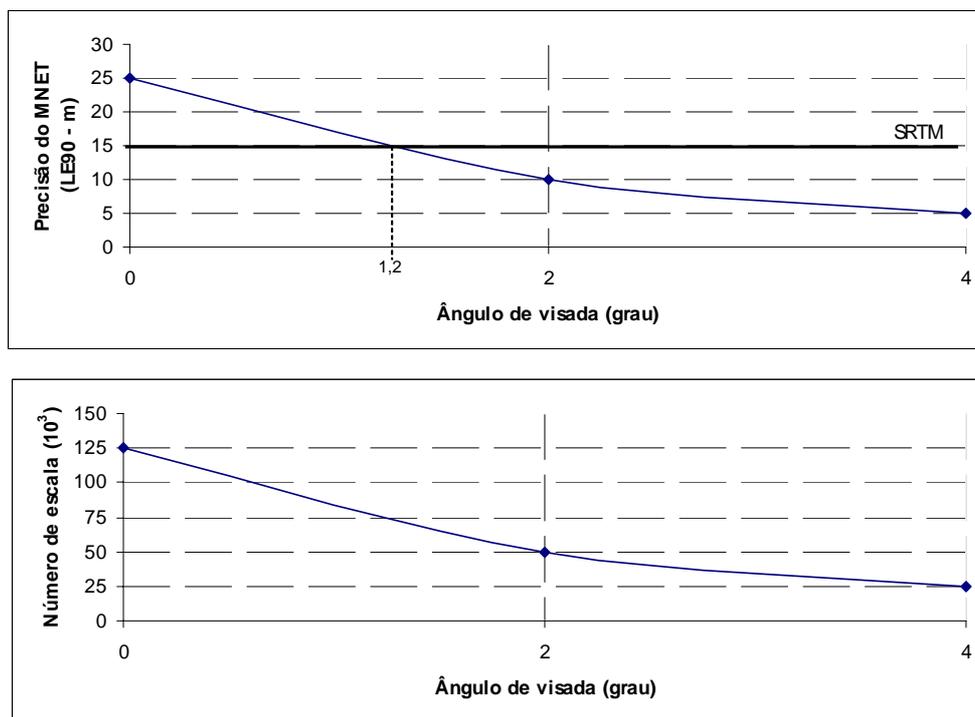


FIGURA 4.11 – Precisão do MNET em função da visada oblíqua do sensor HRC.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento desta tese ocorreu em paralelo ao desenvolvimento do sistema da estação terrena do INPE (MS³). Ao longo dos anos, os estudos realizados para a tese foram incorporados ao sistema MS³, aprimorando os diversos modelos e melhorando a qualidade dos produtos gerados. Ao mesmo tempo, problemas que surgiram durante o desenvolvimento do sistema, foram incorporados ao escopo da tese, sempre buscando soluções eficientes para a geração das imagens.

Esta foi a maior contribuição deste trabalho: ver o esforço materializado num sistema que atende a mais de mil usuários por mês, gerando mais de cem mil imagens por ano. Todos os modelos, idéias e processos pensados e desenvolvidos para esta tese foram implementados no sistema de geração de produtos da estação terrena do INPE, ou materializados em aplicativos que servem para buscar a excelência no setor de imagens de satélite de sensoriamento remoto.

Além de contribuir para o MS³, os aplicativos de visualização, avaliação, análise e simulação são resultantes das idéias desenvolvidas para este trabalho, e foram as ferramentas empregadas para os resultados aqui apresentados.

O aplicativo que permite a visualização e a avaliação geométrica de imagens, aponta as possíveis causas associadas às distorções.

O aplicativo que permite a análise e a simulação em relação à geometria das imagens trabalha com o conceito de cenários, onde um cenário é caracterizado pelo conjunto de dados necessários para a modelagem geométrica. Ele permite, então, a comparação entre dois diferentes cenários, para verificar, por exemplo, qual a melhor fonte de dados de efemérides: transmitida ou pós-processada. Na parte de simulação, é possível criar um cenário, que pode ser um sensor ainda não lançado, ou um dado sintético.

Essas características do aplicativo de análise e simulação permitem avaliar a especificação técnica dos diferentes sistemas. Por exemplo, para avaliar a qualidade dos dados de atitude, um cenário pode conter os dados transmitidos e o outro a atitude contaminada por um ruído baseado na precisão especificada.

Esse aplicativo consiste num primeiro passo para unir os esforços da equipe de Engenharia, que projeta o satélite, com a equipe mais ligada aos usuários, que foca na qualidade dos produtos que são gerados.

Essa área é um campo aberto para novos trabalhos de integração entre diferentes grupos com responsabilidades distintas.

O grande motivador desse trabalho, sem sombra de dúvida, é o programa CBERS. A participação brasileira e, em especial, a do INPE, vem ganhando importância e a interação com a comunidade de usuários vem se estreitando dia a dia.

Os dois primeiros satélites CBERS apresentaram problemas na geometria das imagens de seus sensores, por motivos diversos. O sensor CCD apresenta uma geometria de visada bem conhecida, porém os dados orbitais (efemérides e atitude) são de qualidade incompatível com a resolução espacial do sensor. Não apenas no tocante ao posicionamento das imagens, mas também no que diz respeito à geometria interna.

As distorções daí decorrentes são, entretanto de primeira ordem e facilmente eliminadas com transformações polinomiais de primeiro grau.

Em função disso, os produtos de nível 3, com identificação automática de pontos de controle, apresentam resultados excelentes, desde que haja disponibilidade destes pontos. Um aprimoramento do produto passa por uma análise espacial da distribuição e densidade dos pontos de controle, bem como da qualidade destes, baseada no histórico de usos prévios.

Os produtos de nível 4 apresentaram qualidade geométrica extraordinária. A ortorretificação provou ser necessária para imagens de sensores de alta resolução espacial ou obtidas em visada oblíqua.

Os sensores IRMSS e WFI apresentam um problema em comum, que é o desconhecimento da geometria de visada. Infelizmente, para esses sensores não há um conhecimento preciso dos parâmetros que levam a uma boa definição dos vetores de visada. Isso gera distorções graves na geometria interna das imagens. Ainda assim, transformações polinomiais de primeiro grau mostram resultados satisfatórios.

O grave problema da distorção panorâmica nos sensores de amplo campo de visada acarretou em uma grande sensibilidade dos sensores WFI e AWFI a imprecisões no apontamento, causadas, por exemplo, pelos dados de atitude. Pela mesma razão esses sensores sofrem graves distorções provocadas pelo relevo.

Os diversos resultados apresentados neste trabalho apontam para uma relação direta e próxima da linear entre as distorções nas imagens e os ruídos usados para contaminar os diversos parâmetros, dos vários sensores CBERS. Isso só não se configura de forma clara para os sensores WFI e AWFI que apresentam amplo campo de visada.

Para sensores com mesma largura de campo de visada, essa relação linear também ocorre, porém de forma inversa, entre o resíduo medido em GSD e o GSD propriamente dito. Sensores com resoluções espaciais R e $k.R$, por exemplo, apresentam distorções medidas em GSD respectivamente $k.D$ e D .

Para sensores com mesma resolução espacial, a relação linear entre o resíduo medido em GSD e a largura do campo de visada é direta. Sensores com larguras de campo de visada L e $k.L$ apresentam distorções medidas em GSD respectivamente D e $k.D$.

As distorções crescem de forma absoluta com o aumento da largura do campo de visada e com a inclinação de aquisição da cena. Crescem ainda de forma relativa com o aumento do poder resolutivo do sensor.

Os futuros satélites CBERS trarão sensores com 2,5 a 5 metros de resolução espacial. A solução em produtos de alta qualidade geométrica passa pela ortorretificação.

Os novos sistemas de posicionamento por GPS e os sensores estelares são uma garantia de melhora nos dados orbitais dos futuros satélites CBERS. Isto refletirá diretamente na

qualidade geométrica das imagens, fazendo com que os produtos em nível 2 de processamento apresentem qualidade geométrica compatível com a dos demais sensores de média resolução espacial, como o TM-Landsat.

Esta tese deixa campo aberto para diversos trabalhos de continuidade. Deve-se aprofundar o estudo sobre a influência da geometria de visada na qualidade geométrica das imagens, observando-se um conjunto maior de parâmetros, como a posição dos detetores e das barras de detetores em relação ao plano focal. Aliás, em relação a estas últimas, é importante observar o comportamento das imagens frente a pequenas rotações das barras, de forma independente uma das outras.

No tocante aos dados de efemérides, pode-se aprofundar os estudos, comparando diferentes fontes, tais como dados transmitidos, pós-processados ou obtidos pela *Web*. Ao invés de avaliar a contaminação somente nos dados de efemérides, deve-se avaliar também a contaminação por ruído dos parâmetros orbitais, tais como semi-eixo maior, excentricidade inclinação, argumento do perigeu e ascensão reta do nodo ascendente. Estudo semelhante pode ser realizado em relação aos dados de atitude transmitidos e pós-processados.

Os estudos em relação ao uso dos pontos de controle nos modelos de correção geométrica devem ser mais abrangentes. A influência da qualidade dos pontos de controle pode ser estudada de forma mais profunda, trabalhando-se com conjunto de pontos de controle com qualidades variáveis, e com distribuição e densidade variáveis também. Deve-se estudar formas de qualificar os pontos e de ponderar a participação desses no processo de geração de produtos mais avançados, em função da qualidade e da distribuição e densidade dos pontos de controle. Além disso, a influência do registro automático, ou seja, da identificação dos pontos de controle, também pode ser investigado.

Além de pontos de controle, os modelos de correção geométrica podem incorporar feições de controle, pois há indicações da maior facilidade de obtenção de feições, com melhor distribuição sobre as imagens.

Em relação ao MNET, é preciso avaliar também a influência da precisão do registro dos dados de altitude com a imagem, pois isso acarreta numa degradação da qualidade dos dados de altitude que vai além da precisão dos dados do MNET. A própria questão da precisão dos dados do MNET deve ser analisada do ponto de vista da relação entre as resoluções das grades do MNET e da matriz amostral de pontos do modelo de correção geométrica.

Os polinômios racionais representam uma solução extremamente simples, porém altamente eficiente. Este tipo de polinômio pode ser usado para registro de imagens multi-temporais e multi-sensores, mesmo que em projeções cartográficas diferentes. Apesar de utilizarem um grande número de coeficientes, no processo de registro entre imagens não há necessidade de conhecimento das coordenadas de terreno, ou seja, não há necessidade de pontos de controle. O que se precisa é de um bom número de pares de pontos homólogos, bem identificados em ambas as imagens. Diferentemente dos polinômios empregados na ortorretificação, esses polinômios são a duas variáveis (a altitude não é considerada). No caso de polinômios do terceiro grau, isso representa uma redução de setenta e oito para trinta e oito coeficientes.

Os processos de avaliação geométrica de imagens devem ir além das transformações polinomiais e focar também nos parâmetros de qualidade geométrica interna definidos pela escola francesa: variação do comprimento, anisomorfismo e similaridade.

No caso dos modelos de correção geométrica, deve-se pesquisar outras formas de usar pontos de controle para refinar a qualidade geométrica das imagens. Algumas são mais eficientes, pois observam a passagem como um todo, ao invés de trabalhar cena a cena. Os pontos de controle podem ser usados para a melhorar a qualidade dos parâmetros orbitais (efemérides e atitude), que voltam ao modelo para gerar os produtos em nível 3 de processamento.

APÊNDICE A

SISTEMAS DE COORDENADAS

Ao longo do processo de modelagem geométrica, diversos sistemas de coordenadas retangulares espaciais são utilizados, desde o referente ao instrumento em questão, até o sistema de referência do *datum* selecionado para a projeção cartográfica da imagem corrigida, passando pelos sistemas de referência da órbita, da plataforma e o geocêntrico.

1. Sistema de Referência das Bandas Espectrais – SRB
2. Sistema de Referência do Sensor – SRS
3. Sistema de Referência da Plataforma – SRP
4. Sistema de Referência da Órbita – SRO
5. Sistema de Referência Geocêntrico Inercial – SRI
6. Sistema de Referência Geocêntrico – SRG
7. Sistema de Referência do *Datum* – SRD

Além desses, há outros dois importantes sistemas de referência, um geodésico, ligado a um *datum* e apresentando coordenadas angulares (longitude e latitude) e outro retangular plano, relativo à projeção cartográfica selecionada para o produto imagem. O sistema de projeção também depende do *datum* escolhido.

8. Sistema Espacial Geodésico – SEG
9. Sistema Plano de Projeção – SPP

Sistema de Referência das Bandas Espectrais – SRB

O sistema de referência das bandas espectrais (SRB) é o único que varia de banda para banda. Ele posiciona os detetores de cada banda espectral em relação ao plano focal do sensor.

Dessa forma, ele consegue compensar os deslocamentos entre detetores e entre bandas espectrais.

Sistema de Referência do Sensor – SRS

O sistema de referência do sensor (SRS) é fixo ao satélite, e tem como referência o plano focal do instrumento.

- Sistema dextrógiro: $(O, X, Y, Z)_{SRS}$
- Origem do sistema (O): centro de massa do satélite.

Cada sensor tem o seu próprio sistema de referência, ou seja, um satélite com múltiplos sensores (ex.: CBERS-2 – CCD, IRMSS e WFI) apresenta múltiplos sistemas de referência do sensor.

Sistema de Referência da Plataforma – SRP

O sistema de referência da plataforma (SRP) é fixo ao satélite, e difere do SRS por um conjunto de parâmetros denominados ângulos de *boresight*. Estes parâmetros estão incluídos no arquivo de calibração geométrica do sensor. Eles só variam ao longo da vida útil do satélite no caso de haver alguma perturbação grave na plataforma.

Estes ângulos são definidos no projeto do satélite e medidos durante a fase de integração e testes do mesmo. Possíveis variações nesses ângulos são detectadas por meio da análise sistemática da qualidade geométrica das imagens. Caso os ângulos de *boresight* sejam nulos, os sistemas SRP e SRS são coincidentes (figura A.1).

- Sistema dextrógiro: $(O, X, Y, Z)_{SRP}$
- Origem do sistema (O): centro de massa do satélite.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SRP} = M_{Bor} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SRS} \quad (A.1)$$

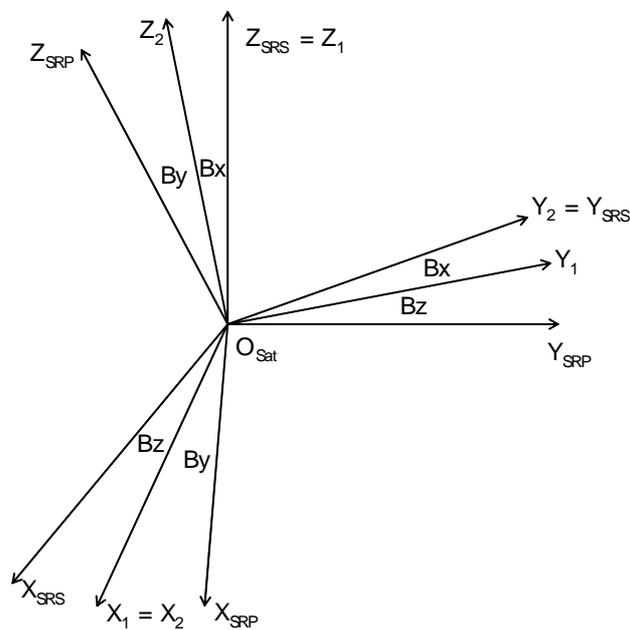


FIGURA A.1 – Relação entre os sistemas SRS e SRP.

Sistema de Referência da Órbita – SRO

O sistema de referência da órbita (SRO) é definido pelas efemérides (posição e velocidade) do mesmo. Ele leva em conta a órbita descrita pelo satélite, mas não os graus de liberdade de girar em relação à órbita (atitude). O plano orbital define o plano XOZ (figura A.2).

- Sistema dextrógiro: $(O, X, Y, Z)_{SRO}$
- Origem do sistema (O): centro de massa do satélite.

- Eixo OZ: passa pelo centro da Terra, com sentido do satélite para a Terra (contido no plano orbital).
- Eixo OY: perpendicular ao eixo OZ e ao vetor velocidade do satélite (perpendicular ao plano orbital), com o sentido igual ao do vetor resultante do produto vetorial do versor do eixo OZ e do vetor velocidade do satélite.
- Eixo OX: completa o triedro direto (contido no plano orbital). Faz um ângulo agudo com o vetor velocidade do satélite.

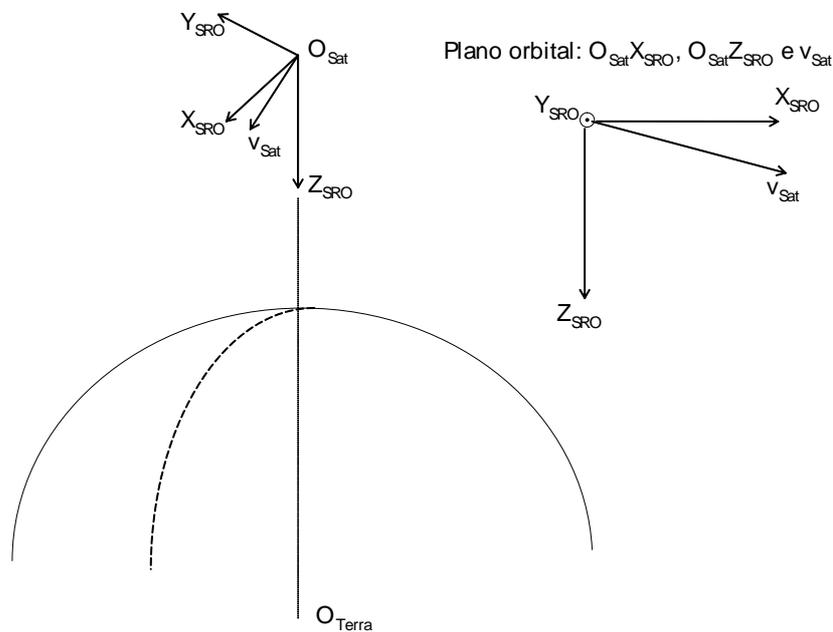


FIGURA A.2 – Sistema de Referência da Órbita (SRO).

O sistema SRO difere do SRP justamente pelos ângulos de atitude (rolamento – *roll*, arfagem – *pitch* e guinada – *yaw*), medidos pelo sistema de controle de atitude e órbita.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SRP} = M_{Ati} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SRO} \quad (A.2)$$

A matriz de atitude (M_{Ati}) é uma matriz de rotação resultante do produto de três matrizes de rotação, uma para cada componente de atitude. A ordem do produto varia de satélite para satélite (figura A.3).

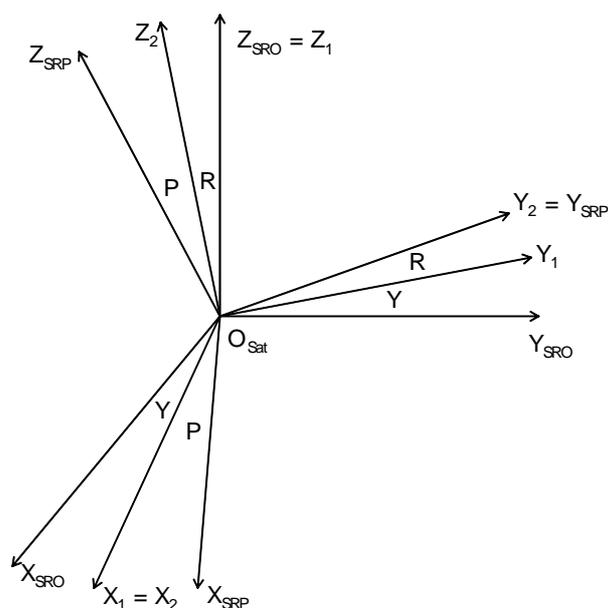


FIGURA A.3 – Relação entre os sistemas SRP e SRO.

Sistema de Referência Geocêntrico Inercial– SRI

O sistema de referência geocêntrico inercial (SRI) é um sistema fixo ao centro da Terra, referente a um determinado *datum*. Ele não sofre os efeitos de rotação da Terra. Os dados de efemérides transmitidos pelos satélites ou processados e tornados disponíveis via arquivos TLE (*Two Line Elements*) estão referenciados a este sistema.

O centro do sistema é o centro da Terra; o eixo OZ aponta para o Pólo Norte; o plano equatorial é perpendicular ao eixo OZ e contém o centro da Terra; e o eixo OX aponta para o meridiano origem, sempre referente a uma determinada e fixa data.

- Sistema dextrógiro: $(O, X, Y, Z)_{SRI}$
- Origem do sistema (O): centro de massa da Terra.

$$r'_{Sat} = r_{Sat} / \sqrt{X_{Sat}^2 + Y_{Sat}^2 + Z_{Sat}^2} \quad (A.5)$$

$$[0 \ 0 \ 1]_{SRO}^T \Leftrightarrow -r'_{Sat,SRG} \quad (A.6)$$

$$v_{Sat} = [Vx_{Sat} \ Vy_{Sat} \ Vz_{Sat}]^T \quad (A.7)$$

$$v'_{Sat} = v_{Sat} / \sqrt{Vx_{Sat}^2 + Vy_{Sat}^2 + Vz_{Sat}^2} \quad (A.8)$$

$$[0 \ 1 \ 0]_{SRO}^T \Leftrightarrow -r'_{Sat,SRG} \wedge v'_{Sat,SRG} \quad (A.9)$$

$$[1 \ 0 \ 0]_{SRO}^T \Leftrightarrow (r'_{Sat,SRG} \wedge v'_{Sat,SRG}) \wedge r'_{Sat,SRG} \quad (A.10)$$

$$M_{Eph} = [(r'_{Sat} \wedge v'_{Sat}) \wedge r'_{Sat} \quad -r'_{Sat} \wedge v'_{Sat} \quad -r'_{Sat}] \quad (A.11)$$

Sistema de Referência Geocêntrico – SRG

O sistema de referência geocêntrico (SRG) é o sistema definido para servir de base a uma representação global da superfície terrestre.

O sistema adotado é o sistema WGS-84 (*World Geodetic System, version 1984*). O centro do sistema é o centro da Terra; o eixo OZ aponta para o Pólo Norte; o plano equatorial é perpendicular ao eixo OZ e contém o centro da Terra; e o eixo OX aponta para o meridiano origem (figura A.5).

- Sistema dextrógiro: (O, X, Y, Z)_{SRG}
- Origem do sistema (O): centro de massa da Terra.
- Eixo OZ: aponta para o Pólo Norte CTP, conforme definido pelo BIH1984.
- Eixo OX: perpendicular ao eixo OZ, aponta para o meridiano origem (longitude = 0°), conforme definido pelo BIH1984 (contido no plano equatorial).

- Eixo OY: completa o triedro direto (contido no plano equatorial).

O sistema de referência geocêntrico pode ser tratado também como sistema WGS-84 $(O, X, Y, Z)_{\text{WGS-84}}$.

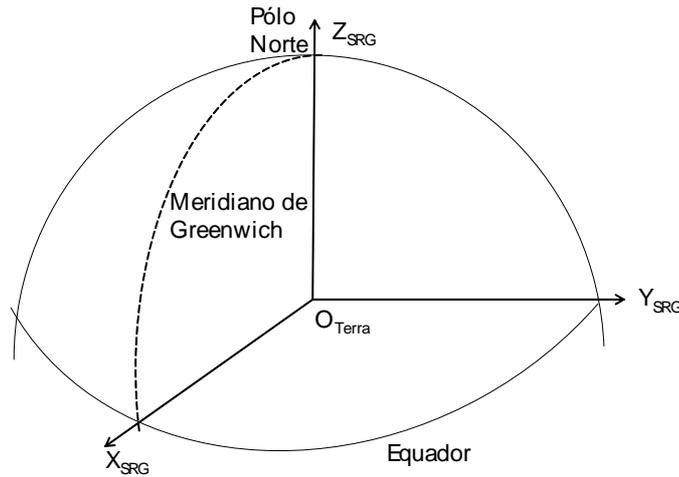


FIGURA A.5 – Sistema de Referência Geocêntrico (SRG).

O sistema SRG se relaciona com o sistema SRI por meio de uma simples rotação, função do tempo sideral entre a data relativa ao dado de efemérides e a data fixa relativa ao SRI.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{SRG}} = M_{\text{Rot-TS}} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{SRI}} \quad (\text{A.12})$$

Sistema de Referência do Datum – SRD

O sistema de referência do datum (SRD) é definido pela superfície de representação da Terra selecionada pelo usuário. Esta superfície é um elipsóide de revolução cujo centro

pode ou não coincidir com o centro da Terra, e cujos eixos podem ou não ser paralelos aos do SRG.

Existem diversos *data*, definidos para melhor se adaptarem ao geóide numa dada região, geralmente um continente ou um país.

- Sistema dextrógiro: $(O, X, Y, Z)_{\text{Datum}}$
- Origem do sistema (O): centro do elipsóide.
- Eixo OZ: eixo de revolução do elipsóide (próximo ao eixo polar).
- Eixo OX: perpendicular ao eixo OZ, aponta para o meridiano origem (próximo ao meridiano de *Greenwich*).
- Eixo OY: completa o triedro direto (contido no plano equatorial).

O SRD se relaciona com o SRG por meio de uma rotação e uma translação. Quando os eixos do elipsóide são paralelos aos do SRG, os sistemas diferem apenas por uma translação (figura A.6).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SRD} = M_{Rot-Dat} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SRG} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}_{Dat} \quad (\text{A.13})$$

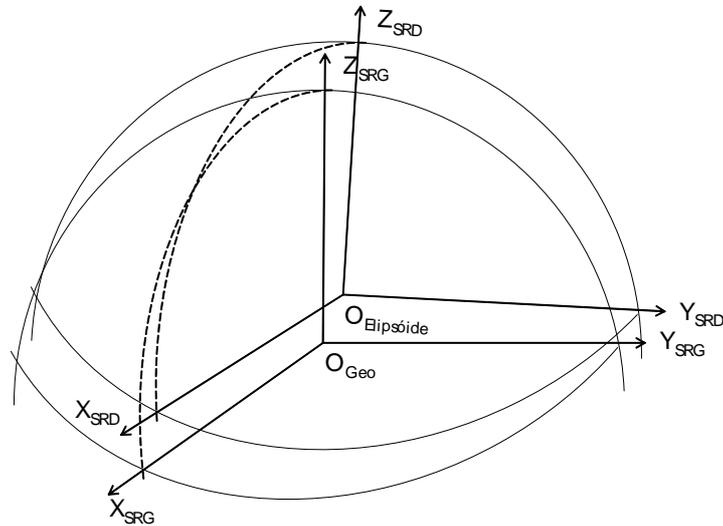


FIGURA A.6 – Relação entre os sistemas SRG e SRD.

Sistema Espacial Geodésico – SEG

O sistema espacial geodésico (SRG) está diretamente relacionado ao SRD, pois ambos estão ligados a um mesmo *datum*. Este sistema apresenta coordenadas angulares. Uma delas mede o ângulo entre o plano meridiano origem (plano XOZ do SRD) e o plano meridiano que contém o ponto P em questão (plano ZOP), denominada longitude (λ). A outra coordenada angular mede o ângulo entre um eixo normal ao elipsóide que passa pelo ponto P e o plano equatorial (plano XOY), denominada latitude (ϕ) ou latitude geodésica (ϕ_d). Completa o sistema de coordenadas a altitude (H) que mede a distância do ponto P à superfície do elipsóide, também conhecida como altitude geométrica ou elipsoidal (H_g).

O ângulo entre o eixo que vai do centro do elipsóide ao ponto P e o plano equatorial é denominado de latitude geográfica ou geocêntrica (ϕ_g). A distância entre o ponto P e a superfície do geóide é denominada altitude ortométrica ou geoidal (H_o).

- Sistema angular espacial: $(O, \lambda, \phi, H)_{SEG}$
- Origem do sistema (O): centro do elipsóide.
- Plano origem XOZ: eixo de revolução e o meridiano origem.
- Plano equatorial XOY: perpendicular ao eixo de revolução.

O SEG se relaciona com o SRD por meio dos parâmetros do elipsóide de revolução: semi-eixo maior (a) e excentricidade (e) (figura A.7).

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \phi}} \quad (A.14)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SRD} = \begin{bmatrix} (N + H) \cdot \cos \phi \cdot \cos \lambda \\ (N + H) \cdot \cos \phi \cdot \sin \lambda \\ [N \cdot (1 - e^2) + H] \cdot \sin \phi \end{bmatrix} \quad (A.15)$$

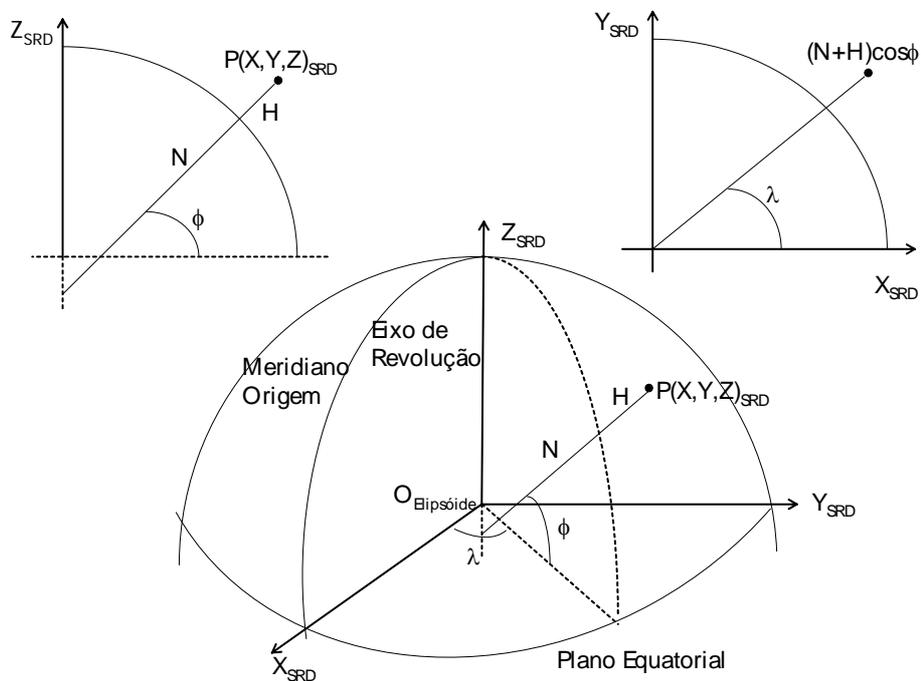


FIGURA A.7 – Sistema Espacial Geodésico (SEG).

Sistema Plano de Projeção – SPP

O sistema plano de projeção (SPP) está diretamente relacionado ao SEG, e ambos, assim como o SRD, estão ligados a um mesmo *datum*. Este sistema apresenta coordenadas plano-retangulares.

A altitude de um ponto não é considerada na relação entre os sistemas SPP e SEG.

Existem diversas projeções cartográficas, cada uma com sua função bi-dimensional de transformação. Essas transformações levam em consideração parâmetros do *datum* das coordenadas geodésicas, principalmente os que definem a forma do elipsóide.

As coordenadas plano-retangulares são representadas pelas letras E e N. A coordenada E representa a distância medida em relação a um eixo na direção sul-norte. Ela cresce no sentido de oeste para leste. A coordenada N representa a distância medida em relação a um eixo na direção oeste-leste. Ela cresce no sentido de sul para norte. Nem sempre a origem deste sistema apresenta coordenadas nulas. Este procedimento evita coordenadas negativas.

- Sistema retangular plano: (O, E, N)_{SPP}
- Origem do sistema (O): intersecção entre os eixos OE e ON.
- Eixo OE: paralelo origem, geralmente o equador.
- Eixo ON: meridiano origem.

$$E = \mathfrak{F}_E[(\lambda, \phi)_{SEG}] \quad (\text{A.16})$$

$$N = \mathfrak{F}_N[(\lambda, \phi)_{SEG}] \quad (\text{A.17})$$

APÊNDICE B

PLANO-IMAGEM

Cada nível de processamento tem um plano-imagem associado. Este apêndice apresenta não só a descrição de cada plano-imagem, como também a relação entre eles.

Plano-Imagem Nível 0

O plano-imagem nível 0 está associado à imagem em seu estado bruto. Conforme visto no Capítulo 3 (item 3.1.1), os *pixels* estão armazenados na quantidade e na seqüência em que foram transmitidos.

Há um plano-imagem nível 0 para cada banda espectral, respeitando-se os deslocamentos entre bandas, entre detetores e a sobreposição de barras de detetores.

As coordenadas são representadas pela coluna (X) e linha (Y), em que o *pixel* se encontra. O centro de cada *pixel* apresenta coordenadas inteiras e com sentido de crescimento de oeste para leste (X) e de norte para sul (Y), conforme Figura B.1. Esta convenção é empregada em todos os demais níveis.

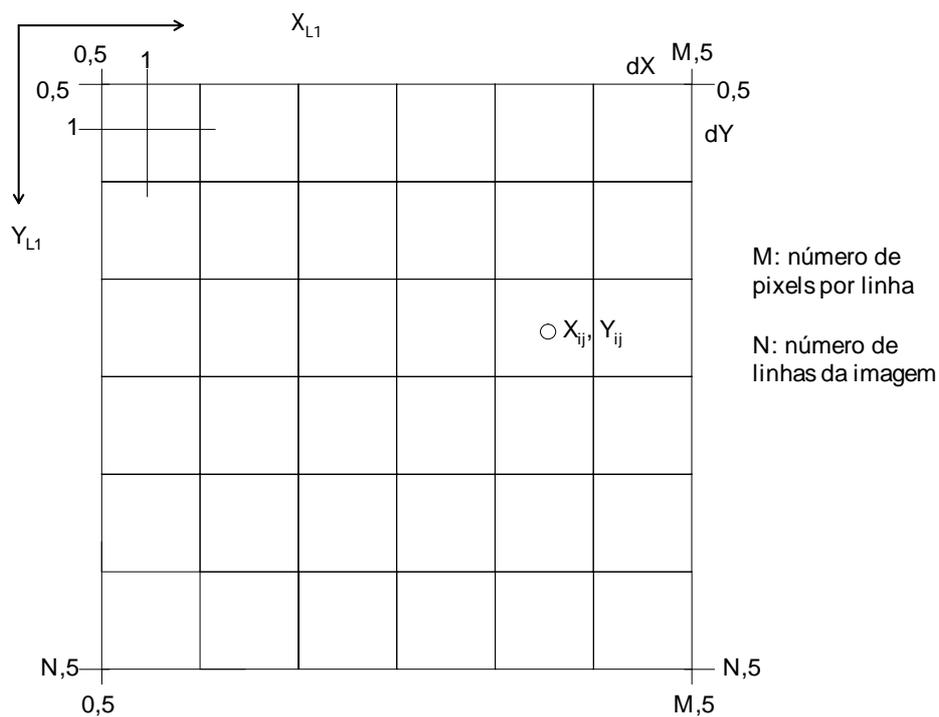


FIGURA B.1 – Plano-Imagem Nível 0.

Plano-Imagem Nível 1

O plano-imagem nível 1 está associado à imagem com correção radiométrica. Conforme visto no Capítulo 3 (item 3.1.2), os *pixels* estão armazenados após a compensação do deslocamento entre bandas, detetores e a integração dos *pixels* das áreas de sobreposição.

Há um único plano-imagem nível 1, comum a todas as bandas espectrais.

A relação entre os dois planos se dá por meio de translações que são função da banda espectral e do detetor.

$$(X, Y)_{N1} = (X, Y)_{N0} + (\Delta X, \Delta Y)_{B, D_j} \quad (B.1)$$

Plano-Imagem Nível 2

O plano-imagem nível 2 está associado à imagem com correção geométrica de sistema. Conforme visto no Capítulo 3 (item 3.1.3), os *pixels* estão georreferenciados, sendo possível a associação direta entre coordenadas de imagem e coordenadas planas de projeção (figura B.2).

Há um único plano-imagem nível 2, comum a todas as bandas espectrais.

$$(E, N)_{N_2} = ((X - 1).dX, (1 - Y).dY)_{N_2} + (E_0, N_0) \quad (\text{B.2})$$

A relação entre os planos de níveis 1 e 2 se dá por meio do modelo de mapeamento direto descrito no Capítulo 3 (item 3.2.1).

$$(X, Y)_{N_2} = \mathfrak{S}_{N_2}(X, Y)_{N_1} \quad (\text{B.3})$$

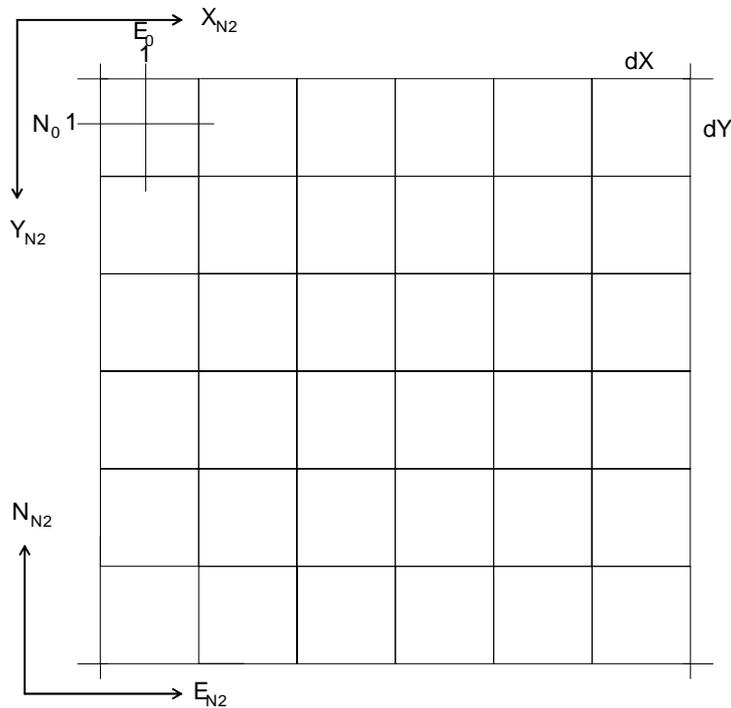


FIGURA B.2 – Plano-Imagem Nível 2.

Plano-Imagem Nível 3

O plano-imagem nível 3 está associado à imagem com correção geométrica de sistema, refinada por pontos de controle. Conforme visto no Capítulo 3 (item 3.1.4), os *pixels* estão georreferenciados, sendo possível a associação direta entre coordenadas de imagem e coordenadas planas de projeção, de forma idêntica a do nível 2.

Há um único plano-imagem nível 3, comum a todas as bandas espectrais.

A relação entre os planos de níveis 2 e 3 se dá por meio do modelo de ajustamento entre as coordenadas dos pontos de controle obtidos pelo modelo relativo ao nível 2 e as obtidas externamente, conforme descrito no Capítulo 3 (item 3.2.2).

$$(E, N)_{N3} = T_{N3}(E, N)_{N2} \quad (\text{B.4})$$

Plano-Imagem Nível 4

O plano-imagem nível 4 está associado à imagem ortorretificada. Conforme visto no Capítulo 3 (item 3.1.5), os *pixels* estão georreferenciados, sendo possível a associação direta entre coordenadas de imagem e coordenadas planas de projeção, de forma idêntica as dos níveis 2 e 3.

Há um único plano-imagem nível 4, comum a todas as bandas espectrais.

A relação entre os planos de níveis 3 e 4 se dá por meio do modelo de ortorretificação, conforme descrito no Capítulo 3 (item 3.2.4).

APÊNDICE C

CARACTERÍSTICAS DOS SATÉLITES CBERS E SEUS SENSORES

TABELA C.1 – Características dos satélites CBERS.

	CBERS 1 e 2	CBERS 2B	CBERS 3 e 4
Data de lançamento	14 outubro 1999 23 outubro 2003	setembro 2007	2009 e 2011
Órbita	sol-síncrona	sol-síncrona	sol-síncrona
Altura (km)	778	778	778
Inclinação (°)	98,5	98,5	98,5
Excentricidade	$1,1 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$
Período (min)	100,26	100,26	100,26
Horário do nó-descendente	$10:30 \pm 0:05$	$10:30 \pm 0:05$	$10:30 \pm 0:05$
Ciclo (dias)	26	26	26
Órbitas / dia	$14 + 9/26$	$14 + 9/26$	$14 + 9/26$
Órbitas-base	373	373	373
Distância entre órbitas-base (equador - km)	107,4	107,4	107,4
Sensores	CCD IRMSS WFI	CCD HRC WFI	PAN (P e MS) MUX IRS AWFI

TABELA C.1 – Características dos satélites CBERS (continuação).

	CBERS 1 e 2	CBERS 2B	CBERS 3 e 4
Atitude (AOCS)	$\leq 0,15^\circ$ (medida) $\leq 0,001^\circ$ (variação)	$\leq 0,15^\circ$ (medida) $\leq 0,001^\circ$ (variação)	$\leq 0,03^\circ$ (medida) $\leq 0,0001^\circ$ (variação)
Sensor estelar	não	sim	sim
Efemérides	$\leq 250\text{m}$	$\leq 250\text{m}$	$\leq 250\text{m}$
GPS	não	sim	sim

TABELA C.2 – Características dos sensores CCD, IRMSS e WFI.

	CCD	IRMSS	WFI
Satélites	1, 2 e 2B	1 e 2	1, 2 e 2B
Tipo de varredura	eletrônica	mecânica	eletrônica
Distância focal (mm)	520		39,5
FOV ($^\circ$)	8,32	8,80	58,5
Campo de visada (km)	113	120	890
Visada oblíqua	lateral ($\pm 32^\circ$)	não	não
FOV (μrad)	25	100 (termal 200)	330
GSD (m)	20	80 (termal 160)	260
Bandas espectrais (nanômetro)	450 – 520 520 – 590 630 – 690 770 – 890 510 – 730	500 – 900 1.550 – 1.750 2.080 – 2.350 10.400 – 12.500	630 – 690 770 – 890
Bits / pixel	8	8	8

TABELA C.3 – Características dos sensores HRC, PAN-P e PAN-MS.

	HRC	PAN-P	PAN-MS
Satélites	2B	3 e 4	3 e 4
Tipo de varredura	eletrônica	eletrônica	eletrônica
Distância focal (mm)	3.300	1.010	1.010
FOV (°)	2,1	4,4	8,8
Campo de visada (km)	27	60	120
Visada oblíqua	não	não	não
FOV (μrad)	3	6,25	12,5
GSD (m)	2,4	5	10
Bandas espectrais (nanômetro)	500 – 800	520 – 890	510 – 590 630 – 690 770 – 890
Bits / pixel	8	8	8

TABELA C.4 – Características dos sensores MUX, IRS e AWFI.

	MUX	IRS	AWFI
Satélites	3 e 4	3 e 4	3 e 4
Tipo de varredura	eletrônica	mecânica	eletrônica
Distância focal (mm)	520		149,85
FOV (°)	8,32	8,8	58,5
Campo de visada (km)	113	120	890
Visada oblíqua	lateral ($\pm 32^\circ$)	não	não
FOV (μrad)	25	50	80
GSD (m)	20	40	64
Bandas espectrais (nanômetro)	450 – 520 520 – 590 630 – 690 770 – 890	770 – 890 1.550 – 1.750 2.350 – 2.550	450 – 520 510 – 590 630 – 690 770 – 890 1.550 – 1.750
Bits / pixel	10	8	10

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEB. **Programa Nacional de Atividades Espaciais**, Brasília, AEB, 2005.

Alamús, R.; Kornus, W.; Palà, V.; Pérez, F.; Arbiol, R.; Bonet, R.; Costa, J.; Hernández, J.; Marimon, J.; Ortiz, M. A.; Palma, E.; Pla, M.; Racero, S.; Talaya, J. Validation process of the ICC digital camera. In: **ISPRS Resolution Earth Imaging for Geospatial Information Workshop**, 2005, Hannover, Germany. Proceedings p. 89-93.

Almeida, A. M.; Duarte, F. P.; Silva, M. A. O., Machado e Silva; A. J. F. Sistemas de suporte à qualidade de imagens: uma inovação na estação terrena do INPE. In: **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2007, Florianópolis, Santa Catarina.

Baillarin, S.; Bouillon, A.; Bernard, M.; Chikhi, M. Using a three dimensional spatial database to orthorectify automatically remote sensing images. In: **XXXVI ISPRS Workshop on Service and Application of Spatial Data Infrastructure**, 2005, Hangzhou, China. Proceedings p. 89-93.

Baillarin, S.; Gleyzes, J. P., Latry, C.; Vesco, C.; Bouillon, A.; Breton, E.; Cunin, L.; Delvit, J. M. Validation of an automatic image ortho-rectification processing. In: **IEEE Geoscience and Remote Sensing Journal**, 2004, v2, p1398-1401.

CAST. **Interfaces of CBERS and ground image receiving station, Revision D, C-IFS-003**, China, CAST, 1997.

CAST. **HR camera subsystem specification, Revision 1.0**, CBI-HDS-2001-2B, China, CAST, 2005.

CAST. **Preliminary evaluation of CBERS eaw image quality**, CB-TRP-3(C), China, CAST, 2004.

CBERS Technical Team. **CBERS-2B image quality analysis, Revision 1.0, CB-TRP-001-2B**, Brasil, 2005.

CBERS Technical Team. **AOCS subsystem CDR data package, Revision 1.0, CBC-REV-2001-2B**, Brasil, 2005.

CBERS Technical Team. **Procedures for CBERS-2B radiometric and geometric quality assessment and validation, Revision 1.1**, Brasil, 2006.

Chen, L. C.; Teo, T. A.; Rau, J. Y. Optimized patch backpropagation in orthorectification for high resolution satellite images. In: **XX Internation Symposium on Photogrammetry and Remote Sensing**, 2004, Istanbul, Turkey.

Chen, L. C.; Teo, T. A.; Rau, J. Y. Adaptive patch projection for the generation of orthophotos from satellite images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, vol. 71, no. 11, pp. 1321-1327, 2005.

Costa, E. R.; Silva, M. A. O.; Machado e Silva, A. J. F. Orto-retificação: um passo a mais no processamento de imagens CBERS. In: **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2007, Florianópolis, Santa Catarina.

Costa, E. R.; Silva, M. A. O.; Machado e Silva, A. J. F. Uso de pontos de controle e modelo numérico de elevações de terreno na geração de imagens CBERS: níveis 3 e 4 de processamento. In: **II Simpósio Brasileiro de Geomática, V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**, 2007, Presidente Prudente, São Paulo.

D'Alge, J. C. L.; Souza, R. C. M.; Erthal, G. J. Geometric quality assessment of CBERS-2 images. In: **XI Latin American Symposium on Remote Sensing and Spatial Information Systems**, 2004, Santiago, Chile.

Demirel, A.; Bayir, I. One meter and below high resolution satellites in production. In: **ISPRS Resolution Earth Imaging for Geospatial Information Workshop**, 2005, Hannover, Germany.

Dial, G. **RPC Data File Format**. Bolder, CO, USA, Space Imaging, 2000. 5 p.

Dial, G.; Grodecki, J. Ikonos stereo accuracy without ground control points. In: **ASPRS 2003 Annual Conference Proceedings**, 2003, Anchorage, Alaska, USA.

Dowman, I.; Tao, V. An update on the use of rational functions for photogrammetric restitution. **ISPRS Highlights**, vol. 7, no. 3, 2002.

Epiphanyo, J. C. N. CBERS - Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres. In: **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2005, Goiânia, Goiás. Anais p. 3175-3182. ISBN 85-17-00018-8.

Fischel, D. Validation of the Thematic Mapper Radiometric and Geometric Algorithms. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-22 no. 3, 1984.

Gemael, C. **Introdução ao ajustamento de observações**. Curitiba, UFPR, 1994. 320 p.

GeoEye. **Ikonos imagery product guide**. Dulles, VA, USA, GeoEye, 2006. 21 p.

Gianinetto, M.; Scaioni, M. Satellite images geometric correction based on non-parametric algorithms and self extracted GCPs. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Journal**, 2004, v6, pp.3755-3758.

Goddard Space Flight Center. **Landsat to Ground Station Interface Description, Revision 9**, USA, Goddard Space Flight Center, 1986.

Goddard Space Flight Center. **Landsat 7 System Specification, Revision H**, USA, Goddard Space Flight Center, 1996.

Goddard Space Flight Center. **Landsat 7 Image Assessment System Geometric Algorithm Theoretical Basis Document, Revision 3.2**, USA, Goddard Space Flight Center, 1998.

Gonzales, R. C.; Woods, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. 3. ed. São Paulo, Edgard Blücher, 2000. 509 p.

Gruen, A. Potential and limitations of high resolution satellite imagery In: **XXI Asian Conference on Remote Sensing**, 2000, Taipei, Taiwan.

Hanley, H. B.; Yamakawa, T.; Fraser, C. S. Sensor orientation for high-resolution satellite imagery. In: **Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS 2002 Conference Proceedings**, 2002.

Hartley, R. I.; Saxena, T. The cubic rational polynomial camera model. In: **Image Understanding Workshop**, 1997. Proceedings p. 649-653.

Huseby, R. B.; Halck, O. M.; Solberg, R. A model-based approach for geometrical correction of optical satellite images. In: **International Journal of Remote Sensing**, 2005, vol26, n.15, pp3205-3223.

INPE. **CBERS-2 simplified CCD off-nadir imaging angle determination, Revision 1, CT-ITRP-176**, Brasil, INPE, 2004.

INPE. **CBERS-2B satellite to application segment interface specification, Revision 1, C-IFS-003-2B**, Brasil, INPE, 2006.

INPE. **CBERS FM2-WFI in orbit verification report, Revision 1, CBS-ITRP-164**, Brasil, INPE, 2003.

INPE. **Geometric distortion in WFI image, Revision 1, CBS-ITRP-083**, Brasil, INPE, 2000.

INPE. **Relatório de alinhamento do CBERS FM2 TSLC-2003, Revision 1, CB-ITRP-167**, Brasil, INPE, 2003.

Jacobsen, K. Geometric aspects of the handling of space images. In: **Land Satellite Information, Commission 1, ISRPS**, 2002, Italy.

Li, Z. C.; Wang, H.; Liao, S. S. Y. Numerical algorithms for image geometric transformations and applications. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - PartB: Cybernetics**, 2004, v34, no.1, p132-149.

Machado e Silva, A. J. F. **Modelo de Correção Geométrica para Imagens HRV-SPOT**. 221 p. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP, (1988).

Machado e Silva, A. J. F. **Projeto da componente CBERS, CB-PRJ-20000-1-GP, Revisão 1.0**, Brasil, Gisplan Tecnologia da Geoinformação, 2003.

Machado e Silva, A. J. F. **Especificação do sistema CBERS-2, CB-SPC-10000-1-GP, Revisão 1.1**, Brasil, Gisplan Tecnologia da Geoinformação, 2002.

Machado e Silva, A. J. F. **Especificação da componente CBERS, CB-SPC-20000-1-GP, Revisão 1.0**, Brasil, Gisplan Tecnologia da Geoinformação, 2003.

Machado e Silva, A. J. F. **Especificação do módulo de ingestão, CB-SPC-30000-1-GP, Revisão 1.0**, Brasil, Gisplan Tecnologia da Geoinformação, 2003.

Machado e Silva, A. J. F. **Projeto do módulo de ingestão, CB-PRJ-30000-1-GP, Revisão 1.0**, Brasil, Gisplan Tecnologia da Geoinformação, 2003.

Machado e Silva, A. J. F.; Silva, M. V. D.; Santini, D. Mapeamento Topográfico usando Imagens Ikonos. **Infogeo**, v. 27, p. 21-22, 2004.

Machado e Silva, A. J. F. **Projeto da componente CIGNUS, CB-PRJ-40000-1-GP, Revisão 1.1**, Brasil, Gisplan Tecnologia da Geoinformação, 2004.

Machado e Silva, A. J. F. **Projeto do sistema CBERS-2B, CB-PRJ-10000-1-GP, Revisão 1.1**, Brasil, Gisplan Tecnologia da Geoinformação, 2005.

Machado e Silva, A. J. F. **Algoritmos de correções radiométrica e geométrica do Sistema CBERS, CB-ALG-10000-1-GP, Revisão 2.0**, Brasil, Gisplan Tecnologia da Geoinformação, 2006.

Machado e Silva, A. J. F. **Algoritmos de correção de imagens nos níveis 1 e 2 do sistema CBERS-2, CB-ALG-20000-1-GP, Revisão 2.0**, Brasil, Gisplan Tecnologia da Geoinformação, 2006.

Machado e Silva; A. J. F. O uso de polinômios racionais na ortorretificação de imagens de satélite. In: **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2007, Florianópolis, Santa Catarina.

Machado e Silva; A. J. F.; Liporace, F. S.; Santos, M. F. S. CBERS Program: a Reference in the Brazilian Space Program. In: **JACIE2007**, 2007, Virginia, USA.

Machado e Silva; A. J. F.; Santos, M. F. S.; Liporace, F. S. A system for visualization, evaluation, analysis and quality simulation of satellite images. In: **JACIE2007**, 2007, Virginia, USA.

Marcari, E.; Liporace, F. S. Desenvolvimento de um algoritmo otimizado para correção de distorção panorâmica em imagens do sensor MODIS. In: **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2007, Florianópolis, Santa Catarina.

Martin Marietta Astro Space. **Landsat 7 System Program Coordinates System Standard, Revision B**, USA, Martin Marietta Astro Space, 1994.

Mascarenhas, N. D. A.; Velasco, F. R. D. **Processamento Digital de Imagens**. Quarta Escola de Computação, Instituto de Matemática e Estatística, USP, 1984. 320 p.

Medeiros, N. G.; Tommaselli, A. M. G. Modelos de orientação de imagens orbitais baseados em feições retas. In: **II Simpósio Brasileiro de Geomática, V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**, 2007, Presidente Prudente, São Paulo.

Miranda, C. E. T. **Especificação dos arquivos GRALHA do sistema CBERS-2, CB-PRD-20000-1-GP, Revisão 1.2**, Brasil, Gisplan Tecnologia da Geoinformação, 2005.

Mitshita; E. A.; Saraiva, C. C. S.; Machado, A. L. Monorestituição de imagens do satélite de alta resolução Ikonos 2 (Geo) utilizando-se da transformação DLR e modelo digital de terreno. In: **XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2007, Belo Horizonte, Minas Gerais.

Noguchi, M.; Fraser, C. S.; Nakamura, T.; Shimono, T.; Oki, Shiochi. CBERS - Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres. **The Photogrammetric Record**, v. 19 no. 106, p128-137, 2004.

Okida; R.; Luiz, S.; Oliveira, K. G. Avaliação da precisão de orto-imagens Ikonos. In: **XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2003, Belo Horizonte, Minas Gerais.

Passini, R.; Jacobsen, K. Accuracy analysis of digital ortophotos from high resolution imagery. In: **International Symposium on Photogrammetric and Remote Sensing, ISPRS Comission IV, Workgroup 7.**, 2004, Istanbul, Turkey. On-line. Disponível em <<http://www/isprs.org/istanbul2004/comm4/papers/437.pdf>>. Acesso em 13 de outubro de 2006.

Richards, J. A.; Jia, X. **Remote Sensing Digital Image Analysys: na Introduction**. Berlim, Springer-Verlag, 1999. 363 p.

Santos, M. F. S.; Liporace, F. S.; Machado e Silva, A. J. F. MS³: a solution for satellite remote sensing ground station. In: **JACIE2007**, 2007, Virginia, USA.

Santos, P. R. A.; Gaboardi, C.; Oliveira, L. C. Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia. In: **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2005, Goiânia, Goiás. Anais p. 4473-4480. ISBN 85-17-00018-8.

Shin, D.; Lee, T. R.; Kwak, S.; Kim, T. G. The characterization of ground control point distribution patterns for the performance assessment of camera models. In: **ACSR GIS Development**, 1999, USA.

Silva, M. A. O.; Costa, E. R.; Neves, P. E.; Machado e Silva, A. J. F. O uso de pontos de controle no processamento de imagens CBERS. In: **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2007, Florianópolis, Santa Catarina.

Silva, M. A. O.; Costa, E. R.; Neves, P. E.; Machado e Silva, A. J. F. O processamento de imagens de sensoriamento remoto no sistema MS³. In: **II Simpósio Brasileiro de Geomática, V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**, 2007, Presidente Prudente, São Paulo.

Shin, D.; Lee, Y. R.; Kwak, S.; Kim, T. G. The characterization of ground control point distribution patterns for the performance assessment of camera models. In: **Asian Conference on Remote Sensing, Asian Association on Remote Sensing**, 1999.

Steinwand, D.; Wissel, C. **Landsat Thematic Mapper Terrain Corrections in LAS**, USA, USGS EROS Data Center, 1993.

USGS. **Thematic Mapper / Enhanced Thematic Mapper Plus bumper mode scan mirror correction algorithm theoretical basis**, USA, USGS, 2006.

USGS EROS Data Center. **Landsat 7 ETM+ Geometric Calibration Plan**, USA, USGS EROS Data Center, 1996.

Wolniewicz, W.; Ke, L. C. Geometric Modeling of VHRS. In: **International Calibration and Orientation Workshop, Commission 1, ISRPS**, 2006, Castelldefels, Spain.

Wolf, P. R.; Guilani, C. D. **Adjustment computations: statistics and least squares in surveying and GIS**. New York, 1997. 564 p.

Wu, A. M.; Lee, Y. Y. Geometric correction of high resolution image using ground control points. In: **XXII Asian Conference on Remote Sensing**, 2001, Singapore.