



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14792-TDI/1235

**ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS RADIOMÉTRICAS E
GEOMÉTRICAS DOS DADOS CCD/CBERS-2**

Camila Souza dos Anjos

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. José Carlos Neves Epiphanyo e Leila Maria Garcia Fonseca,
aprovada em 04 de outubro de 2006.

INPE
São José dos Campos
2007

Publicado por:

esta página é responsabilidade do SID

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gabinete do Diretor – (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 – CEP 12.245-970

São José dos Campos – SP – Brasil

Tel.: (012) 3945-6911

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**Solicita-se intercâmbio
We ask for exchange**

Publicação Externa – É permitida sua reprodução para interessados.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14792-TDI/1235

**ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS RADIOMÉTRICAS E
GEOMÉTRICAS DOS DADOS CCD/CBERS-2**

Camila Souza dos Anjos

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. José Carlos Neves Epiphanyo e Leila Maria Garcia Fonseca,
aprovada em 04 de outubro de 2006.

INPE
São José dos Campos
2007

528.711.7

Anjos, C. S. dos

Análise de características radiométricas e geométricas dos dados CCD/CBERS-2 / Camila Souza dos Anjos. - São José dos Campos: INPE, 2006.

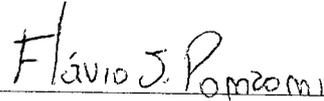
119 p. ; (INPE-14792-TDI/1235)

1. CBERS. 2. Restauração de imagens. 3. Saturação radiométrica. 4. Erro de posicionamento. I. Título.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em

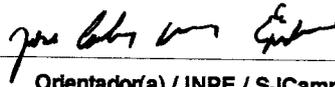
Sensoriamento Remoto

Dr. Flávio Jorge Ponzoni



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. José Carlos Neves Epiphânio



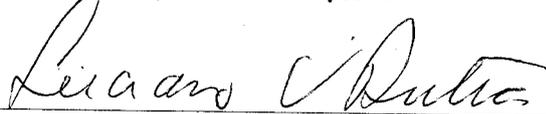
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dra. Leila Maria Garcia Fonseca



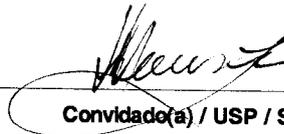
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Luciano Vieira Dutra



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Homero Fonseca Filho



Convidado(a) / USP / São Paulo - SP

Aluno (a): **Camila Souza dos Anjos**

São José dos Campos, 04 de outubro de 2006

*“Feliz do homem que encontrou a sabedoria,
daquele que adquiriu a inteligência,
porque mais vale esse lucro que o da prata,
e o fruto que se obtém é melhor que o fino ouro.
Ela é mais preciosa que as pérolas,
jóia alguma a pode igualar.”*

PROVÉRBIOS 3, 13-15

*A DEUS,
que me proporciona tantas oportunidades
e me capacita para cada uma delas.*

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Epiphânio e Dra. Leila, pela competência e dedicação na orientação deste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Aos pesquisadores e docentes da DSR e DPI/INPE, em especial ao Dr. Antonio Roberto Formaggio, Dr. Gilberto Câmara e Dr. Flávio Ponzoni, capazes de ensinar coisas muito além do Sensoriamento Remoto.

A meus pais Jaime e Margarida por toda dedicação e apoio para que mais esta etapa fosse concluída. Tenho muito orgulho de vocês. Às minhas irmãs e amigas Daniela e Fabrícia que, apesar de longe, estão sempre comigo.

À família LTIDiana pelos conhecimentos compartilhados, pela força nas horas difíceis, pelos momentos de descontração e pela amizade de todos vocês.

Às companheiras de turma e de república Michelle e Natália, sempre muito importantes para mim.

Aos amigos Edu Arraut e Denis Soares, pelas experiências compartilhadas e conselhos tão valiosos.

Aos colegas de trabalho que sempre me incentivaram, em especial: Giovana Mira, Carol Moutinho, Luciana Arantes, Andréia Souza e Rodrigo Costa.

Aos amigos que sempre torceram por mim, especialmente os Pelicanos, os amigos de Campos e de Prudente.

À Gisplan Tecnologia da Geoinformação pela geração de imagens CCD/CBERS-2 pós-processadas, e à Imagem GeoSistemas pela doação de imagens SPOT.

À FCT/UNESP, em especial aos docentes do departamento de Cartografia que ministram um curso de qualidade e preparam seus alunos para grandes desafios.

Ao CNPq, à CAPES e à CONAB pelo auxílio financeiro, cada uma ao seu tempo, claro!

Um agradecimento especial às pessoas que doaram um pouco do seu tempo para que este trabalho fosse concluído: Julio DÁlge, Antonio Machado e Silva, Dr. Hélio Kuga, Dr. Camilo Renó, Dr. Gilberto Câmara, Dr. Flávio Ponzoni, Capitão Denis Soares, Dr. Kamel Bensebaa, João Paulo Papa, Silvia Leonardi, Beth Goltz, Bráulio de Albuquerque, Jonh Maurício, Daniela Brandão, Bete Moraes, Etoe Marcari, Jéferson

Arcanjo, Marcus Fucker, Carol Moutinho, Érica Gouvêa, Giovana Mira, Natalia Crusco e Michelle Picoli.

RESUMO

A união do Brasil com a China para o desenvolvimento de satélites proporcionou ao país ingressar no seleto grupo de países detentores da tecnologia de imageamento por sensoriamento remoto. Em 1999 e 2003 foram lançados os satélites China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS) 1 e 2, respectivamente. Estão ainda previstos o lançamento dos satélites CBERS-2B (2007), CBERS-3 (2009) e CBERS-4 (2011). Hoje, são distribuídas gratuitamente mais de 10.000 cenas CBERS por mês, sendo a maior parte delas imagens do sensor CCD. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar algumas características radiométricas e geométricas que têm impacto na qualidade das imagens do sensor CCD/CBERS-2: o efeito da saturação, o efeito de borramento e erro de posicionamento. O efeito da saturação na banda 4 do sensor é analisado e uma metodologia para sua correção parcial, baseada na técnica de regressão linear, é proposta. A avaliação de filtros de restauração aplicados em imagens CCD/CBERS-2 para reduzir o efeito de borramento é realizada. Por fim, a acurácia posicional das imagens CCD é analisada nos períodos de mudança de controle do satélite pela China e Brasil.

ANALYSIS OF RADIOMETRIC AND GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF CCD/CBERS-2 DATA

ABSTRACT

The cooperation between Brazil and China for the development of satellites has lead Brazil the right to access the distinct group of countries that has the know-how of the remote sensing technology. The China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS) 1 and 2 satellites were launched in 1999 and 2003, respectively. CBERS-2B (2007), CBERS-3 (2009) and CBERS-4 (2011) satellites are to be launched foreseen. Nowadays, there is free distribution of more than 10.000 CBERS scenes per month and the CCD sensor is the most downloaded product. Thus, the aim of this work is to analyze some radiometric and geometric characteristics that influence in the quality of the CCD/CBERS-2 images: the saturation effect, the blurring effect and the positioning error. The saturation effect in band 4 of the CCD sensor was analyzed and a methodology for its partial correction, based on the linear regression approach, was proposed. It was evaluated the use of restoration filters to reduce the blurring effect in CCD/CBERS-2 images. Finally, the positional accuracy of CCD images was analyzed during the periods when the satellite control was change between China and Brazil.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
CAPÍTULO 1	25
INTRODUÇÃO	25
1.1 Objetivos	27
CAPÍTULO 2	29
RADIOMETRIA E GEOMETRIA DE IMAGENS	29
2.1 Qualidade radiométrica	30
2.2 Qualidade geométrica.....	34
CAPÍTULO 3	37
PROGRAMA CBERS	37
3.1 CBERS-1 e 2	38
3.2 CBERS-2B	39
3.3 CBERS-3 e 4	40
3.4 Câmera CCD/CBERS-2	41
3.5 Importância e Aplicações	43
CAPÍTULO 4	45
SATURAÇÃO RADIOMÉTRICA DA BANDA 4 – CCD/CBERS-2	45
4.1 Análise espaço-temporal da saturação	47
4.2 Reparação do efeito da saturação	50
4.2.1 Seleção e pré-processamento das imagens	50
4.2.2 Identificação do problema saturação.....	52
4.2.3 Reparação do fenômeno da saturação	61
CAPÍTULO 5	69
RESTAURAÇÃO DE IMAGENS CCD/CBERS-2	69
5.1 Restauração e análise das imagens restauradas	70
5.2 Análise numérica dos dados	74
CAPÍTULO 6	89
ANÁLISE GEOMÉTRICA DE IMAGENS CCD/CBERS-2	89
6.1 Análise Posicional das imagens CCD/CBERS-2	93
6.1.1 Primeira Mudança de Controle	95
6.1.2 Segunda Mudança de Controle	96
6.1.3 Terceira Mudança de Controle.....	100
6.1.4 Quarta Mudança de Controle	104
6.1.5 Análise Posicional.....	107

CAPÍTULO 7.....	113
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

LISTA DE FIGURAS

2.1 – Definição de IFOV e EIFOV.	32
2.2 – Acurácia Posicional CCD/CBERS-2.	35
3.1 – Arranjo de detectores CCD/CBERS-2.	41
4.1 – Histograma do mesmo alvo no mesmo intervalo de comprimento de onda (infravermelho próximo) obtidos por imagens adquiridas por diferentes sensores: (a) TM/Landsat-5, (b) HRV/SPOT-3 e (c) CCD/CBERS-2.	46
4.2 - Análise espaço-temporal do fenômeno de saturação no verão 2004/2005.	49
4.3 - Análise espaço-temporal do fenômeno de saturação no verão 2005/2006.	49
4.4 - Imagem CCD/CBERS-2 (156/124) – 14/02/2005.	51
Composição 2(B)3(G)4(R).	51
4.5 - Imagem CCD/CBERS-2 (163/125) – 19/02/2005.	51
Composição 2(B)3(G)4(R).	51
4.6 - Imagem CCD/CBERS-2 (155/113) – 27/12/04.	52
Composição 2(B)3(G)4(R).	52
4.7 – Histogramas das Bandas 2 (a), 3 (b) e 4(c) da imagem CCD/CBERS-2 (156/124) de 14/02/2005.	53
4.8 – Histogramas da Banda 2 (a), 3 (b) e 4 (c) após correção atmosférica.	54
4.9 – Histogramas das Bandas 1 (a), 2 (b), 3(c) e 4 (d) da imagem CCD/CBERS-2 (163/125) de 19/02/2005.	55
4.10 – Histogramas das Bandas 1 (a), 2 (b), 3(c) e 4 (d) após correção atmosférica.	56
4.11 – Histogramas das Bandas 1 (a), 2 (b), 3(c) e 4 (d) da imagem CCD/CBERS-2 (155/113) de 27/12/2004.	57
4.12 – Histogramas das Bandas 1 (a), 2 (b), 3(c) e 4 (d) da imagem CCD/CBERS-2 (155/113) de 27/12/2004 após a correção atmosférica.	58
4.13 – Perfil horizontal da linha 3873 da imagem 156/124 de 14/02/2005. ND (a) e Reflectância de superfície (b).	59
4.14 – Perfil horizontal da linha 5370 da imagem 163/125 de 19/02/2005. ND (a) e Reflectância de superfície (b).	59
4.15 – Perfil horizontal da linha 5112 da imagem 155/113 de 27/12/2005. ND (a) e Reflectância de superfície (b).	60
4.16 — Diagramas de espalhamento da imagem 156/124 de 14/02/2005: (a)B2 x B4, (b) B3 x B4 e (c) B2 x B3.	61
4.17 — Diagramas de espalhamento da imagem 163/125 de 19/02/2005: (a)B2 x B4, (b) B3 x B4 e (c) B2 x B3.	62
4.18 – Imagem Original (a). Imagem Corrigida (b).	66
4.19 – Detalhe da imagem saturada (a). Detalhe da imagem corrigida (b).	66
4.20 - Detalhe da imagem saturada (a). Detalhe da imagem corrigida (b).	67
4.21 – Detalhe da imagem saturada (a). Detalhe da imagem corrigida – regressão com B3 (b). Detalhe da imagem corrigida regressão com B1, B2 e B3 (c).	67
5.1 – Imagens do Rio de Janeiro: (a) CBERS R4G3B2 de 17/10/2005, (b) SPOT R3G2B1 de 21/10/2005.	72

5.2 – Imagens de Goiânia: (a) CBERS R4G3B2 de 24/08/2005, (b) SPOT R3G2B1 de 04/09/2005.....	72
5.3 – Imagens de Batatais: (a) CBERS R4G3B2 de 24/08/2005, (b) SPOT R3G2B1 de 10/09/2005.....	73
5.4 – Variância das imagens referentes à cena do Rio de Janeiro.....	75
5.5 - Variância das imagens referentes à cena de Goiânia.....	75
5.6 - Variância das imagens referentes à cena de Batatais.....	76
5.7 – Porcentagem do IQI Banda 2 CCD/CBERS-2.....	79
5.8 – Porcentagem de melhora Banda 3 CCD/CBERS-2.....	79
5.9 – Porcentagem de melhora Banda 4 CCD/CBERS-2.....	80
5.10 - Coeficiente de auto-correlação cena do Rio de Janeiro.....	81
5.11 – Coeficiente de Auto-correlação cena de Goiânia.....	81
5.12 – Coeficiente de Auto-correlação cena de Batatais.....	82
5.13 – Espectro de Fourier para as imagens (a) SPOT original, (b) CBERS original, (c) Rest1, (d) Rest2, (E) Rest3 – Rio de Janeiro.....	83
5.14 – Espectro de Fourier para as imagens (a) SPOT original, (b) CBERS original, (c) Rest1, (d) Rest2, (E) Rest3 – Goiânia.....	84
5.15 – Espectro de Fourier para as imagens (a) SPOT original, (b) CBERS original, (c) Rest1, (d) Rest2, (E) Rest3 – Batatais.....	85
5.16 – Cena CCD/CBERS-2 (158/119) de 24/08/2005, (a) original, (b) Rest2 e (c) Rest3.....	81
6.1 - Coordenadas de rolamento, arfagem e guinada.....	92
6.2 – Valores de Roll nas datas próximas a 2ª mudança de controle.....	93
6.3 – Diferença entre as imagens referência e a as imagens originais – 2ª Mudança de Controle.....	108
6.4 – Diferença entre as imagens referência e a as imagens pós-processadas - 2ª Mudança de Controle.....	109
6.5 - Diferença entre as imagens referência e a as imagens originais - 3ª Mudança de Controle.....	108
6.6 – Diferença entre as imagens referência e a as imagens pós-processadas –3ª Mudança de Controle.....	110
6.7 - Diferença entre as imagens referência e a as imagens originais – 4ª Mudança de Controle.....	109
6.8 – Diferença entre as imagens referência e a as imagens pós-processadas - 4ª Mudança de Controle.....	110
6.9 – Acurácia Posicional para as imagens originais e pós-processadas.....	112

LISTA DE TABELAS

2.1 Valores de EIFOV para os sensores CCD/CBERS-2, TM-5/LANDSAT e HRV/SPOT-3.....	33
3.1 – Características dos sensores a bordo dos satélites CBERS-1 e 2.....	39
3.2 – Informações CBERS-2B.....	40
3.3 – Características das câmeras do CBERS-3 e 4.....	40
4.1 – Exemplo de saturação na CCD/CBERS-2.....	47
4.2 – Imagens utilizadas na análise espaço-temporal do verão 2004/2005.....	47
4.3– Imagens utilizadas na análise espaço-temporal do verão 2005/2006.....	48
4.4 – Ângulos de Elevação Solar das imagens saturadas (em graus).....	48
4.5 – Ângulos de Elevação Solar das imagens saturadas (em graus).....	48
4.6 – Características das imagens selecionadas.....	52
4.7 - Saturação da banda 4 do CCD/CBERS-2.....	60
4.8– Matriz de correlação.....	64
4.9 – Parâmetros resultantes da regressão.....	65
4.10 – Variabilidade de alvos saturados em bandas que não apresentam saturação.....	68
5.1 – Imagens utilizadas na análise.....	71
5.2 – IQI.....	78
5.3 – ISNR x 10 ⁻³ – Rio de Janeiro.....	86
5.4 – ISNR x 10 ⁻³ – Goiânia.....	86
5.5 – ISNR x 10 ⁻³ - Batatais.....	86
6.1 – Características da órbita do satélite CBERS-2.....	90
6.2 – Diferença entre as coordenadas - 20/03/2005.....	96
6.3 – Erro de Posicionamento - 20/03/2005.....	97
6.4 – Diferença entre as coordenadas - 21/03/2005.....	97
6.5 – Erro de Posicionamento- 21/03/2005.....	97
6.6 – Diferença entre as coordenadas - 22/03/2005.....	97
6.7– Erro de Posicionamento - 22/03/2005.....	98
6.8 – Diferença entre as coordenadas - 23/03/2005.....	98
6.9 – Erro de Posicionamento - 23/03/2005.....	98
6.10 – Diferença entre as coordenadas - 24/03/2005.....	98
6.11 – Erro de Posicionamento - 24/03/2005.....	99
6.12– Diferença entre as coordenadas - 25/03/2005.....	99
6.13– Erro de Posicionamento - 25/03/2005.....	99
6.14 – Diferença entre as coordenadas - 26/03/2005.....	100
6.15 - Erro de Posicionamento - 26/03/2005.....	100
6.16 – Diferença entre as coordenadas - 20/10/2005.....	101
6.17 - Erro de Posicionamento - 20/10/2005.....	101
6.18 – Diferença entre as coordenadas - 21/10/2005.....	101
6.19 – Erro de Posicionamento - 21/10/2005.....	101
6.20 – Diferença entre as coordenadas - 22/10/2005.....	102
6.21 - Erro de Posicionamento - 22/10/2005.....	102
6.22 – Diferença entre as coordenadas - 23/10/2005.....	102

6.23 - Erro de Posicionamento - 23/10/2005.....	102
6.24 – Diferença entre as coordenadas- 24/10/2005	103
6.25 - Erro de Posicionamento - 24/10/2005.....	103
6.26 – Diferença entre as coordenadas - 25/10/2005	103
6.27 - Erro de Posicionamento - 25/10/2005.....	103
6.28 – Diferença entre as coordenadas - 26/10/2005	104
6.29 - Erro de Posicionamento - 26/10/2005.....	104
6.30 – Diferença entre as coordenadas - 21/04/2006	105
6.31 - Erro de Posicionamento - 21/04/2006.....	105
6.32 – Diferença entre as coordenadas - 22/04/2006.	105
6.33 - Erro de Posicionamento - 22/04/2006.....	105
6.34 – Diferença entre as coordenadas - 23/04/2006.	106
6.35 - Erro de Posicionamento - 23/04/2006.....	106
6.36 – Diferença entre as coordenadas - 24/04/2006.	106
6.37 - Erro de Posicionamento - 24/04/2006.....	106
6.38 – Diferença entre as coordenadas - 25/04/2006.	107
6.39 - Erro de Posicionamento - 25/04/2006.....	107

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

B	-	Blue (Azul)
B1	-	Banda do Azul (0,45 - 0,52 μm)
B2	-	Banda do Verde (0,52 - 0,59 μm)
B3	-	Banda do Vermelho (0,63 - 0,69 μm)
B4	-	Banda do Infra-Vermelho Próximo(0,77 - 0,89 μm)
CAPES	-	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBERS	-	China-Brazil Earth Resources Satellite
CCD	-	Câmera Imageadora de Alta Resolução
CEFET	-	Centro Federal de Educação Tecnológica
CNPq	-	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CONAB	-	Companhia Nacional de Abastecimento
DETER	-	Deteção de Desmatamento em Tempo Real
EIFOV	-	Effective Instantaneous Field Of View
ETM+	-	Enhanced Thematic Mapper Plus
FAPESP	-	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FIM	-	Filtro Inverso Modificado
FCT/UNESP	-	Faculdade de Ciências e Tecnologia / Universidade Estadual Paulista
FTP	-	File Transfer Protocol (Protocolo de Transferência de Arquivos)
G	-	Green (Verde)
GO	-	Goiás

GPS	-	Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)
HRC	-	High Resolution CCD Camera
HRV	-	High Resolution Visible
IFOV	-	Instantaneous Field Of View
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMAZON	-	Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia
INCRA	-	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
IQI	-	Image Quality Index (Índice de Qualidade da Imagem)
IRMSS	-	InfraRed Multispectral Scanner (Imageador por Varredura de Média Resolução)
IRSCAM	-	Imageador por Varredura de Média Resolução
ISNR	-	Improvement Signal to Noise Ratio
LAG	-	Intervalo de vizinhança medido em pixels
LIT	-	Laboratório de Integração e Testes
MSS	-	Multi-Spectral Scanner
MTF	-	Modulation Transfer Function (Função de Transferência de Modulação)
MUXCAM	-	Câmera Multi-Espectral
ND	-	Número Digital (Nível de Cinza)
NIR	-	Near InfraRed (Infra-vermelho próximo)
PAN	-	Banda Pancromática (0,51 - 0,73 μm)
PANMUX	-	Câmera PanMux
PB	-	Paraíba
R	-	Red (Vermelho)

REST1	-	Imagem Restaurada 1
REST2	-	Imagem Restaurada 2
REST3	-	Imagem Restaurada 3
RS	-	Rio Grande do Sul
S/N	-	Signal/Noise (Relação Sinal Ruído)
SAD-69	-	South America Datum -1969
SCD	-	Satélite de Coleta de Dados
SP	-	São Paulo
SWIR	-	Short Wavelength InfraRed (Infra-vermelho de ondas curtas)
TIR	-	Termal InfraRed (Infra-vermelho termal)
TM	-	Thematic Mapper
TT&C	-	Telemetry, Tracking and Comand
UTM	-	Universal Transversa de Mercator
WFI	-	Wide Field Imager (Câmera Imageadora de Amplo Campo de Visada)
WFICAM	-	Câmera Imageadora de Amplo Campo de Visada

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A partir de um acordo firmado entre a China e o Brasil em 1988, nasceu o programa CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite) com o objetivo de monitorar a superfície terrestre e coletar dados em diversos campos de aplicações.

O programa CBERS permitiu ao Brasil ingressar no seleto grupo de países detentores da tecnologia de imageamento por sensoriamento remoto orbital, dando ao país autonomia e possibilidade de monitorar sua extensa área sem a dependência de satélites estrangeiros. O avanço na pesquisa espacial, com investimentos em políticas que visem o crescimento econômico e a garantia de soberania, permitem ao país ter um melhor controle de seus recursos ambientais, agrícolas, entre outros.

A distribuição de imagens CBERS para o Brasil tem sido gratuita. Mais de 1500 instituições e 20.000 usuários estão cadastrados e, até junho de 2006, mais de 210.000 cenas CBERS-2 foram distribuídas, numa média superior a 10.000 cenas por mês.

Dois satélites da série CBERS já foram lançados. O primeiro, chamado CBERS-1, operou de outubro de 1999 a agosto de 2003. O segundo, chamado CBERS-2, foi lançado em outubro de 2003 e continua em operação até hoje. Ambos possuem a mesma carga útil imageadora, formada pelos sensores CCD (câmera imageadora de média resolução), WFI (câmera imageadora de amplo campo de visada) e IRMSS (imageador por varredura de média resolução).

Em diversas aplicações da área de sensoriamento remoto é de grande importância a integração de dados orbitais com dados vetoriais, dados GPS (Global Positioning System), mapas, etc. A qualidade dos dados resultantes da integração depende da correção geométrica e radiométrica dos produtos de sensoriamento remoto. Segundo Itten e Meyer (1993), dados orbitais de boa qualidade (corrigidos geométrica e

radiometricamente), são necessários para aplicações que envolvam a integração de dados obtidos por diferentes sensores, diferentes datas, etc.

As técnicas de correção de imagem que fazem parte da etapa chamada de pré-processamento incluem, basicamente, as correções radiométricas (calibração relativa, detectores defeituosos, correção atmosférica, etc.) e geométricas (correção de sistema, registro entre bandas, etc.). A fase de pré-processamento melhora a qualidade da imagem e, portanto, facilita sua interpretação e processamento.

Dada a importância destas correções, este trabalho tem como objetivo analisar algumas características radiométricas e geométricas dos dados CCD/CBERS-2, visando melhorar a qualidade das imagens CCD e assim aumentar a sua gama de aplicações nas diversas áreas do sensoriamento remoto.

1.1 Objetivos

- analisar o problema radiométrico da saturação da banda 4 do sensor CCD/CBERS-2 e realizar procedimentos de reparação do fenômeno para inferir valores para os pixels, cuja informação foi perdida;
- avaliar o impacto da aplicação de filtros de restauração de imagens sobre as imagens CCD/CBERS-2 e identificar parâmetros ideais para a geração de imagens restauradas aos usuários CBERS;
- analisar a qualidade geométrica das imagens CCD/CBERS-2 ao longo da vida útil do sensor, por meio do erro de posicionamento.

CAPÍTULO 2

RADIOMETRIA E GEOMETRIA DE IMAGENS

Dois aspectos devem ser considerados na avaliação da qualidade de uma imagem digital: a radiometria e a geometria.

Radiometria é a medida quantitativa da intensidade de qualquer um dos tipos conhecidos de radiação. A radiometria que mede a intensidade da radiação eletromagnética (fundamental ao sensoriamento remoto) pode ser chamada de radiometria espectral (Meneses, 2001). Por meio da radiometria espectral é possível medir a intensidade de cada alvo nos diferentes comprimentos de onda e ainda explicar como cada um deles irá aparecer nas imagens.

A geometria de imagens trata do posicionamento dos elementos de cena sobre a superfície da Terra, visando determinar e validar o relacionamento entre pontos no terreno e suas posições nas imagens. A avaliação da qualidade geométrica de uma imagem provê importante informação para o estabelecimento do uso das mesmas nas mais diversas formas de aplicações.

Imagens digitais estão sujeitas a várias distorções durante sua aquisição, processamento, compressão, armazenamento, transmissão e reprodução, resultando na degradação da qualidade visual da imagem (Wang et al., 2004). Estas distorções podem ser tanto radiométricas quanto geométricas.

Segundo Almeida e Tommaselli (2003), os fatores que, geralmente, causam a degradação da qualidade de uma imagem digital são:

- Deslocamento do sistema sensor durante a aquisição da imagem, o que causa o chamado arrastamento;
- Deslocamento de um objeto da cena, o que causa um borramento equivalente ao arrastamento;
- Deficiência ou excesso de iluminação;

- Espalhamento atmosférico;
- Aberrações das lentes da câmara, que causam um efeito de borramento;
- Focalização incorreta, que ocorre quando o conjunto de detectores não está corretamente posicionado no plano focal do sistema sensor, que também causa o efeito de borramento na imagem.

As distorções radiométricas resultam em imagens com efeito de borramento, perdas de linhas ou colunas, ruídos aleatórios, etc. Por outro lado, as distorções geométricas fazem com que as imagens apresentem deslocamentos da posição geográfica do centro da cena, deslocamento entre bandas, erro da geometria interna e deslocamentos causados pelo não alinhamento dos arranjos de detectores.

A qualidade da imagem produzida por sensores a bordo de satélites é avaliada em dois períodos: antes e após o lançamento do satélite. Os testes antes do lançamento são realizados em laboratório e consistem em avaliar se as especificações de projeto foram atendidas, e também obter os parâmetros de correção a serem usados na estação de processamento de imagens. Após o lançamento, as imagens são corrigidas usando os parâmetros definidos em laboratório e avaliadas. Durante o tempo de vida operacional do satélite os testes de avaliação devem ser realizados periodicamente e, quando necessário, os parâmetros de correção devem ser atualizados.

2.1 Qualidade radiométrica

Segundo Fonseca et al. (2004), a qualidade radiométrica de uma imagem está diretamente ligada ao desempenho do sensor (equipamento, montagem, conformidade com especificações, etc.). Quanto mais satisfatório for o relacionamento entre a reflectância de um alvo e o nível de cinza de seu pixel referente, melhor será a qualidade radiométrica da imagem.

As imagens orbitais apresentam normalmente algumas distorções radiométricas, que quase sempre são dependentes do sistema sensor. Segundo Mather (1999), tais defeitos quando não-causados pelo imageamento podem ocorrer em razão de erros na

transmissão ou na gravação dos dados, ou ainda na reprodução dos dados em fitas magnéticas ou CD-ROM, por exemplo.

As degradações radiométricas diminuem a precisão da informação, reduzindo assim a utilidade dos dados. Existem várias formas de degradação, que incluem os ruídos radiométricos e distorções inseridas pelo sensor. Os ruídos podem ser classificados como coerentes e aleatórios (Fonseca, 2004). Ruídos coerentes são aqueles que mostram um padrão sistemático, e ruídos aleatórios são aqueles que não têm padrão algum. Ambos os ruídos são particularmente perceptíveis em alvos uniformes escuros, tais como água ou floresta (Masek et al., 2001).

Ruídos coerentes, como linhas ou colunas com os valores de níveis de cinza adulterados ou mesmo com perda total de informação, podem ser chamados de *striping*. Segundo Poros e Peterson (1985), esses ruídos são variações que aparecem a partir da não-calibração de detectores individuais durante o processamento radiométrico sistemático. Ruídos aleatórios, como pixels isolados distribuídos aleatoriamente sobre a imagem, podem ser chamados de *stippling ou salt-pepper*.

O termo resolução espacial caracteriza a capacidade de um sistema imageador em discriminar o nível de detalhes numa imagem digital, ou seja, ele especifica a menor separação (ou distância) entre dois objetos ou feições que um sistema imageador pode distinguir (Bensebaa, 2005). Pode-se falar também em resolução espacial nominal e a resolução espacial efetiva.

A resolução espacial nominal é especificada no projeto do sensor e, geralmente, corresponde à projeção do detector na superfície da terra, definida pelo IFOV (Instantaneous Field of View). O IFOV pode ser definido pela projeção do detector no terreno, e é medido em metros ou graus.

A resolução espacial efetiva leva em consideração as distorções que o sistema sofre durante o processo de imageamento e é definida pelo EIFOV (Effective Instantaneous Field of View). O EIFOV é uma medida de desempenho, particularmente pessimista, em relação à detectabilidade de objetos pequenos e de alto contraste. Por exemplo, uma

imagem do sensor TM com resolução espacial nominal de 30 metros, tem um valor de EIFOV de, aproximadamente, 45 metros. Isto quer dizer que a capacidade de identificar, com boa acuidade, objetos de 30 metros nas imagens TM é reduzida.

O EIFOV pode ser definido como função da frequência para a qual o valor da MTF (Função de Transferência de Modulação) do sensor é igual a 50% de seu valor máximo (Figura 2.1). A Função de Transferência de Modulação é uma função que caracteriza o comportamento do sensor no domínio das frequências espaciais (Fonseca, 2004).

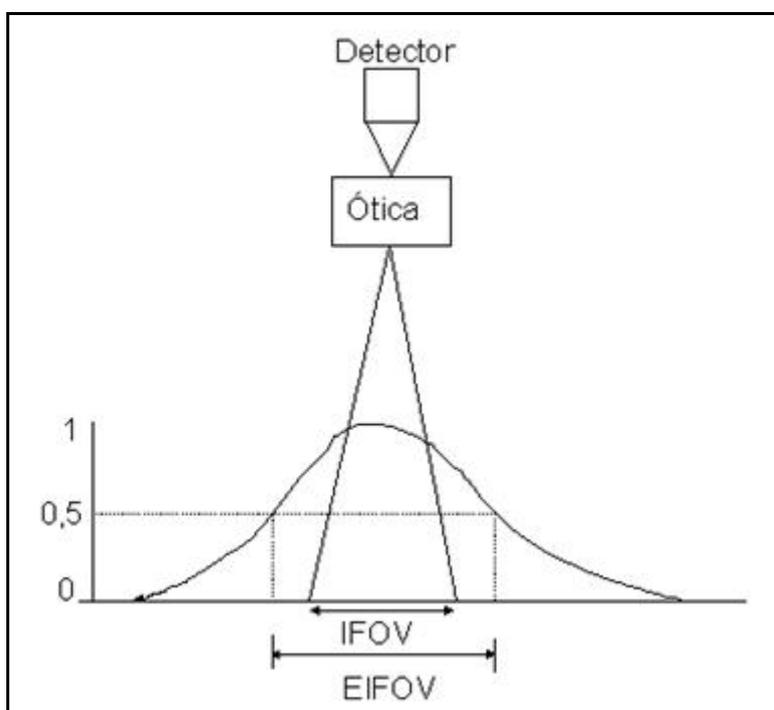


FIGURA 2.1 – Definição de IFOV e EIFOV.

FONTE: Adaptado de Fonseca et al. (2004).

O EIFOV pode ser utilizado para comparar diferentes sistemas sensores de mesma resolução espacial nominal. A Tabela 2.1 apresenta valores de EIFOV para os sistemas CCD/CBERS-2, HRV/SPOT-3 e TM/Landsat-5.

TABELA 2.1 Valores de EIFOV em metros para os sensores CCD/CBERS-2, TM/LANDSAT-5 e HRV/SPOT-3.

Bandas	CBERS Bandas (μm)	CCD/CBERS-2		HRV/SPOT-3		TM/ Landsat-5	
		Cross-track	Along-track	Cross-track	Along-track	Cross-track	Along-track
B1	0,45 – 0,52	61	36	-	-	41,6	45,4
B2	0,52 – 0,59	59	35	26,59	28,1	41,6	45,4
B3	0,63 – 0,69	58	43	28,48	29,95	41,6	45,4
B4	0,77 – 0,89	63	37	33,51	30,93	41,6	45,4
B5	0,51 – 0,73	60	48	-	-	-	-

FONTE: Adaptado de Bensebaa (2004).

Quando a resolução espacial é degradada, as informações de detalhes na imagem são reduzidas, criando um efeito de borramento que é visível, principalmente nas feições lineares, como bordas dos objetos, pistas de aeroportos, ruas, pontes, etc. A degradação da resolução espacial é inserida pelo sensor, e pode ser parcialmente corrigida por meio do processo de restauração de imagens.

Segundo Fonseca et al. (2004), uma análise de qualidade radiométrica deve levar em consideração os seguintes itens:

1. Relação Sinal/Ruído (SNR) – parâmetro que representa a resolução radiométrica da câmera. A relação sinal/ruído mede o grau de ruído na imagem. Se a intensidade do ruído estiver acima de um limiar especificado, o sinal pode ser inutilizado.
2. O desempenho da MTF - Função de Transferência de Modulação (MTF) está relacionado com a resolução espacial do sensor e mede a resposta do sensor em frequência espacial da cena.
3. Calibração Relativa: A calibração relativa permite determinar os parâmetros de ganho e offset de cada detector para corrigir as diferenças nas respostas dos detectores.
4. Calibração Absoluta – A calibração absoluta fornece coeficientes que permitem a conversão dos valores de nível de cinza para dados físicos, como radiância e reflectância.

5. Ruídos – tais como: perda de linha ou coluna na imagem (listras), efeitos como *striping* e *stippling*, saturação dos níveis de cinza, etc.

Neste trabalho a ênfase será dada ao estudo de dois problemas de distorções radiométricas: a saturação e a degradação da resolução espacial.

2.2 Qualidade geométrica

Durante o processo de aquisição de imagens ocorrem distorções sistemáticas que afetam a sua geometria. Isto implica em erros de posicionamento, de forma que não é possível garantir que os pontos possuam no terreno as coordenadas indicadas sobre a imagem.

Segundo Silva (1988), as distorções geométricas podem ser divididas em distorções inerentes à plataforma, ao instrumento e ao modelo da Terra, como a seguir:

- Distorções inerentes à plataforma:
 - Variação de velocidade;
 - Variação de altitude;
 - Variação de atitude.
- Distorções inerentes ao instrumento
 - Deslocamento entre bandas;
 - Deslocamento entre barras de detectores.
- Distorções inerentes ao modelo da Terra:
 - Rotação da Terra;
 - Esfericidade da Terra;
 - Deslocamento devido ao relevo.

Pode-se analisar a qualidade geométrica tanto em relação à geometria externa da imagem quando comparada a um referencial, quanto em relação à geometria interna, por meio do erro interno, erro de escala e variação de escala ao longo de determinadas direções (Silva,1988).

Segundo D'Alge et al. (2004), o processo de avaliação geométrica de imagens deve monitorar as mudanças na posição geográfica do centro da cena, estimar a exatidão do registro entre bandas, e avaliar a acurácia interna e posicional dos produtos distribuídos aos usuários.

A acurácia posicional é o deslocamento médio entre coordenadas medidas sobre a imagem e coordenadas medidas sobre a superfície da Terra. E determina quão longe a imagem corrigida por sistema está de sua posição real (Figura 2.2).



FIGURA 2.2 – Acurácia Posicional CCD/CBERS-2.

Elementos como dados de efemérides e dados de atitude são utilizados em procedimentos de correção geométrica, devido sua fundamental influência na acurácia posicional, que é o parâmetro geométrico analisado no presente trabalho para diferentes órbitas-ponto e diferentes datas durante a vida do sensor CCD/CBERS-2

CAPÍTULO 3

PROGRAMA CBERS

O programa CBERS nasceu de um acordo firmado em 1988 entre o Brasil e a China no setor técnico-científico espacial. Entre suas justificativas estava a necessidade de monitoramento das imensas áreas ambientais e agrícolas em ambos os países. No acordo estava contemplada a construção e o desenvolvimento de dois satélites, os CBERS-1 e 2, que são similares entre si e foram lançados em 1999 e 2003, respectivamente. Devido ao sucesso da missão, os dois países decidiram expandir o acordo e incluir os satélites CBERS-2B, 3 e 4 no programa. Nesta última fase haverá uma ampliação da participação brasileira para 50%, em oposição aos 30% dos satélites CBERS-1, 2 e 2B.

O CBERS-2B tem lançamento previsto para 2007, o CBERS-3 para 2009 e o CBERS-4 para 2011. Segundo o Boletim Agência FAPESP de 06/12/2004, o CBERS-2B será montado, integrado e testado no Brasil.

Os satélites CBERS são divididos em duas partes principais: módulo de carga útil e módulo de serviço. O módulo de carga útil é responsável por receber, amplificar e retransmitir os dados e sinais e é onde estão instalados os instrumentos que justificam a missão, como: câmeras, telescópios, detectores, antenas, amplificadores, experimentos científicos e tecnológicos, entre outros. O módulo de serviço é composto pelos equipamentos responsáveis pelo suprimento de energia, os sistemas de controle de órbita e atitude, as telecomunicações, e demais funções necessárias à operação do satélite.

Segundo Badue (2006), para que essas funções sejam realizadas a plataforma deve proporcionar os seguintes recursos:

- A carga útil deve estar orientada na direção correta;
- A carga útil deve ter sua confiabilidade especificada por um período de tempo;

- Os dados obtidos pela carga útil devem ser enviados a uma estação terrestre para serem analisados;
- A órbita e atitude do satélite devem ser controladas;
- A carga útil deve estar fixa na plataforma sobre a qual foi montada;
- Uma fonte de energia deve estar disponível para permitir a realização das funções programadas.

No ano de 2005 o Programa CBERS foi o maior distribuidor de imagens de satélite do mundo. Entre os fatores que contribuíram para isso estão a distribuição gratuita que é feita de forma eficiente, pois numa média de apenas nove minutos as imagens são disponibilizadas ao usuário por FTP.

3.1 CBERS-1 e 2

Lançado em 14 de outubro de 1999, o satélite CBERS-1 acomodava três câmeras: imageador de amplo campo de visada (WFI), câmera imageadora de média Resolução (CCD) e Imageador infravermelho por varredura de média resolução (IRMSS). Sua órbita era hélio-síncrona a uma altitude de 778 km, fazia 14 revoluções por dia e obtinha a cobertura completa da Terra em 26 dias, que corresponde a 373 órbitas. Esse era o tempo necessário para obter imagens de todo o globo terrestre com as câmeras CCD e IRMSS, que possuíam campos de visada de 113 e 120 km, respectivamente. A câmera WFI, que cobria uma faixa de 890 km de imageamento fazia uma cobertura global em cinco dias. O CBERS-1 esteve em funcionamento de outubro de 1999 a agosto de 2003 (CBERS, 2005).

O CBERS-2 é tecnicamente idêntico ao CBERS-1, com alguns melhoramentos no desempenho dos instrumentos e na estação de processamento de imagens. Ele foi lançado em 21 de outubro de 2003 e continua em pleno funcionamento até o dia de hoje. As características técnicas dos sensores dos CBERS-1 e 2 são apresentadas na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 – Características dos sensores a bordo dos satélites CBERS-1 e 2.

Características	WFI	CCD	IRMSS
Bandas Espectrais	0,63 - 0,69 μm (R) 0,77 - 0,89 μm (NIR)	0,51 - 0,73 μm (pan) 0,45 - 0,52 μm (B) 0,52 - 0,59 μm (G) 0,63 - 0,69 μm (R) 0,77 - 0,89 μm (NIR)	0,50 - 1,10 μm (pan) 1,55 - 1,75 μm (SWIR) 2,08 - 2,35 μm (SWIR) 10,40 - 12,50 μm (TIR)
Resolução espacial	260 x 260 m	20 x 20 m	80 x 80 m (160 x 160 m termal)
Largura da faixa imageada	890 km	113 km	120 km
Capacidade de apontamento do espelho	Não	$\pm 32^\circ$	Não
Resolução temporal	5 dias	26 dias com visada vertical (3 dias com visada lateral)	26 dias

FONTE: Adaptado de CBERS (2005).

3.2 CBERS-2B

O CBERS-2B está sendo construído para garantir a continuidade do fornecimento das imagens de sensoriamento remoto do Programa CBERS, e tem seu lançamento previsto para o primeiro semestre de 2007.

O CBERS-2B terá características semelhantes aos satélites anteriores do Programa, com exceção da câmera HRC (High Resolution CCD Camera) - um sensor pancromático com resolução espacial de 2,5m. As outras câmeras presentes no satélite serão as já conhecidas CCD e WFI que já voam no CBERS-2.

A integração do satélite será realizada no Brasil, mais especificamente no LIT (Laboratório de Integração e Testes), do INPE. Seu lançamento será realizado na China pelo foguete Longa Marcha 4B.

As características dos três sensores presentes no satélite CBERS-2B são apresentadas na Tabela 3.2.

TABELA 3.2 – Informações CBERS-2B

Câmeras	Resolução Espacial	Bandas	Faixa Imageada
CCD	20m	B,G, R, NIR, PAN	120 km c/ visada lateral de 32°
HRC	2,5m	PAN	27 km c/visada lateral de 4°
WFI	260m	R, NIR	890Km

3.3 CBERS-3 e 4

Os satélites CBERS-3 e 4 representam uma evolução dos satélites CBERS-1 e 2. Os novos satélites possuirão quatro câmeras: PANMUX (Câmera PanMux), MUXCAM (Câmera Multi Espectral), IRSCAM (imageador por varredura de média resolução) e WFICAM (câmera imageadora de amplo campo de visada), com desempenhos geométricos e radiométricos melhorados. A Tabela 3.3 apresenta as principais características destas câmeras.

TABELA 3.3 – Características das câmeras do CBERS-3 e 4.

Características	MUXCAM	PANMUX	IRMSS	WFI
Bandas Espectrais	0,45 – 0,52 μm 0,52 – 0,59 μm 0,63 - 0,69 μm (R) 0,77 - 0,89 μm (NIR)	0,51 - 0,75 μm 0,51 - 0,85 μm 0,52 - 0,59 μm (G) 0,63 - 0,69 μm (R) 0,77 - 0,89 μm (NIR)	0,76 – 0,90 μm 0,76 – 1,10 μm 1,55 - 1,75 μm (SWIR) 2,08 - 2,35 μm (SWIR) 10,40 - 12,50 μm (TIR)	0,52 – 0,59 μm (G) 0,63 – 0,69 μm (R) 0,77 – 0,89 μm (NIR)
Resolução espacial	20 m	5 m (0,51-0,75 μm) /10 m	40 m/80 m (TIR)	73 m
Largura da faixa imageada	120 km	60 km	120 km	866 km
Capacidade de apontamento do espelho	Não	$\pm 32^\circ$	Não	Não
Resolução temporal	26 dias	5 dias (em função da visada lateral)	26 dias	5 dias

FONTE: CBERS (2005).

3.4 Câmera CCD/CBERS-2

As imagens CCD/CBERS-2, foco deste trabalho, são formadas por varredura eletrônica (push broom), sendo uma imagem constituída por 6000 linhas, cada linha contendo 6000 pixels. Um pixel corresponde a 20 m de resolução espacial, de maneira que cada linha forma uma faixa de 20 m por 120 km. A imagem vai sendo formada pelo movimento do satélite em sua trajetória orbital; o tempo de formação de uma linha é igual a 0,00289s (que corresponde a uma velocidade orbital aproximada de 7km/s), e o tempo de formação de uma imagem é de 17,34s.

Segundo Fonseca et al. (2004), o sinal da câmera CCD é gerado por dois canais: CCD-1 (B2, B3 e B4) e CCD-2 (B1, B3 and B5), onde a banda 3 opera em ambos os canais. Os valores de ganho e offset são definidos para cada canal e não para cada banda.

A câmera é formada por uma organização de três arranjos de 2048 detectores, onde 154 pixels em cada arranjo sofrem sobreposição e oito são pixels escuros. A Figura 3.1 mostra o arranjo dos três detectores da câmera CCD/CBERS-2.

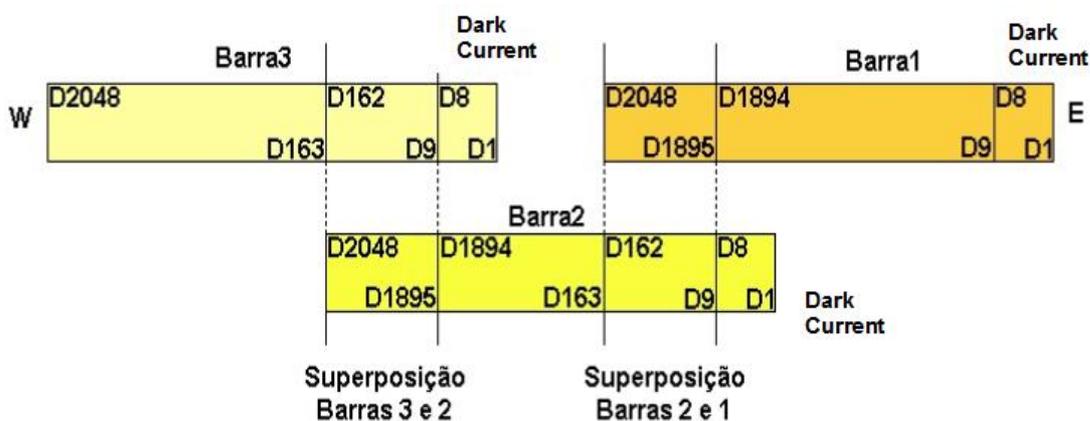


FIGURA 3.1 – Arranjo de detectores CCD/CBERS-2.
 FONTE: Fonseca et al. (2004).

A resolução temporal do sensor é de 26 dias, sendo esse o tempo necessário para obter imagens de todo o globo terrestre com a câmera CCD, que possui uma faixa imageadora de largura igual a 113 km. O sensor possui ainda a capacidade de visada lateral de até

32°, possibilitando a diminuição da resolução temporal para até três dias, além de permitir a geração de pares estereoscópicos de imagens CCD/CBERS-2.

O sensor CCD gera imagens nas bandas do azul (0,45 - 0,52 μm), verde (0,52 - 0,59 μm), vermelho (0,63 - 0,69 μm) e infravermelho próximo (0,77 - 0,89 μm), além da banda pancromática (0,51 - 0,73 μm), todas com resolução espacial de 20 m. A Figura 3.2 apresenta os intervalos espectrais de cada uma das bandas.

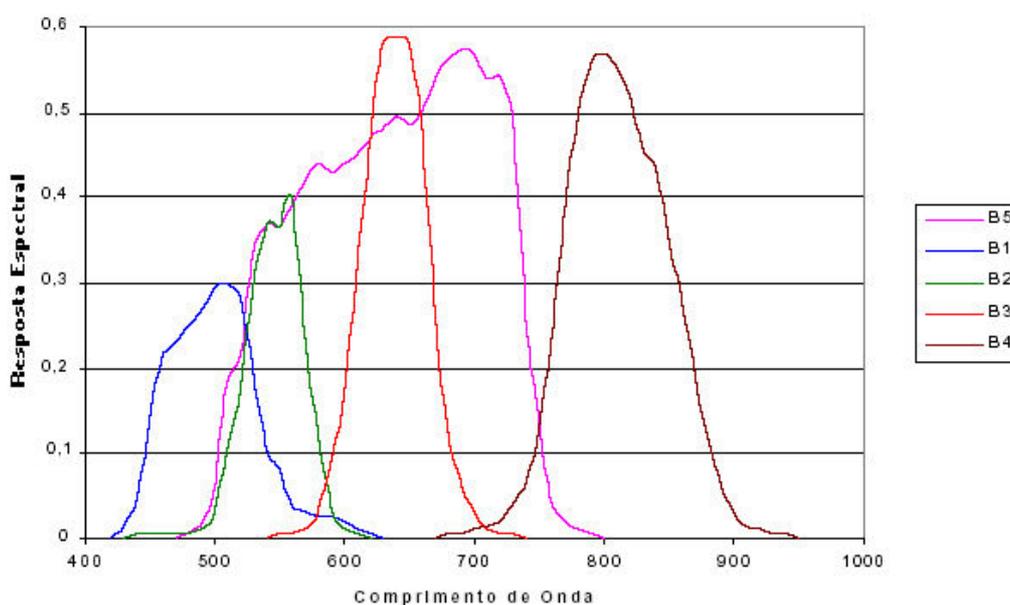


FIGURA 3.2 - Intervalos Espectrais das cinco bandas CCD/CBERS-2.

FONTE: Souza (2005).

Segundo Souza (2005) a câmera CCD é composta pelos seguintes mecanismos:

- Mecanismo Óptico, que consiste de um espelho apontador, um telescópio, um mecanismo de foco, um prisma de dispersão espectral da radiação e um sistema de calibração. O sistema óptico da banda Pan é individualizado, que faz com que as imagens desta banda não sejam espacialmente coincidentes com aquelas geradas nas demais bandas.

- Caixa de Controle do mecanismo óptico, que controla a posição do espelho, do plano focal e do sistema de calibração;
- Controle de temperatura;
- Câmera eletrônica CCD, que é composta por três arranjos lineares de 2048 detectores, por banda.

Em abril de 2005 o satélite sofreu uma anomalia que causou a perda de uma das baterias. Em função desse problema, está em operação apenas a câmera CCD.

3.5 Importância e Aplicações

Com a operação do CBERS, o Brasil passou a dispor de uma importante ferramenta para monitorar seu território, ganhando boa autonomia em relação às imagens fornecidas por sensores de outras nações.

O potencial de aplicação de um dado sensor é estabelecido em função de suas características de resoluções espaciais, temporais, espectrais e radiométricas. O satélite CBERS-2 possui bom potencial de atender a múltiplos requisitos de aplicações, por conter três diferentes câmeras.

O Programa CBERS disponibiliza imagens gratuitamente¹, o que tem viabilizado muitas pesquisas em instituições públicas e privadas, que tinham pouco acesso à tecnologia do Sensoriamento Remoto. No Seminário CBERS realizado em comemoração aos dois anos do CBERS-2 em outubro de 2005 (INPE, 2005), diversas instituições puderam apresentar trabalhos usando imagens CBERS para as mais diversas aplicações. Alguns deles são destacados a seguir:

- Uso de imagens CBERS em processos de reforma agrária (INCRA)
- Impacto do CBERS no setor educacional (CEFET-GO)

¹ Distribuídas gratuitamente em: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>

- Monitoramento da Exploração Madeireira na Amazônia com Imagens CBERS-CCD (IMAZON)
- Regeneração Florestal ao longo do gasoduto Urucu-Coari – Manaus (Petrobras)
- Assimilação do WFI/CBERS no DETER (INPE)
- Uso de pares estereoscópicos CCD/CBERS-2 na geração de MDE e OrtoImagem (FCT/UNESP e IBGE)
- Arrecadação Fiscal com o auxílio do CBERS-2 (Secretaria da Fazenda do Estado de Goiás)
- Monitoramento Ambiental (Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo)
- Atualização de mapeamento temático (IBGE).

O Seminário mostrou que as imagens do satélite CBERS-2 são usadas para inúmeras aplicações, o que motiva a melhoria da qualidade dos dados disponibilizados aos usuários.

CAPÍTULO 4

SATURAÇÃO RADIOMÉTRICA DA BANDA 4 – CCD/CBERS-2

Imagens de satélites podem apresentar algumas falhas que resultam em perda de informação. Um fenômeno que causa este tipo de problema é a saturação de imagens.

Segundo Karnieli et al. (2004), a radiometria de um sensor é considerada saturada quando o sinal de radiância de entrada, em termos de voltagem, excede o máximo sinal mensurável pelo detector. Neste caso, alvos com diferentes características de reflectância podem aparecer, na imagem, representados pelo mesmo nível de cinza. No caso de uma imagem com resolução radiométrica de 8 bits, esses alvos saturados são representados na imagem por pixels com nível de cinza igual a 255.

O efeito da saturação é fortemente influenciado pelo ângulo de elevação solar, pois quanto menor a distância Terra-Sol maior a irradiância e, conseqüentemente, a chance de ocorrer saturação. Assim, a época do ano possui grande influência sobre o fenômeno de saturação. A saturação é também dependente da área coberta pela cena, pois existem alvos mais sensíveis às variações do ângulo solar, e também é dependente dos efeitos atmosféricos, que afetam o valor da energia radiante recebida pelo sensor e variam durante o ano. Definições de grandezas radiométricas como radiância, reflectância entre outras estão presentes em Johnson et al. (2004).

De acordo com Fonseca et al. (2004), a banda 4 das imagens CCD - CBERS-2 têm apresentado altos valores de brilho e contraste em relação às bandas 1, 2 e 3, que, por vez, leva à saturação dos valores de nível de cinza. Esse fenômeno pode ser verificado pelo histograma da imagem, que descreve a distribuição estatística em termos de números de pixels para cada nível de cinza (Markelin e Honkavaara, 2004). A Figura 4.1 mostra os histogramas de uma mesma cena adquiridos por diferentes sensores (TM/Landsat-, HRV/SPOT-3 e CCD/CBERS-2), na faixa do infra-vermelho próximo.

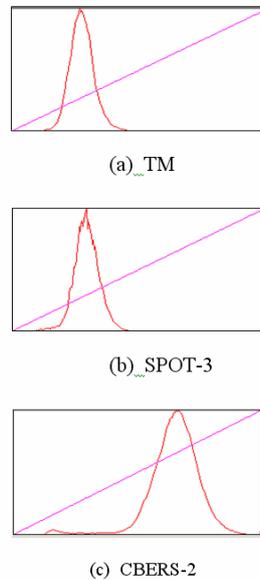


FIGURA 4.1 – Histogramas da mesma cena no mesmo intervalo de comprimento de onda (infravermelho próximo) obtidos por diferentes sensores: (a) TM/Landsat-5, (b) HRV/SPOT-3 e (c) CCD/CBERS-2. FONTE: Adaptado de Fonseca (2004).

O deslocamento do histograma observado na Figura 4.1(c) mostra que um mesmo alvo imageado pelo sensor CCD/CBERS-2, no mesmo intervalo de comprimento de onda (λ), é representado por níveis de cinza maiores do que nas imagens adquiridas pelos sensores TM-5 e HRV. Dependendo da época do ano e do alvo, essa característica pode levar a uma situação de saturação da imagem CCD/CBERS-2.

O problema de saturação é comum nas imagens de áreas de vegetação e urbanas, que possuem regiões de alta reflectância na banda 4. Uma forma de resolver este problema é mudar o valor de ganho do sensor na CCD/CBERS-2, os quatro valores de ganhos possíveis são: 0,59; 1,0; 1,69 e 2,86 (a configuração atual do canal 1 é ganho = 1,0). Neste caso, todas as bandas no mesmo canal ($C1=\{2, 3a \text{ e } 4\}$ or $C2=\{1, 3b \text{ e } 5\}$) serão afetadas considerando que o valor de ganho é o mesmo para cada canal.

A Tabela 4.1 ilustra um exemplo de saturação de uma imagem cujo ângulo de elevação solar é igual a 70 graus. Nela é apresentada a máxima reflectância mensurável pelos detectores nas bandas 2, 4 e 5, os valores de reflectância em que a imagem satura, o valor do ganho para a banda e a possibilidade de modificação do ganho.

TABELA 4.1 – Exemplo de saturação na CCD/CBERS-2.

Banda	Maxima reflectância	Valor de saturação	Ganho	Redução do ganho
B2	0,7	0,33	1,0	0,59
B4	0,9	0,7	0,59	Satura de qualquer forma
B5	0,5	0,33	1,0	0,59

FONTE: Fonseca et al. (2004).

No caso das bandas B2 e B5, pode-se resolver o problema reduzindo o ganho para 0,59, pois ao reduzir o ganho aumenta-se a amplitude de valores mensuráveis pelo detector. Já a banda 4 está no seu limite mínimo de ganho e saturaria em qualquer condição, já que não existe a possibilidade de redução do ganho.

4.1 Análise espaço-temporal da saturação

De acordo com Dowdeswell e McIntyre (1986), o problema da ocorrência de saturação em imagens MSS/Landsat-3 era inversamente relacionado com a latitude. Para analisar esta questão, um estudo com dados CCD/CBERS-2 foi realizado. Imagens adquiridas no período de verão dos anos 2004/2005 e 2005/2006 foram selecionadas, como mostram as Tabelas 4.2 e 4.3.

As Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam os ângulos de elevação solar (mínimo e máximo) das imagens saturadas utilizadas para realizar a análise espaço-temporal do fenômeno de saturação no verão 2004/2005 e 2005/2006, respectivamente.

TABELA 4.2 – Imagens utilizadas na análise espaço-temporal do verão 2004/2005.

	Cena 148/108 (Paraíba)	Cena 156/123 (São Paulo)	Cena 160/133 (Rio Grande do Sul)
Outubro	31/10/2004	07/10/2004	21/10/2004
Novembro	26/11/2004	02/11/2004	-
Dezembro	22/12/2004	-	12/12/2004
Janeiro	-	-	07/01/2005
Fevereiro	12/02/2005	14/02/2005	28/02/2005
Março	10/03/2005	12/03/2005	26/03/2005
Abril	05/04/2005	07/04/2005	-

TABELA 4.3– Imagens utilizadas na análise espaço-temporal do verão 2005/2006.

	Cena 148/108 (Paraíba)	Cena 156/123 (São Paulo)	Cena 160/133 (Rio Grande do Sul)
Outubro	30/10/2005	06/10/2005	20/10/2005
Novembro	-	27/11/2005	15/11/2005
Dezembro	21/12/2005	23/12/2005	11/12/2005
Janeiro	16/01/2006	18/01/2006	06/01/2006
Fevereiro	11/02/2006	13/02/2006	01/02/2006
Março	09/03/2006	11/03/2006	25/03/2006
Abril	04/04/2006	06/04/2006	20/04/2006

TABELA 4.4 – Ângulos de Elevação Solar das imagens saturadas (em graus).

Cena	Elevação Mínima	Elevação Máxima
148/108 - PB	61,0759	68,4616
156/123 – SP	56,4383	67,5021
160/123 - RS	53,195	65,017

TABELA 4.5 – Ângulos de Elevação Solar das imagens saturadas (em graus).

Cena	Elevação Mínima	Elevação Máxima
148/108 - PB	58,9555	67,5494
156/123 – SP	55,1964	66,6139
160/123 - RS	52,1924	64,0140

Todas as imagens foram analisadas para verificar a presença do fenômeno de saturação. Este estudo foi realizado por meio de análise visual de histogramas e de perfis radiométricos. Cada imagem foi considerada saturada quando qualquer alvo da cena naquela data apresentasse o fenômeno de saturação. Os resultados encontrados para as imagens dos verões de 2004/2005 e 2005/2006 são apresentados nas Figuras 4.2 e 4.3. As barras em vermelho indicam o tempo que houve saturação.

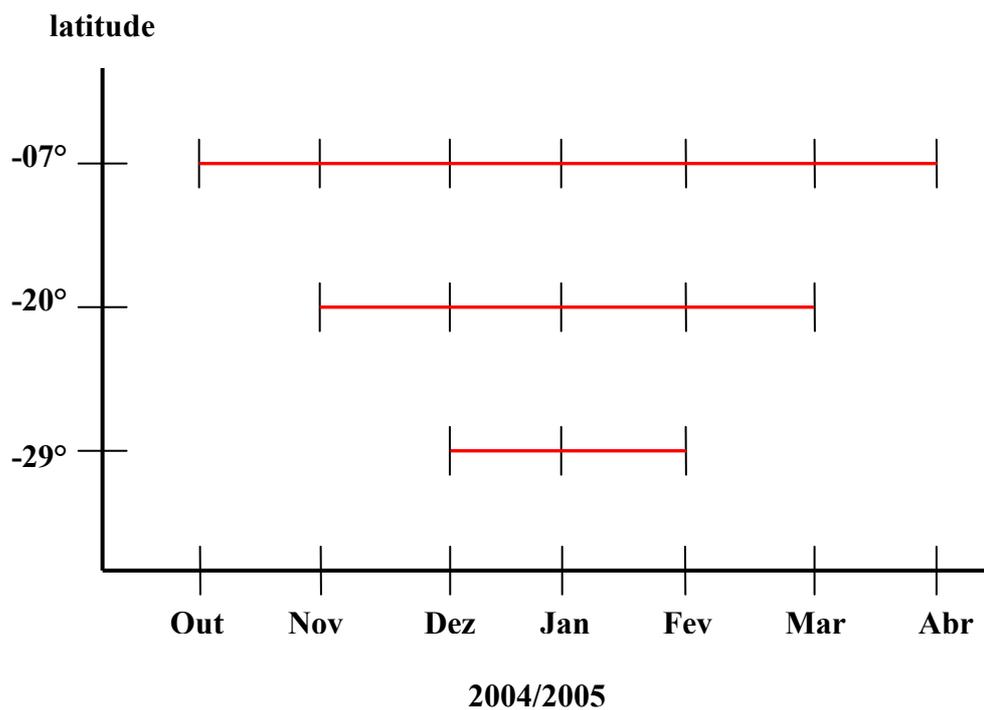


FIGURA 4.2 - Análise espaço-temporal do fenômeno de saturação no verão 2004/2005.

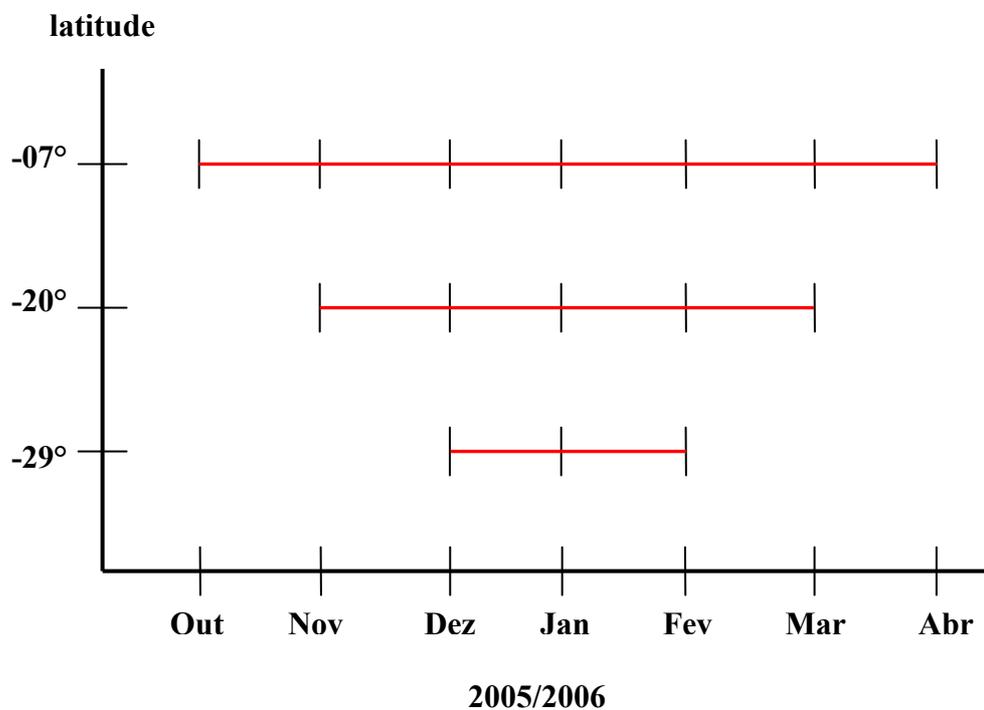


FIGURA 4.3 - Análise espaço-temporal do fenômeno de saturação no verão 2005/2006.

Nas Figuras 4.2 e 4.3, o traço vermelho sobre o mês representa presença de saturação na imagem de estudo. As Figuras são idênticas, pois o mesmo fenômeno ocorreu nos verões de 2004/2005 e 2005/2006. A saturação ocorreu de Outubro a Abril na cena CCD/CBERS-2 148/108 localizada na Paraíba, cuja latitude central é de $-7,167^\circ$. Na cena CCD/CBERS-2 156/123, localizada no nordeste do Estado de São Paulo, cuja latitude central é de $-20,588^\circ$, a saturação ocorreu de Novembro a Março. E na cena CCD/CBERS-2 160/133, localizada na área central do Estado do Rio Grande do Sul, cuja latitude central é de $-29,505^\circ$, a saturação ocorreu apenas de Dezembro a Fevereiro.

Os resultados da análise estão coerentes com os resultados de Dowdeswell e McIntyre (1986), pois quanto maior a latitude, menor a ocorrência de saturação.

4.2 Reparação do efeito da saturação

Esta seção descreve o experimento realizado para estimar os valores de níveis de cinza dos pixels saturados, cujas informações foram perdidas devido ao fenômeno da saturação.

4.2.1 Seleção e pré-processamento das imagens

Três imagens com alvos que apresentavam o fenômeno da saturação foram selecionadas. As imagens utilizadas são mostradas nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6. As características das imagens selecionadas são apresentadas na Tabela 4.6.

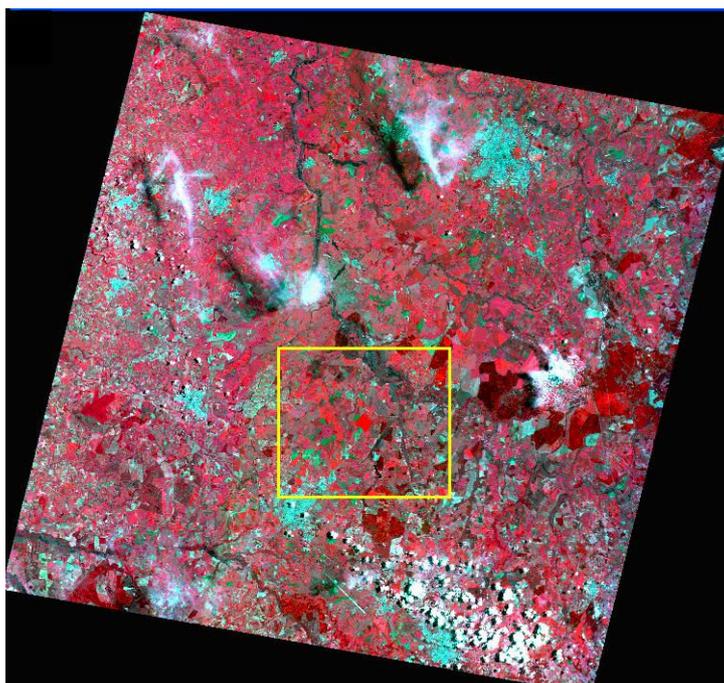


FIGURA 4.4 - Imagem CCD/CBERS-2 (156/124) – 14/02/2005. região de Ribeirão Preto - SP. Composição 2(B)3(G)4(R).

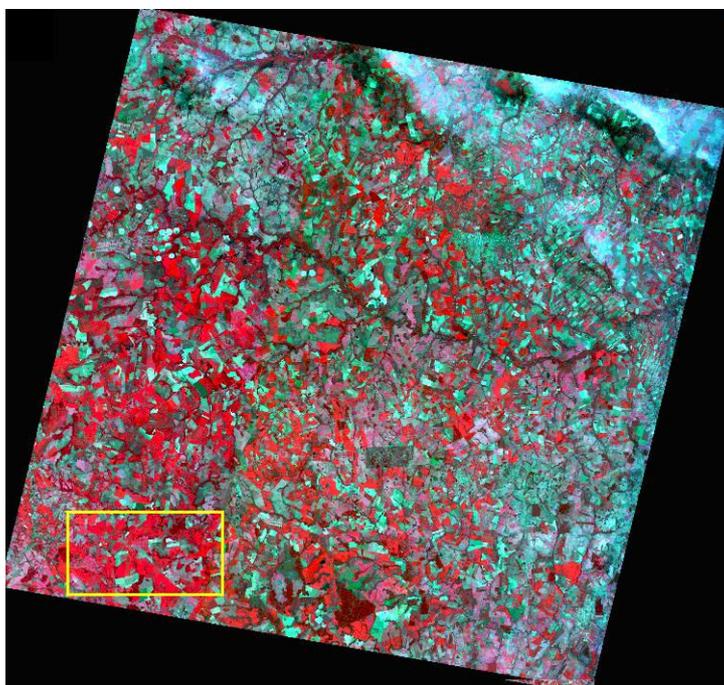


FIGURA 4.5 - Imagem CCD/CBERS-2 (163/125) – 19/02/2005. Região de Dourados – MS. Composição 2(B)3(G)4(R).

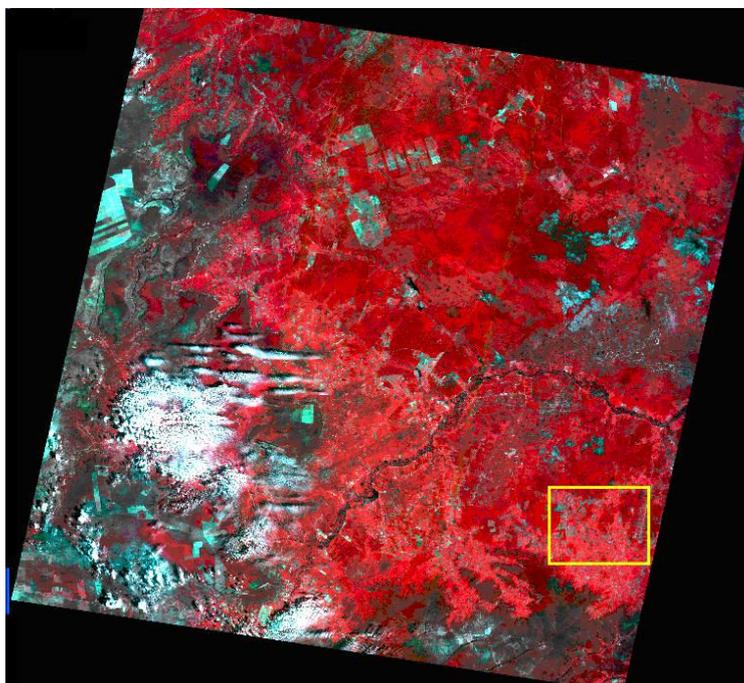


FIGURA 4.6 - Imagem CCD/CBERS-2 (155/113) – 27/12/04. Região de Barreiras – BA. Composição 2(B)3(G)4(R).

TABELA 4.6 – Características das imagens selecionadas.

Imagem	Data	Alvo saturado	Hora Decimal	Longitude Central	Latitude Central	Elevação Solar
156/124	14/02/2005	Cana	13:21:05	-48,034	-21,481	59,5058°
163/125	19/02/2005	Soja	13:48:17	-55,0013	-22,3739	58,5741°
155/113	27/12/2004	Feijão	13:18:51	-44,812	-11,645	62,8211°

As imagens foram convertidas de nível de cinza para imagens reflectância de superfície pelo uso de um programa que realiza a correção atmosférica pelo modelo 5S adaptado para o sensor CCD/CBERS-2 (Ponzoni et al., 2005).

4.2.2 Identificação do problema saturação

Primeiramente, foi realizada uma análise visual para identificar pixels saturados nas imagens. Após a análise visual, uma inspeção dos histogramas também foi realizada.

Todos os histogramas apresentados, nesta seção, referem-se às áreas destacadas nos retângulos (amarelos) marcados nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6. As setas vermelhas indicadas

nos histogramas das Figuras de 4.7 a 4.12 mostram o efeito da saturação das áreas analisadas.

As Figuras 4.7, 4.9 e 4.11 mostram, respectivamente, os histogramas das bandas originais 2, 3 e 4 das imagens CCD/CBERS-2: 156/124 de 14/02/2005, 163/125 de 19/02/2005 e 155/113 de 27/12/2004.

As Figuras 4.8, 4.10 e 4.12 mostram, respectivamente, os histogramas das bandas 2, 3 e 4 das mesmas cenas após a correção atmosférica, onde os valores estão representados em reflectância de superfície.

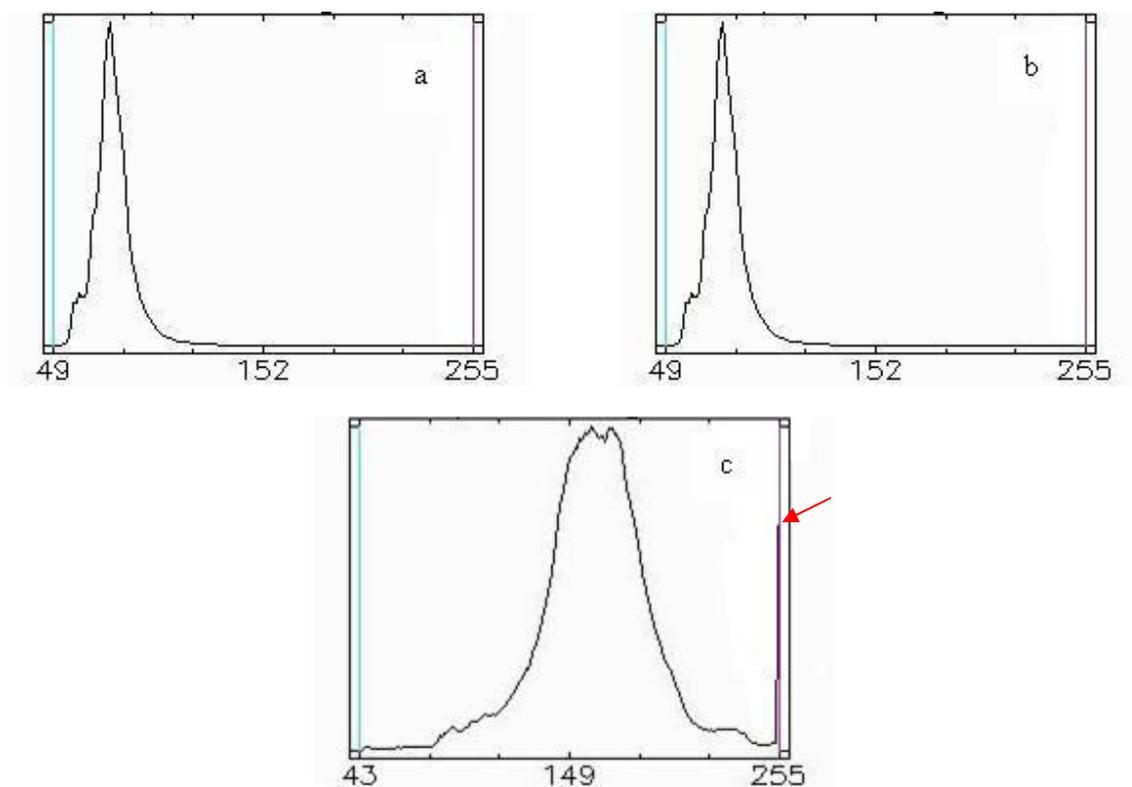


FIGURA 4.7 – Histogramas das Bandas 2 (a), 3 (b) e 4(c) da imagem CCD/CBERS-2 (156/124) de 14/02/2005.

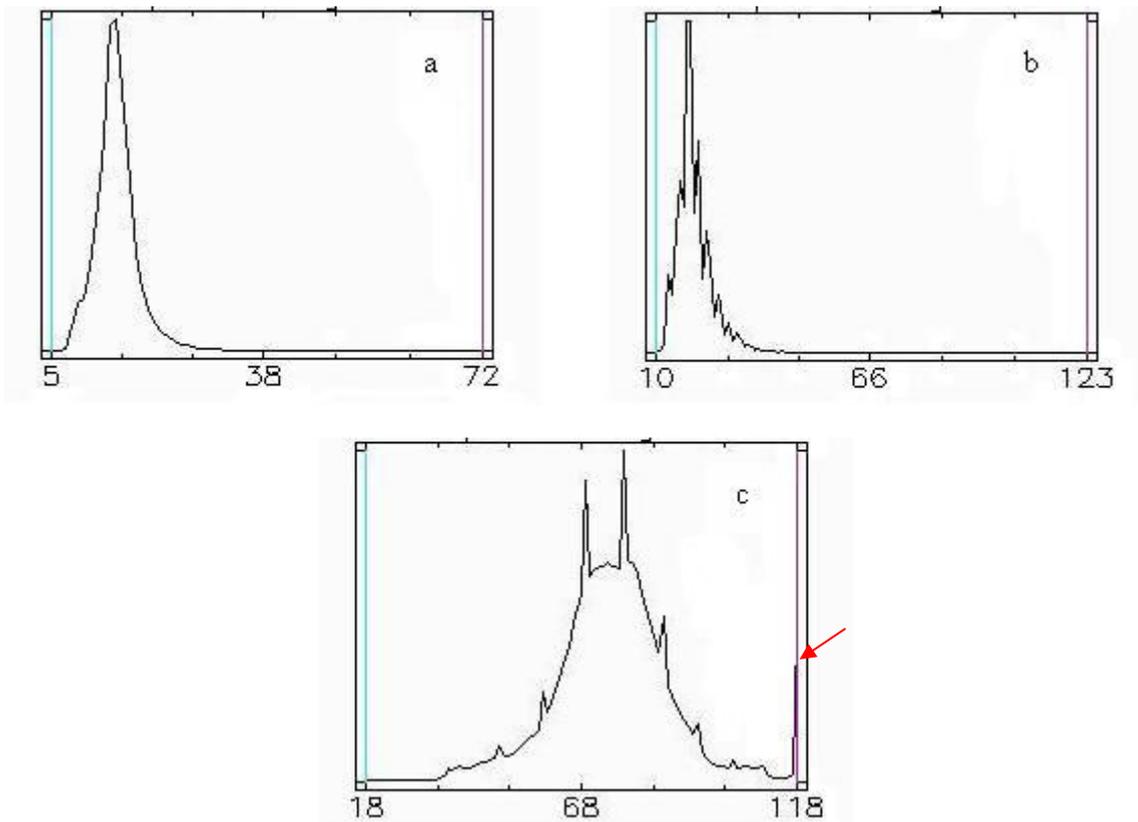


FIGURA 4.8 – Histogramas da Banda 2 (a), 3 (b) e 4 (c) após correção atmosférica.

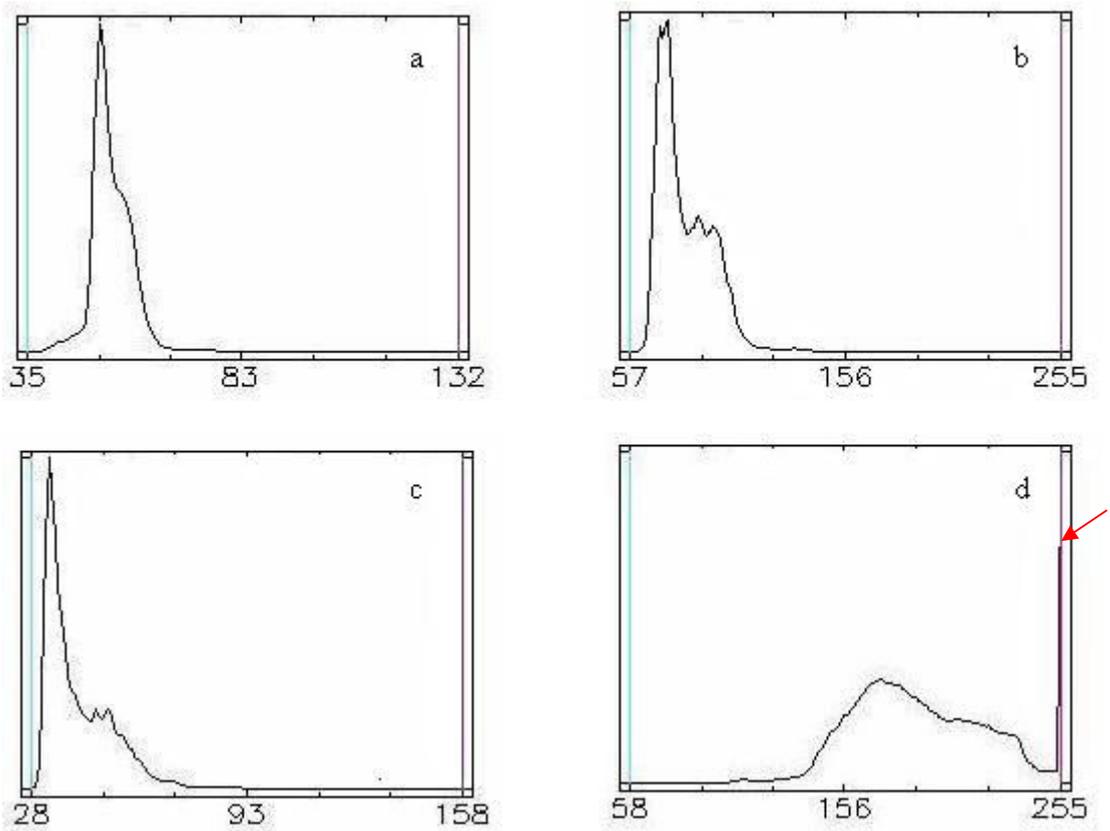


FIGURA 4.9 – Histogramas das Bandas 1 (a), 2 (b), 3(c) e 4 (d) da imagem CCD/CBERS-2 (163/125) de 19/02/2005.

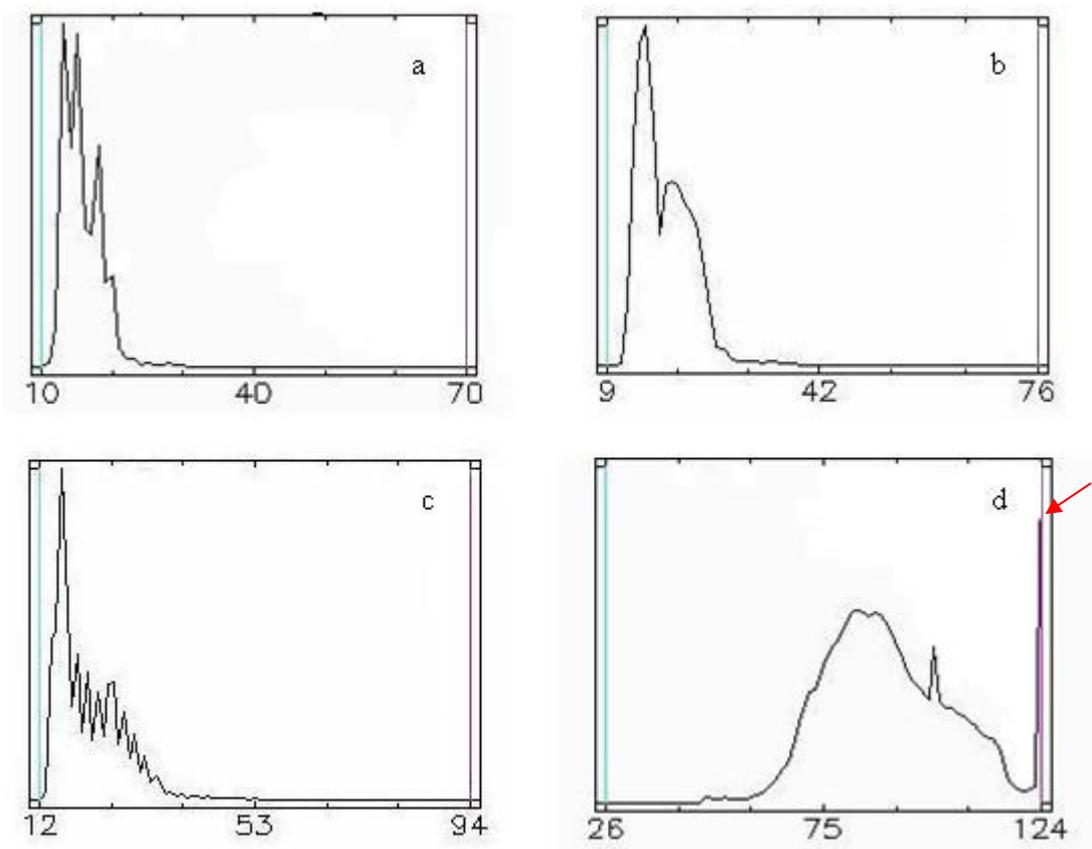


FIGURA 4.10 – Histogramas das Bandas 1 (a), 2 (b), 3(c) e 4 (d) após correção atmosférica.

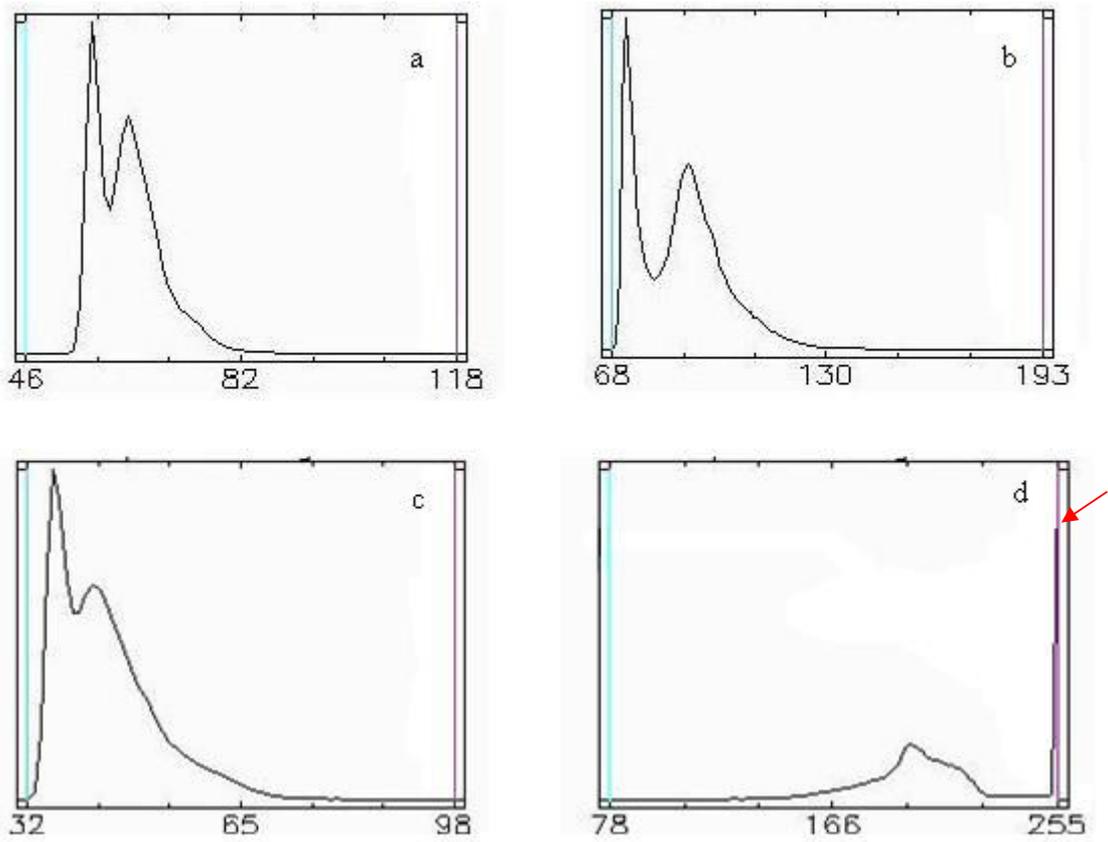


FIGURA 4.11 – Histogramas das Bandas 1 (a), 2 (b), 3(c) e 4 (d) da imagem CCD/CBERS-2 (155/113) de 27/12/2004.

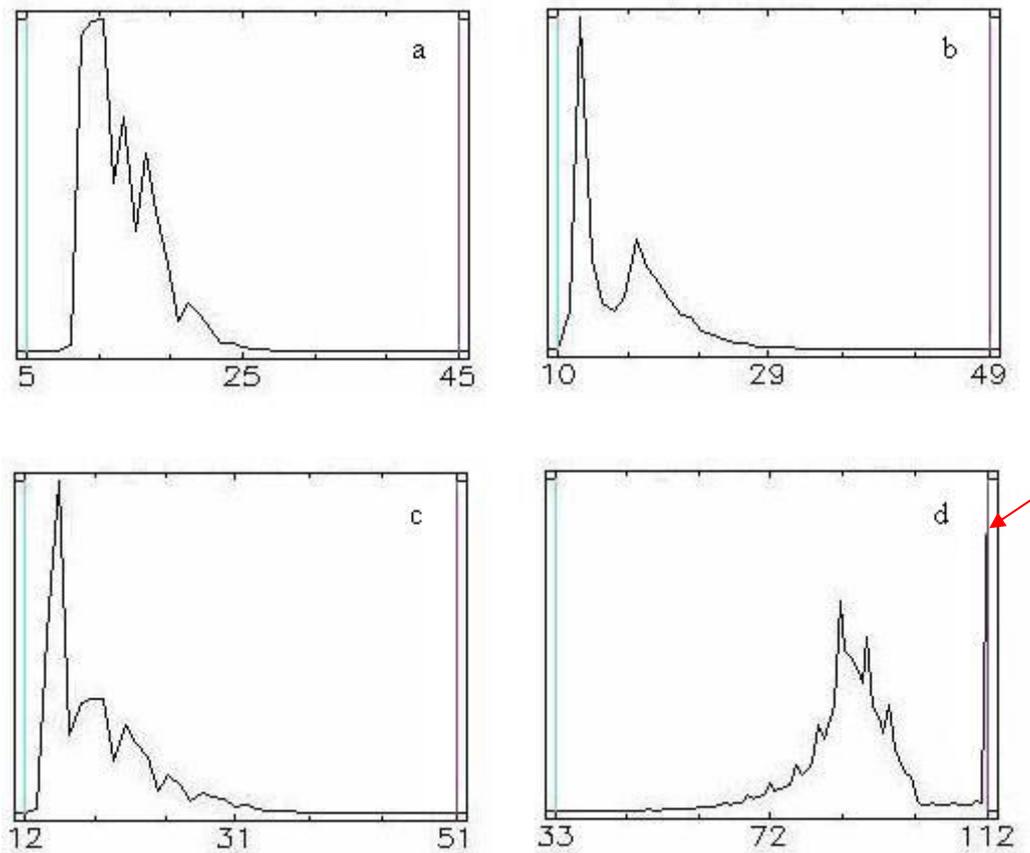


FIGURA 4.12 – Histogramas das Bandas 1 (a), 2 (b), 3(c) e 4 (d) da imagem CCD/CBERS-2 (155/113) de 27/12/2004 após a correção atmosférica.

Pode-se observar, que o efeito de saturação sempre ocorre na banda 4, tanto nos histogramas das imagens originais quanto nos das imagens corrigidas. Os histogramas das imagens de reflectância de superfície (corrigidas) apresentam-se deslocados à esquerda quando comparados aos histogramas originais, devido à redução do efeito da atmosfera, mas ambos mostram com clareza o fenômeno da saturação. Os histogramas das imagens corrigidas também apresentam algumas descontinuidades em relação aos histogramas das imagens originais devido ao arredondamento dos valores digitais realizado pelo algoritmo de correção atmosférica.

A análise de perfis radiométricos de uma linha de cada uma das imagens identificadas com alvos saturados pode também ser usado para identificar o efeito de saturação. O perfil radiométrico é realizado para as três bandas (2, 3 e 4) do CBERS-2 CCD. Nos

gráficos de perfil, as cores vermelha, verde e azul estão associadas, respectivamente, às bandas 4, 3 e 2.

A saturação da banda 4 (vermelho) é caracterizada por platôs de reflectância que representam a parte saturada da área de estudo. Os perfis de ND e reflectância de superfície das três áreas de estudo são apresentados nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15.

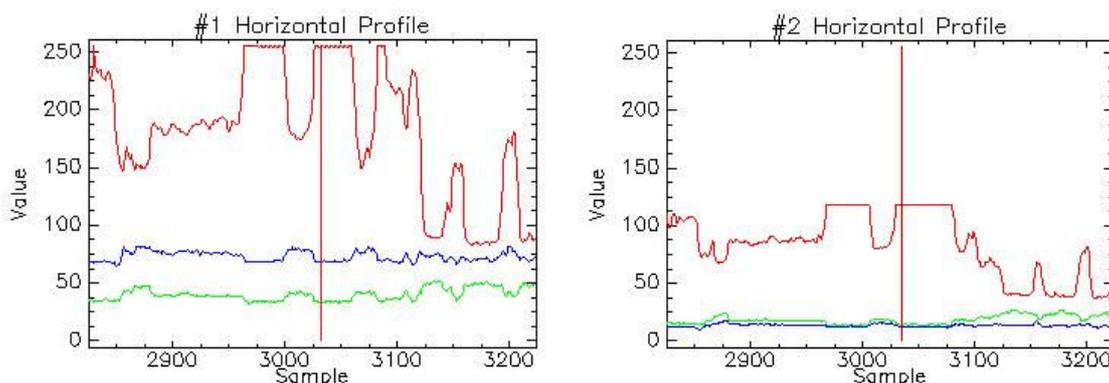


FIGURA 4.13 – Perfil horizontal da linha 3873 da imagem 156/124 de 14/02/2005. ND (a) e Reflectância de superfície (b).

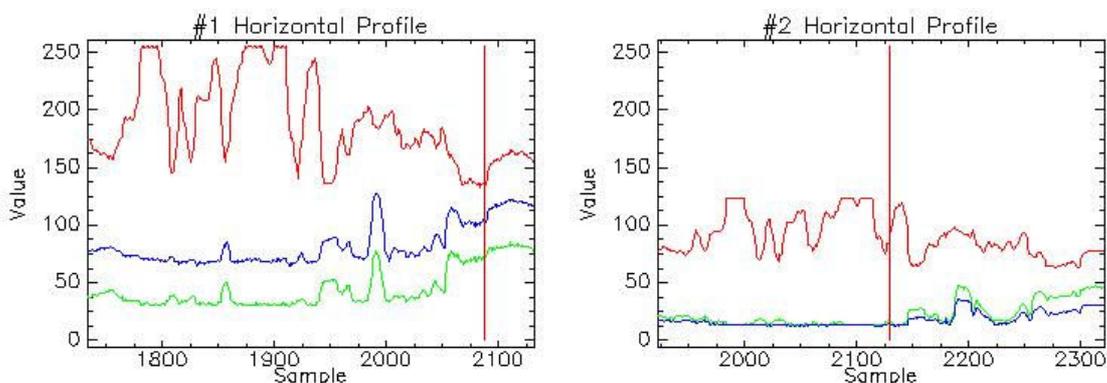


FIGURA 4.14 – Perfil horizontal da linha 5370 da imagem 163/125 de 19/02/2005. ND (a) e Reflectância de superfície (b).

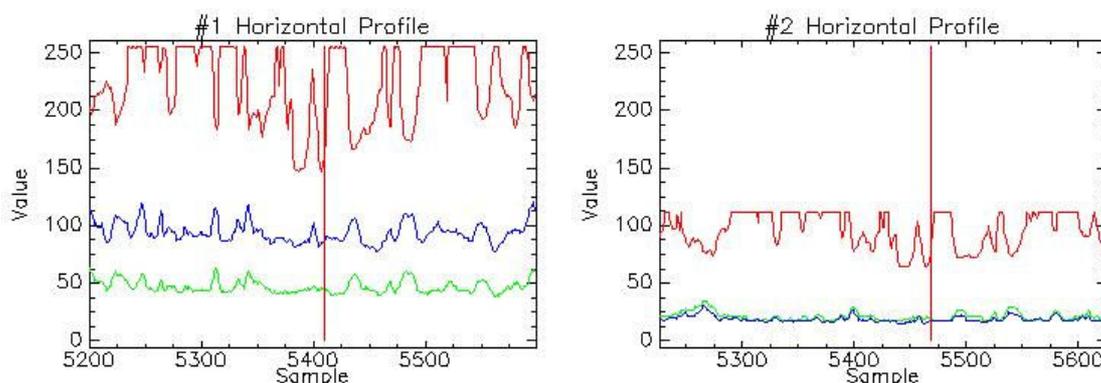


FIGURA 4.15 – Perfil horizontal da linha 5112 da imagem 155/113 de 27/12/2005. ND (a) e Reflectância de superfície (b).

Os valores de reflectância de superfície apresentados tanto nos histogramas quanto nos perfis radiométricos encontram-se numa escala de 0 a 255. Para retornar ao valor real da reflectância basta dividir o valor encontrado por 255 e, caso se queira expressar esse valor em porcentagem, basta multiplicá-los por 100.

Por meio dos perfis radiométricos de cenas corrigidas (atmosfera) é possível identificar os valores de reflectância dos pixels saturados, indicados pelos platôs. Os valores encontrados na saturação da banda 4 em cada uma das imagens são apresentados na Tabela 4.7.

TABELA 4.7 - Saturação da banda 4 do CCD/CBERS-2.

Imagem	156/124	163/125	155/113
Data	14/02/2005	19/02/2005	27/12/2005
Valor observado	118	124	112
Reflectância de superfície	0,463	0,482	0,439
Porcentagem	46,3%	48,2%	43,9%

Percebe-se pela Tabela 4.7 que as imagens saturam em diferentes valores de reflectância. Isso pode ser explicado pelas propriedades espectrais dos objetos presentes na cena, pelas diferentes datas e localização das imagens, que resultam em diferentes ângulos de elevação solar, fator de grande influência na saturação de uma imagem.

4.2.3 Reparação do fenômeno da saturação

Karnieli et al. (2004) afirmam que a banda 3 do ETM+/Landsat-7 apresenta o problema de saturação de imagens e descrevem um experimento para reparação do fenômeno, onde o alvo saturado é o deserto de Negev, em Israel. Os valores dos pixels saturados são inferidos por meio de uma regressão linear múltipla, onde as variáveis explicativas são os valores dos mesmos pixels nas bandas não saturadas.

Com o objetivo de verificar a potencialidade da análise de regressão entre estas bandas espectrais como uma técnica de recuperação da imagem saturada foi realizada uma análise de correlação entre a banda 4 e as demais bandas do CCD/CBERS-2.

As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam um indicativo da correlação entre as bandas da imagem 156/124 de 14/02/2005 e da imagem 163/125 de 19/02/2005 respectivamente.

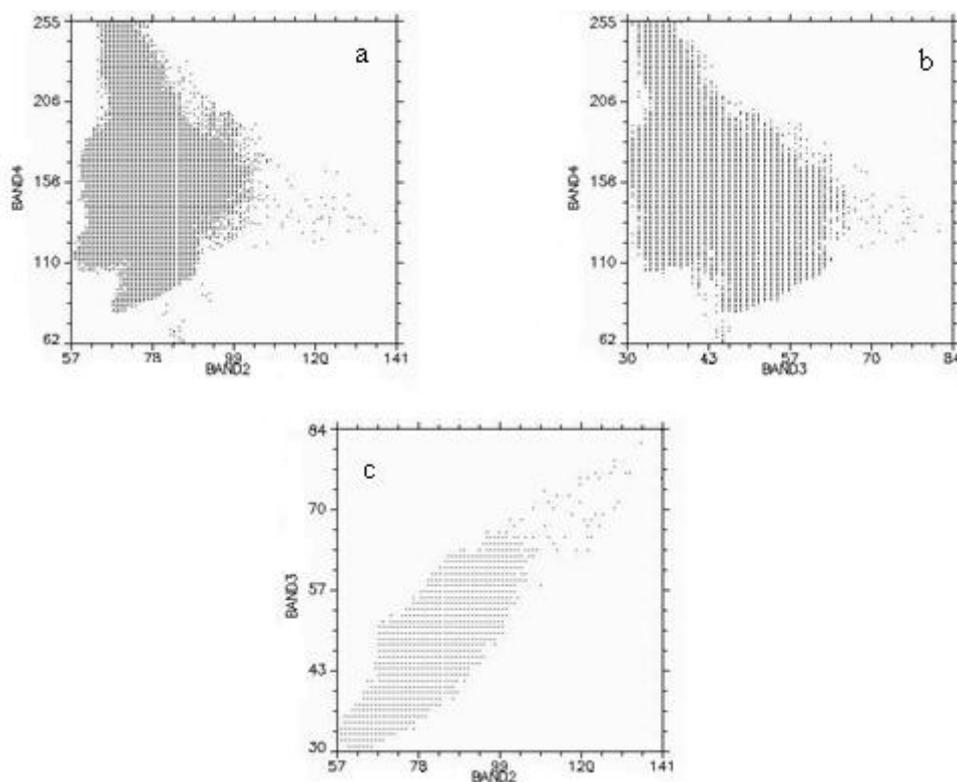


FIGURA 4.16 — Diagramas de espalhamento da imagem 156/124 de 14/02/2005: (a) B2 x B4, (b) B3 x B4 e (c) B2 x B3.

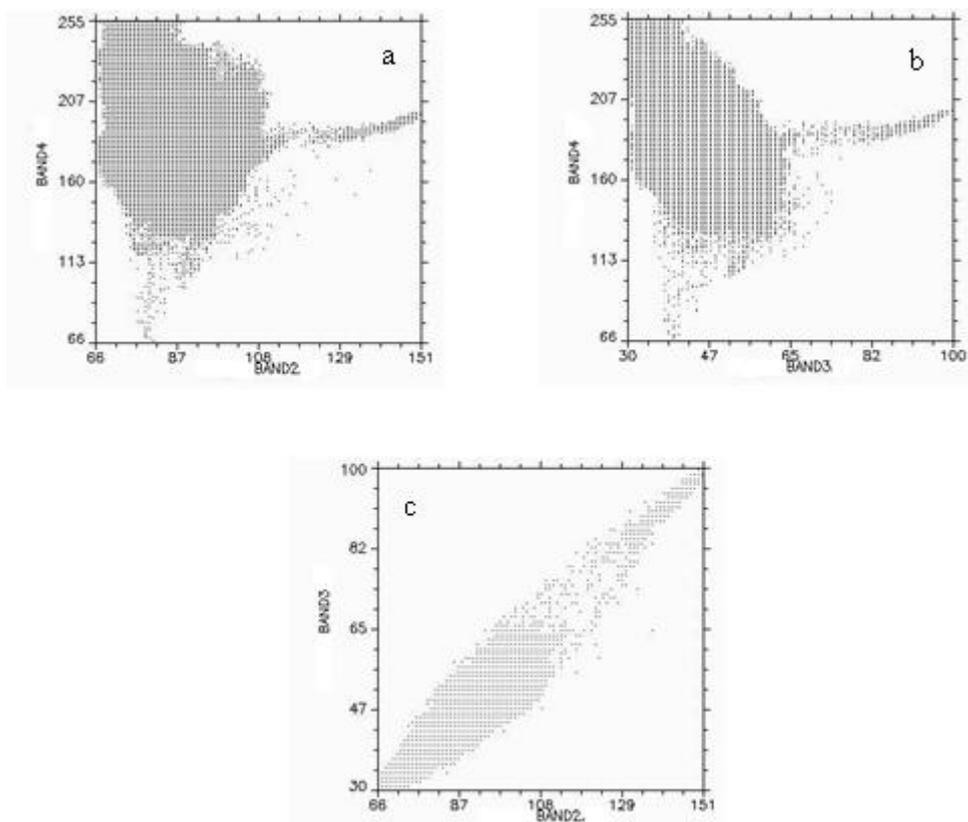


FIGURA 4.17 — Diagramas de espalhamento da imagem 163/125 de 19/02/2005: (a) B2 x B4, (b) B3 x B4 e (c) B2 x B3.

Tanto na Figura 4.16 quanto na Figura 4.17, uma pequena correlação foi verificada entre a banda 4 e as bandas 2 e 3. Por outro lado, foi observada uma alta correlação entre as bandas 2 e 3 da mesma imagem.

As imagens utilizadas como exemplo, são o reflexo do que acontece em qualquer imagem do sensor CCD/CBERS-2. Realmente, a banda 4 (infravermelho próximo) do CCD/CBERS-2 não possui alto grau de correlação com as outras bandas do mesmo sensor (bandas do visível). Já no ETM+/Landsat-7 quem satura é a banda 3 (vermelho), que é altamente correlacionada com as outras bandas do visível.

Tendo em vista esta baixa correlação, e na tentativa de solucionar o problema entre as bandas CCD/CBERS-2 de uma mesma data, foram selecionadas imagens de outras

datas (não-saturadas) e outros sensores para, por meio de uma análise de regressão, inferir valores para os pixels cuja informação foi perdida.

Na análise de regressão entre datas, as imagens com alvos não-saturados apresentaram alta correlação com as imagens saturadas, o que motivou a realização do experimento.

A imagem resultante deste experimento corrige quase que por completo a área saturada, ou melhor, estima valores para os pixels cujas informações foram perdidas. Mas estes valores não podem ser considerados como verdade, pois os alvos que apresentam o fenômeno de saturação na banda 4 do sensor CCD/CBERS-2 são em sua maioria alvos agrícolas, que são alvos mutáveis, como é o caso da cena utilizada no experimento. Os valores dos antigos pixels saturados na imagem resultante do experimento são inferidos a partir de informações diferentes da realidade do alvo na data do imageamento. O que justificou o abandono do experimento.

Assim, procurou-se outra alternativa para estimar valores para os pixels da banda 4 (0,76 – 0,9 μm) do sensor CCD/CBERS-2, que apresentam o fenômeno da saturação. Utilizou-se as bandas 3 e 4 do sensor WFI/CBERS-2, que correspondem ao mesmo intervalo espectral das imagens CCD/CBERS-2 e são gravadas na mesma passagem do satélite.

Na tentativa de realizar uma regressão entre as imagens, a resolução espacial das imagens CCD (20 m) foi degradada para a resolução das imagens WFI (260 m) pelo método de interpolação do vizinho mais próximo. Este método foi utilizado, pois não altera o valor real do pixel, como nos métodos da interpolação bilinear e convolução cúbica.

As bandas do sensor WFI/CBERS-2 têm apresentado um problema de variação de tonalidade. O lado esquerdo da imagem aparece em tons mais claros do que o centro da imagem e o lado direito da imagem é apresentado em tons mais escuros que a parte central da cena. Este efeito é evidenciado na banda 1 da WFI/CBERS-2, mas ocorre também nas bandas 2 e 3.

Uma análise preliminar da correlação entre as imagens CCD e WFI, foi realizada e constatou-se que o problema verificado nas imagens WFI/CBERS-2 prejudica fortemente a correlação entre as imagens, o que motivou o descarte desta alternativa.

Procurou-se então, uma solução para o problema de tonalidade e verificou-se que o algoritmo utilizado para correção não mantém as características radiométricas da imagem. Por este motivo, a tentativa de inferir os valores dos pixels saturados da banda 4 CCD/CBERS-2 com auxílio da imagem WFI/CBERS-2 também não foi utilizada.

Como os dois experimentos anteriores foram descartados, optou-se pela estimação dos valores dos pixels saturados por meio de regressão linear entre bandas de uma mesma imagem (CCD/CBERS-2 156/124 de 14/02/2005), apesar da baixa correlação da banda 4 com as outras bandas, já constatada anteriormente.

Amostras de alvos próximos à saturação foram coletadas para compor os dados da regressão. Foram coletadas 15 amostras de 20 pixels cada, totalizando assim 300 pixels amostrais.

Os pixels saturados (com reflectância de superfície igual a 0,463 ou número digital 118, conforme Tabela 4.7) foram retirados das amostras, resultando em 239 pixels amostrais.

A matriz de correlação entre os dados coletados das bandas da imagem é apresentada na Tabela 4.8.

TABELA 4.8– Matriz de correlação.

	B1	B2	B3	B1*B2	B1*B3	B2*B3	B4
B1	1,0000	0,988	0,738	0,989	0,942	0,924	-0,039
B2		1,000	0,752	0,993	0,943	0,941	-0,035
B3			1,000	0,768	0,917	0,926	-0,224
B1*B2				1,000	0,958	0,949	-0,055
B1*B3					1,000	0,995	-0,136
B2*B3						1,000	-0,136
B4							1,000

Para a construção do modelo foi realizado o teste Best Subsets que, entre todas as regressões possíveis, indica a melhor combinação de variáveis para um modelo significativo. O teste utilizado, baseia-se na análise do R^2_p que indica como ideal o modelo composto pelas variáveis B2 e B1*B3 (Neter, 1996).

Apesar da baixa correlação, a regressão linear múltipla foi realizada, resultando nos parâmetros apresentados na Tabela 4.9 e Equação 4.1.

TABELA 4.9 – Parâmetros resultantes da regressão.

R	0,31183
R^2	0,09724
p	0,00001
Intercepto	94,58160
Beta 1 (B2)	1,90097
Beta 2 (B1*B3)	-0,04784

$$PC = 94,5816 + 1,9009 * (\text{Banda 2}) - 0,0478 * (\text{Banda 1} * \text{Banda 3}) \quad (4.1)$$

PC é o pixel corrigido resultante da aplicação da Equação 4.1.

Como a amostra foi realizada com pixels de valores altos, na imagem resultante do processamento apenas os pixels saturados foram substituídos pelos valores indicados na regressão. As imagens original e resultante são apresentadas na Figura 4.18.

Detalhes de alvos saturados nas imagens original e corrigida são apresentados nas Figuras 4.19 e 4.20.

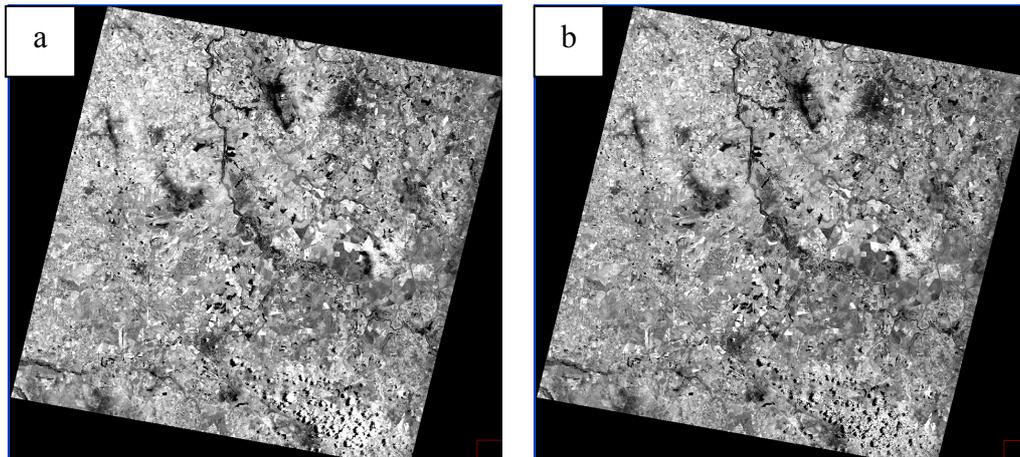


FIGURA 4.18 – Imagem Original (a). Imagem Corrigida (b).

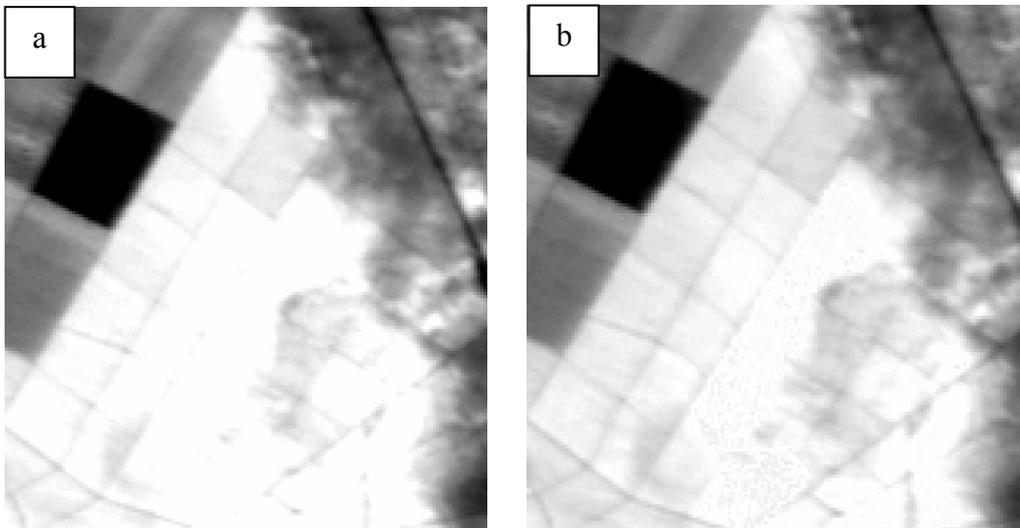


FIGURA 4.19 – Detalhe da imagem saturada (a). Detalhe da imagem corrigida (b).

A Figura 4.19 mostra que, apesar da baixa correlação entre as bandas, é possível inferir valores para os pixels saturados, melhorando a qualidade da imagem na área de informação perdida. Nota-se também que a imagem corrigida apresenta um aspecto salpicado em algumas áreas, devido aos valores muito próximos da saturação. Um teste foi realizado para substituir por valores inferidos também os pixels que apresentam, na imagem B4 original, valores iguais a 117 (muito próximos da saturação) com a intenção de melhorar o aspecto visual da imagem, mas visualmente o resultado não foi significativo.

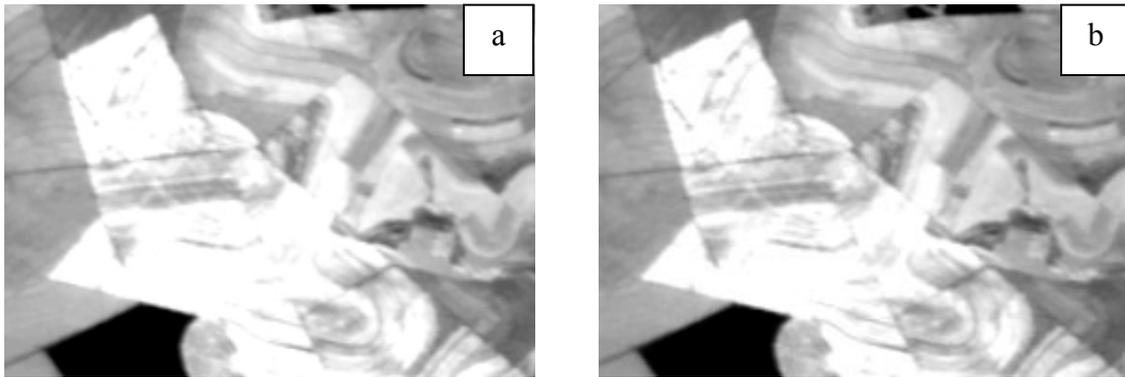


FIGURA 4.20 - Detalhe da imagem saturada (a). Detalhe da imagem corrigida (b).

Visualmente, as Figuras 4.20 (a e b) não apresentam grandes diferenças, apenas alguns detalhes são visualizados na Figura 4.20b (corrigida). Entretanto, os alvos saturados (muito claros) na Figura 4.20a (saturada) apresentam valor igual a 118, enquanto na Figura 4.20b (corrigida) apresentam em média valores 105.

Foi realizada também uma análise de regressão linear simples somente com a banda 3, pois, apesar de muito baixa, esta é a banda que apresenta a maior correlação com a banda 4 CCD/CBERS-2. O resultado obtido é apresentado na Figura 4.21.

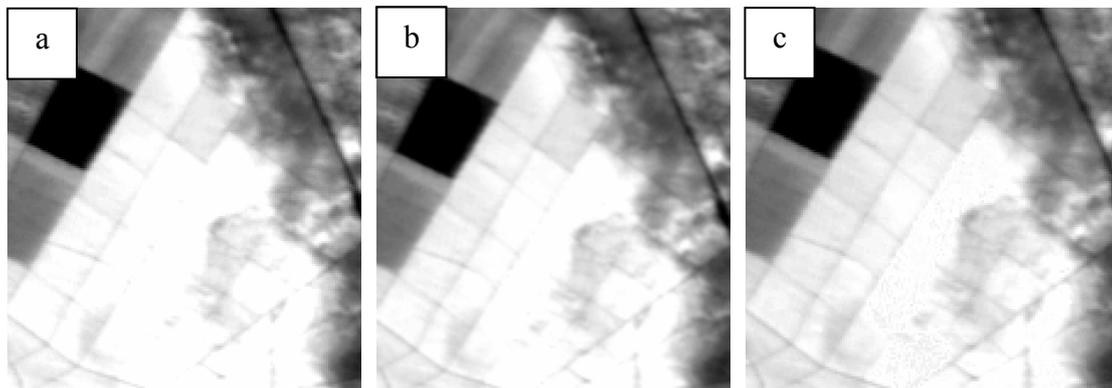


FIGURA 4.21 – Detalhe da imagem saturada (a). Detalhe da imagem corrigida – regressão com B3 (b). Detalhe da imagem corrigida regressão com B1, B2 e B3 (c).

A Figura 4.21 (b) mostra que a banda 3 é capaz de acrescentar informação na reparação do fenômeno da saturação. Mas, como esperado, a Figura 4.21 (c) mostra que a regressão linear múltipla apresenta um melhor resultado que a regressão linear simples.

O resultado obtido neste experimento é interessante, mas ainda não é o suficiente para “corrigir” grandes áreas com alvos saturados, devido à baixa variabilidade de valores destes mesmos alvos nas outras bandas, conforme a Tabela 4.10.

Os pixels saturados na banda 4 da cena CCD/CBERS-2 (156/124) de 14/02/2005 apresentam valores iguais a 118 numa escala entre 0 e 255, o que representa uma reflectância de superfície de aproximadamente 46,27%. A Tabela 4.10 apresenta a variabilidade dos valores de reflectância de superfície correspondentes aos pixels saturados nas outras bandas.

TABELA 4.10 – Variabilidade de alvos saturados em bandas que não apresentam saturação.

Banda	Variabilidade
B1	entre 19 e 22
B2	entre 11 e 13
B3	entre 13 e 16

Os mesmos pixels nas bandas não saturadas apresentam uma pequena variabilidade (Tabela 4.10), o que, juntamente com a baixa correlação, justifica o modesto resultado do experimento.

Como o problema da saturação de imagens somente ocorre quando o ganho do sensor não está corretamente definido ou não está dentro das especificações, uma real solução do problema seria a alteração do valor do ganho do sensor.

Segundo Souza (2005), no caso da CCD/CBERS-2 a modificação dos valores de ganho fica dificultada, pois o ganho é agrupado em bandas, ou seja, não é possível ajustar o ganho para cada uma das bandas individualmente. Ao alterar o valor do ganho da banda 4, altera-se também o ganho das bandas 2 e 3, o que poderia acarretar problemas radiométricos nestas bandas.

CAPÍTULO 5

RESTAURAÇÃO DE IMAGENS CCD/CBERS-2

As técnicas de restauração de imagens são orientadas para a modelagem das degradações e a conseqüente aplicação de um processo inverso para obter uma aproximação da cena original (Boggione, 2003). O problema é que não existe um método de restauração capaz de recuperar totalmente a imagem degradada, uma vez que as informações foram perdidas. Então, o objetivo da restauração é realçar as componentes em freqüência da imagem que foram suavizadas durante o processo de formação da imagem. As componentes em altas freqüências estão relacionadas com os detalhes na imagem (bordas, feições lineares, contornos dos objetos, etc.).

Cuidados devem ser tomados no projeto de um filtro de restauração, afim de evitar a amplificação do nível de ruído do sinal, pois este aparece nas altas freqüências, que são justamente aquelas realçadas no processo de restauração.

Alguns critérios para avaliar a qualidade das imagens restauradas são propostos em Boggione (2003) e Fonseca et al. (1993).

- Qualidade Visual – As diferenças entre a imagem original e a restaurada são identificadas visualmente pela observação de feições lineares. As imagens restauradas tendem a apresentar transições mais nítidas nesses tipos de feições.
- Imagem Diferença – É obtida pelo processamento de subtração pixel a pixel entre a imagem original e imagem restaurada. A imagem diferença realça as alterações ocorridas após o processamento.
- Estatística - Uma forma de avaliar o contraste de uma imagem é por meio do desvio padrão ou da variância. Quanto mais alta a variância maior a presença de detalhes na imagem.

- Perfil radiométrico – Caracteriza a variação dos níveis de cinza de uma linha. Uma variação mais acentuada pode ser um indicativo da presença de mais detalhes na imagem (bordas, por exemplo). Deve-se atentar para o fato de que o ruído caracteriza-se por uma variação abrupta e, neste caso, ele não constitui informação.
- EIFOV – Pode ser medido por meio da função de transferência de modulação do sensor (MTF). O EIFOV possibilita a comparação entre imagens com valores de IFOV similares. Espera-se que as imagens restauradas tenham um valor de EIFOV menor do que as imagens originais, antes do processamento.

Wang e Bovik (2002) propõem um índice para avaliar a qualidade de uma imagem digital, conhecido como IQI (image quality index). Este índice pode ser utilizado para comparar imagens processadas com alguma imagem de referência.

Como mencionado anteriormente, a relação Sinal-Ruído (S/R) também pode ser utilizada para avaliar a qualidade radiométrica dos dados.

5.1 Análise das imagens restauradas

Esta seção descreve o experimento realizado com o objetivo de avaliar a qualidade das imagens CCD/CBERS-2 processadas por filtros de restauração. A identificação de parâmetros dos filtros de restauração adequados é também analisada.

Imagens CCD/CBERS-2 são restauradas e comparadas com as imagens originais HRV/SPOT-4, que possuem a mesma resolução espacial (20m) e uma qualidade radiométrica visualmente superior às imagens CCD/CBERS-2.

Alguns critérios de avaliação das imagens restauradas propostos por Boggione (2003) e Fonseca (1993) são usados neste experimento. Outros critérios tais como o índice IQI, auto-correlação e análise de Fourier são também usados.

As imagens dos sensores CCD/CBERS-2 e HRV/SPOT-4, usadas na avaliação da qualidade das imagens restauradas são apresentadas na Tabela 5.1, onde os dois números entre parênteses indicam órbita/ponto.

TABELA 5.1 – Imagens utilizadas na análise.

Cenas		Data
Rio de Janeiro	HRV/SPOT-4 (723/396)	17/10/2005
	CCD/CBERS-2 (151/126)	21/10/2005
Goiânia	HRV/SPOT-4 (707/383)	24/08/2005
	CCD/CBERS-2 (158/119)	04/09/2005
Batatais	HRV/SPOT-4 (713/392)	24/08/2005
	CCD/CBERS-2 (156/123)	10/09/2005

Foram selecionadas imagens de áreas urbanas, justamente por conterem informações de altas frequências (detalhes). As três imagens utilizadas nos experimentos são apresentadas nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3, elas foram recortadas no tamanho de 400 x 400 pixels a fim de tornar o processamento mais rápido.

As imagens CBERS são apresentadas à esquerda e as imagens SPOT à direita. O efeito de borramento das imagens CBERS é facilmente observado.

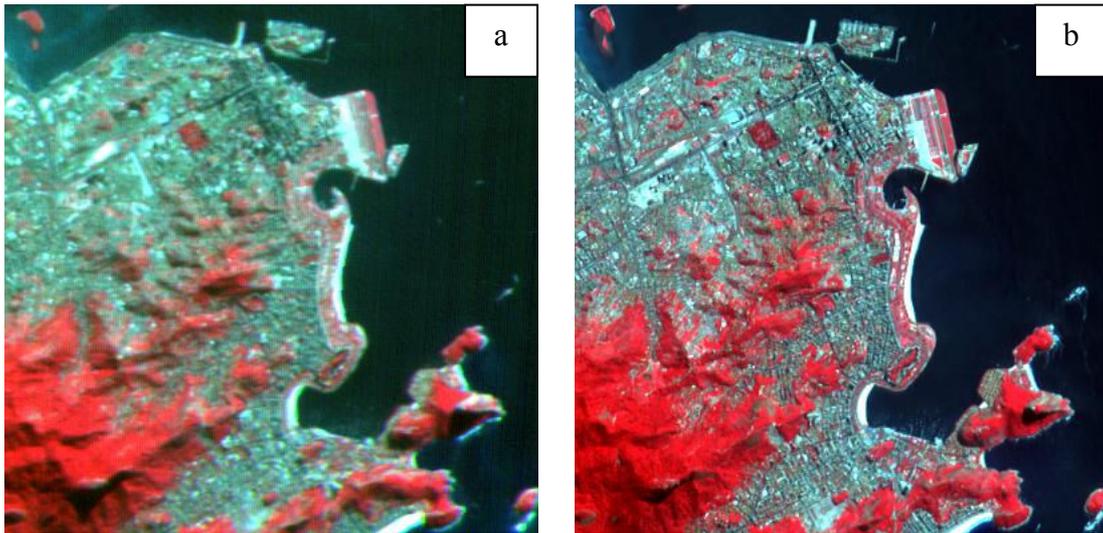


FIGURA 5.1 – Imagens do Rio de Janeiro: (a) CCD/CBERS R4G3B2 de 17/10/2005, (b) SPOT R3G2B1 de 21/10/2005.

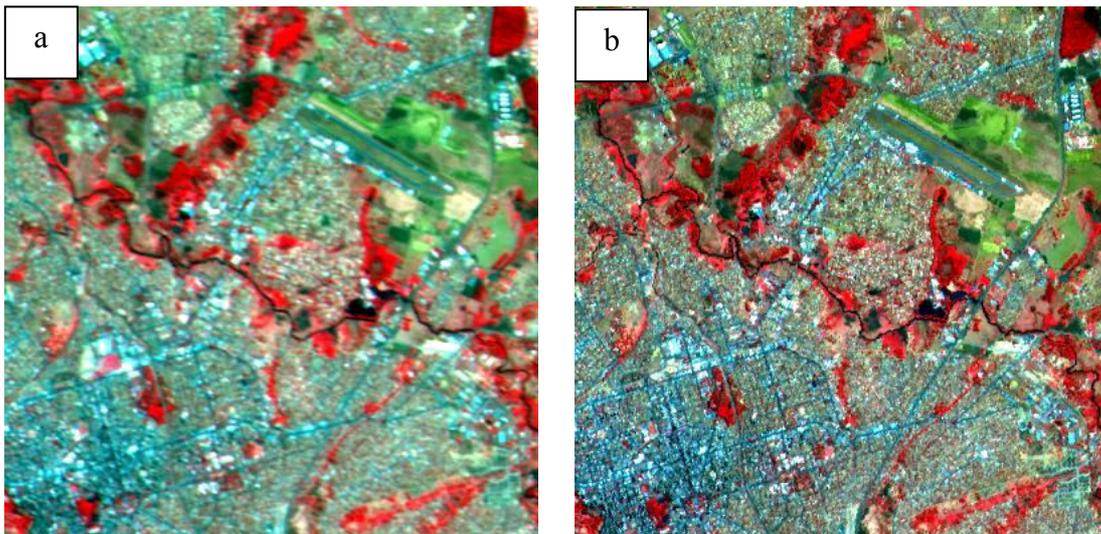


FIGURA 5.2 – Imagens de Goiânia: (a) CCD/CBERS R4G3B2 de 24/08/2005, (b) SPOT R3G2B1 de 04/09/2005.

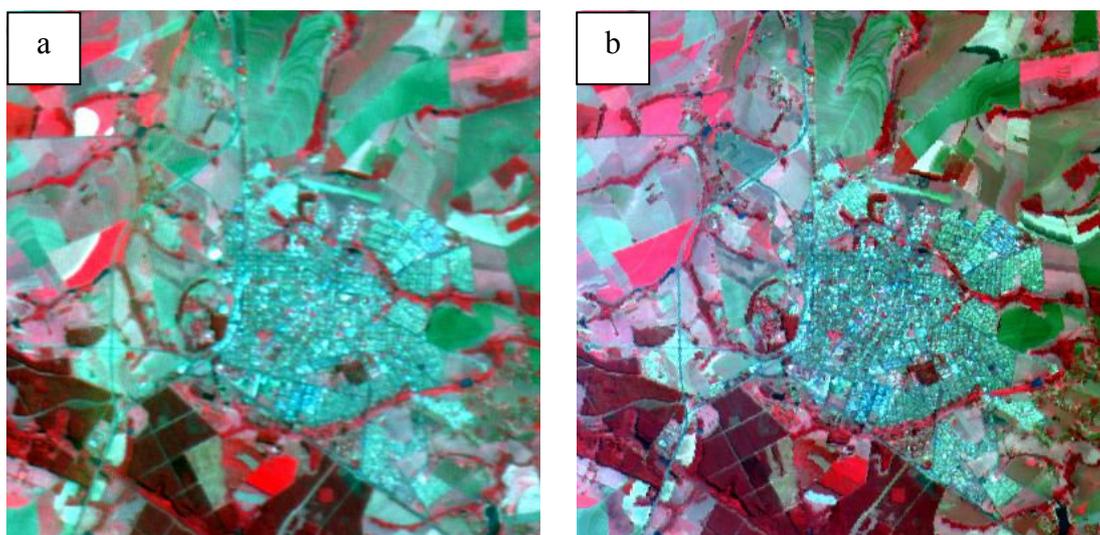


FIGURA 5.3 – Imagens de Batatais: (a) CCD/CBERS R4G3B2 de 24/08/2005, (b) SPOT R3G2B1 de 10/09/2005.

As imagens CCD/CBERS-2 foram restauradas com o programa RESTAU, baseado no filtro inverso modificado (Fonseca, 1993) e pelo programa RESTAURAÇÃO baseado no filtro de Richardson-Lucy modificado (Souza, 2005). O programa RESTAU, permite que o usuário indique os parâmetros da restauração.

O filtro inverso modificado (FIM) foi projetado considerando a MTF modelada por uma função gaussiana. Esta função é determinada em função dos valores de EIFOV obtidos para cada banda.

Segundo a Tabela 2.1 (Bensebaa, 2004), os valores de EIFOV na direção cross-track (horizontal) obtidos experimentalmente para o sensor CCD/CBERS-2 foram bastante altos, significando uma grande perda de resolução nesta direção. Este fato implica em um borramento maior na direção horizontal, e uma dificuldade maior em restaurar estes dados, já que grande parte da informação de detalhe foi perdida.

Testes para o filtro FIM usando os valores de EIFOV na direção horizontal, definidos na Tabela 2.1, resultaram em imagens restauradas com alto nível de ruído. Os valores usados neste trabalho foram definidos, empiricamente, através da análise visual, levando em conta a degradação da imagem devido ao nível de ruído. Os seguintes

valores de EIFOV (dois testes) selecionados como parâmetros dos filtros de restauração para todas bandas são:

Filtro de Restauração 1 : EIFOV (X) = 40 e EIFOV (Y) = 34;

Filtro de Restauração 2 : EIFOV (X) = 45 e EIFOV (Y) = 34.

Mais recentemente, na tentativa de selecionar os melhores valores de EIFOV que resultassem em imagens com nível de ruído aceitável, Gouvêa (2006) realizou alguns experimentos usando mineração de dados para auxiliar na seleção dos parâmetros dos filtros de restauração. Os valores dos parâmetros usados neste trabalho, estão dentro da faixa de valores de EIFOV indicados por Gouvêa (2006).

As imagens restauradas pelos filtros, definidos pelos parâmetros 1 e 2 acima, são referenciadas neste trabalho como Rest1 e Rest2, respectivamente. E as imagens restauradas pelo método Richardson-Lucy modificado são denominadas de Rest3.

5.2 Análise numérica dos dados

Para comparar as características estatísticas das imagens CBERS original, SPOT/HRV e as imagens restauradas calculou-se a média e a variância para cada uma das bandas das imagens. Todas as análises foram realizadas sem aplicação de contraste.

O valor médio dos níveis de cinza de uma imagem está relacionada com o brilho da imagem. Devido à normalização dos coeficientes dos filtros de restauração, as imagens restauradas mantêm, praticamente, os mesmos valores de média das imagens originais. O valor de variância é relacionado com o conteúdo de informação da imagem; quanto maiores os valores de variância, maior o contraste da imagem. As Tabelas com os valores das médias e variâncias são apresentadas no Apêndice A.

Os valores de variância são apresentados na forma de gráficos para facilitar a interpretação dos dados. As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam os valores de variância para as bandas verde, vermelho e infra-vermelho próximo (2, 3 e 4 no CCD/CBERS-2 e 1, 2 e 3 no SPOT, respectivamente) das imagens do Rio de Janeiro, Goiânia e Batatais.

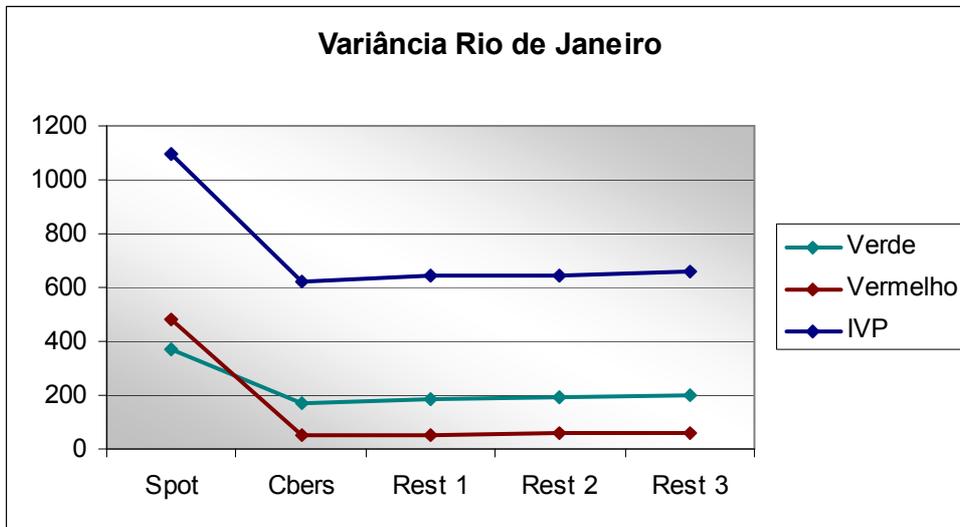


FIGURA 5.4 – Variância das imagens referentes à cena do Rio de Janeiro.

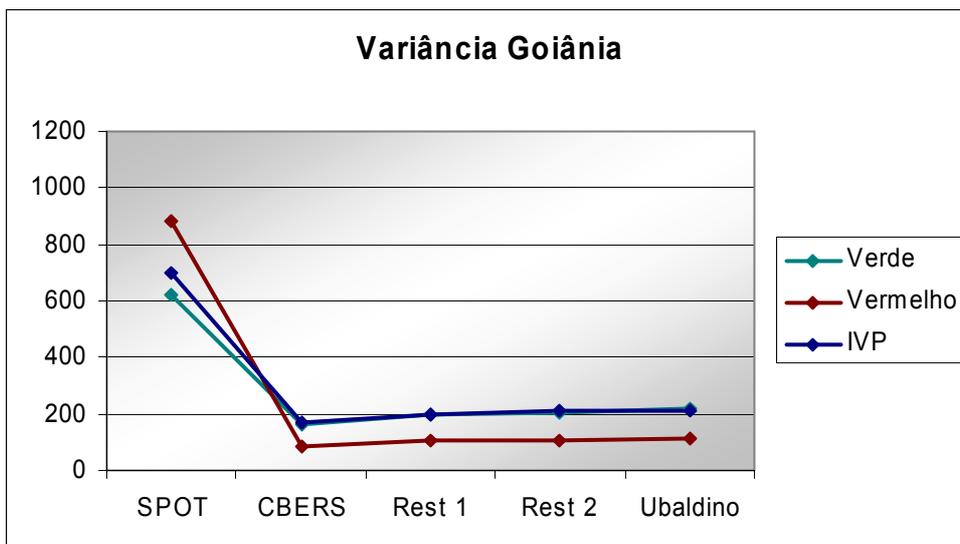


FIGURA 5.5 - Variância das imagens referentes à cena de Goiânia.

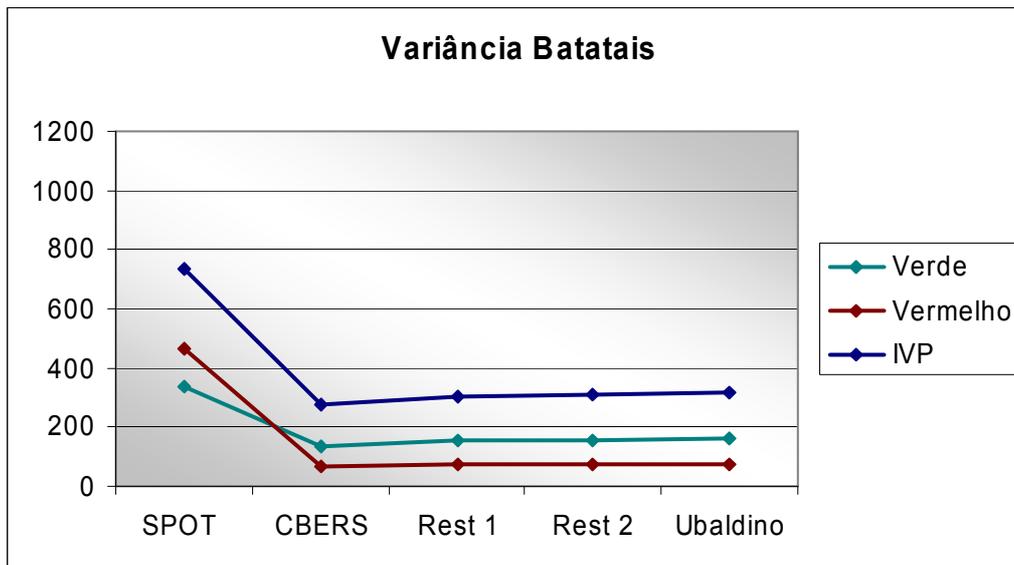


FIGURA 5.6 - Variância das imagens referentes à cena de Batatais.

As imagens SPOT apresentam valores maiores de variância do que as imagens CBERS. Entretanto, foi obtido um pequeno aumento (em média 9%) neste valor para as imagens CBERS restauradas em relação às originais, o que já indica um aumento na quantidade de informação presente nas imagens restauradas em relação às imagens CBERS originais.

A seguir foi calculado o Índice de Qualidade da Imagem (IQI) (Equação 5.1) para todas as imagens CBERS originais e restauradas utilizadas no processo. Este índice é um índice comparativo, onde x representa as imagens a serem testadas e y representa a imagem referência. Neste caso, as imagens CCD/CBERS-2 originais e restauradas foram testadas (x) e, como referência, utilizou-se a imagem SPOT (y), devido à sua boa qualidade radiométrica.

$$IQI = \frac{4\sigma_{xy} \bar{x}\bar{y}}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) [(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2]} \quad (5.1)$$

O IQI modela as distorções nas imagens como uma combinação de três fatores: perda de correlação, distorção de brilho e distorção de contraste. Para o entendimento dessa

questão, Wang e Bovik (2002) reescrevem o índice como um produto de três componentes (Equação 5.2).

$$IQI = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \cdot \frac{2\bar{x}\bar{y}}{(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2} \cdot \frac{2\sigma_x \sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} , \quad (5.2)$$

onde a primeira componente representa o coeficiente de correlação entre x e y , que pode variar de -1 a 1, e seu melhor valor seria 1 obtido quando $y_i = ax_i + b$, para todos os valores de i quando a e b são constantes e $a > 0$. A segunda componente mede a variação de iluminação entre x e y , e pode variar entre 0 e 1, sendo igual a 1 quando a média de x for igual à média de y . A terceira componente mede quão similar é o contraste entre as imagens, seu range de valores é também de 0 a 1, e seu melhor valor é obtido quando a variância de x é igual à variância de y . Os valores de IQI são apresentados na Tabela 5.2. Quanto mais próximos de 1 os valores de IQI, mais próxima está a imagem testada da imagem referência.

TABELA 5.2 – IQI.

Imagem		IQI - Rio	IQI - Goiânia	IQI - Batatais
B2	CBERS	0,59	0,34	0,43
	Rest1	0,61	0,39	0,46
	Rest2	0,61	0,40	0,46
	Rest3	0,61	0,42	0,47
B3	CBERS	0,13	0,13	0,17
	Rest1	0,14	0,15	0,18
	Rest2	0,14	0,16	0,19
	Rest3	0,14	0,16	0,19
B4	CBERS	0,79	0,34	0,52
	Rest1	0,80	0,39	0,55
	Rest2	0,81	0,40	0,56
	Rest3	0,81	0,42	0,56

Pode-se observar que os valores de IQI das imagens restauradas são maiores que o IQI das imagens CBERS originais, o que indica que todos os processos de restauração resultaram em melhoria de qualidade das imagens CBERS.

Entretanto, como observado na análise de variância, a melhoria na qualidade das imagens restauradas em relação às imagens originais não foi suficiente para equiparar com a qualidade radiométrica das imagens SPOT. Isto é explicado pelo fato de a degradação da resolução espacial das imagens CBERS no processo de imageamento estar em um nível acima do qual não se consegue recuperar com eficiência a informação de detalhes.

Tendo isto em mente, é esperado que os valores de IQI sejam baixos, visto que as imagens CBERS e SPOT apresentam características radiométricas diferentes. Portanto, foi analisada a porcentagem de melhoria de IQI para efeito de comparação da qualidade das imagens restauradas em relação às imagens originais. Os resultados são

apresentados em forma de colunas nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9. Tabelas de porcentagem do IQI estão no Apêndice B.

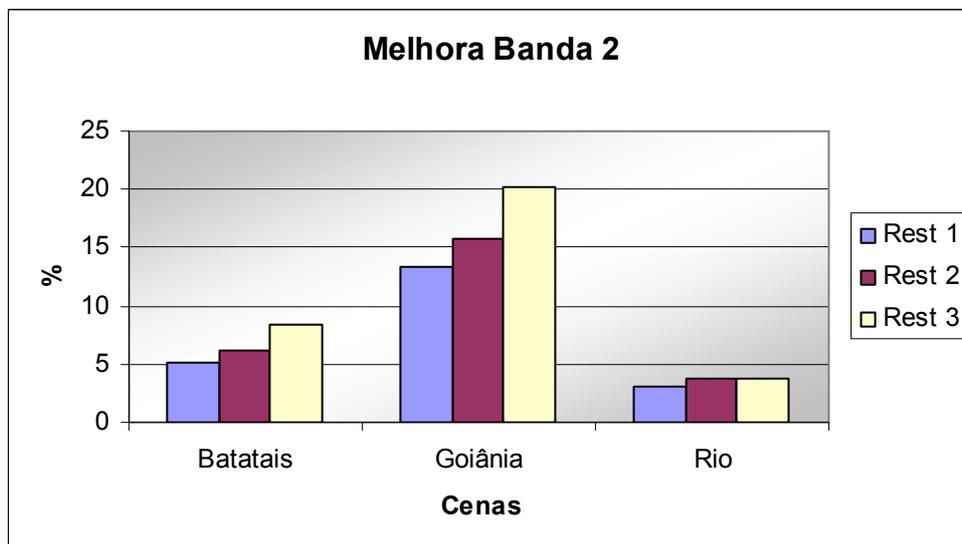


FIGURA 5.7 – Porcentagem do IQI Banda 2 CCD/CBERS-2.

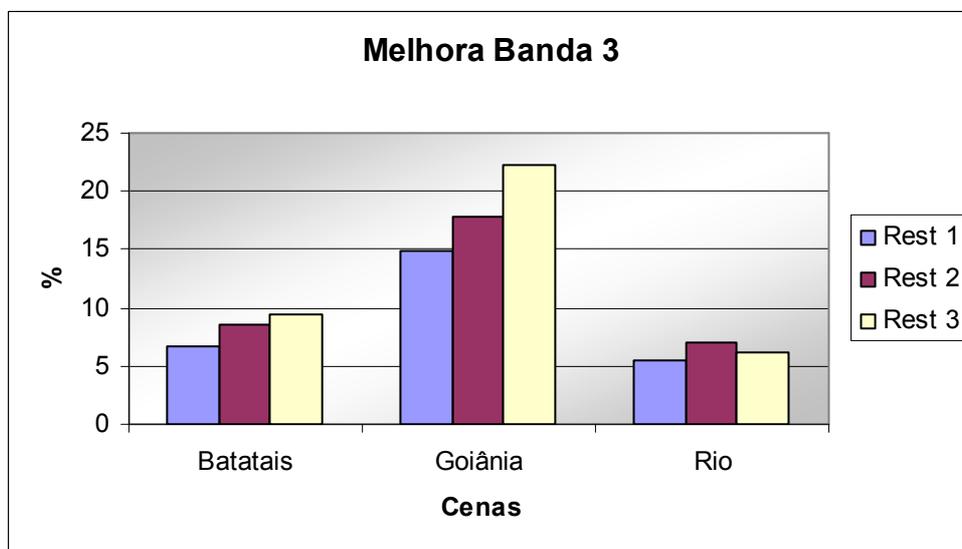


FIGURA 5.8 – Porcentagem de melhora Banda 3 CCD/CBERS-2.

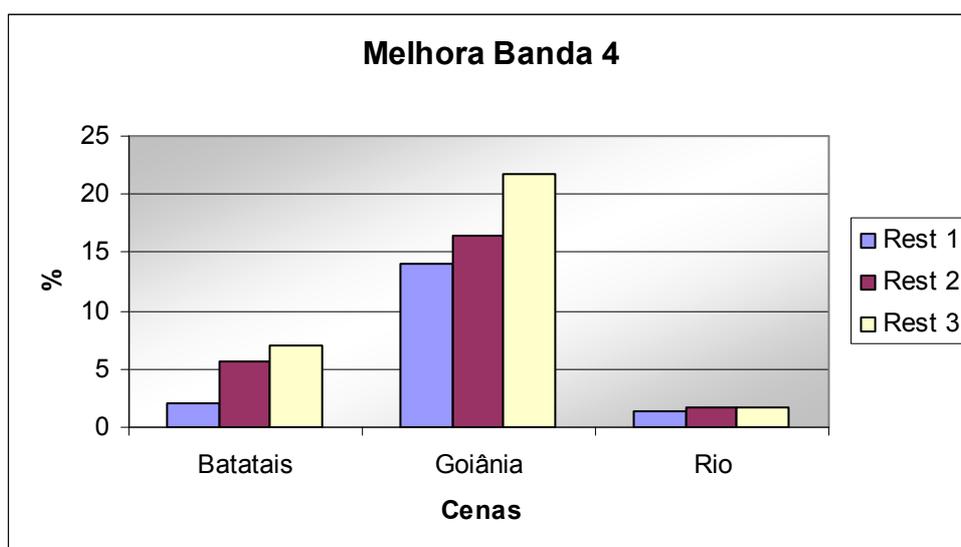


FIGURA 5.9 – Porcentagem de melhora Banda 4 CCD/CBERS-2.

Em termos percentuais, o método de restauração Rest3 foi o que apresentou melhores resultados nos casos das imagens de Batatais e Goiânia. Em relação à quantidade de informação, é perceptível em todas as bandas que a maior porcentagem de melhora ocorreu nas imagens de Goiânia.

Tendo em mente que os algoritmos de restauração apresentam um efeito de realce mais perceptível em feições lineares, isto pode explicar o fato de as imagens de Goiânia terem apresentado melhores resultados por possuírem, praticamente, somente áreas urbanas. Por outro lado, as imagens de Batatais e Rio de Janeiro apresentam, além da área urbana, uma grande porção de áreas agrícolas e oceano, respectivamente.

Uma outra forma de avaliar o efeito dos filtros de restauração é por meio da auto-correlação. O parâmetro de auto-correlação indica o quanto um pixel é semelhante ao pixel vizinho; quanto mais diferentes forem os valores de ND entre si, menor o valor da auto-correlação. No processo de restauração, o valor de nível de cinza do pixel processado é alterado de forma que a variação de ND entre o pixel a ser processado e a sua vizinhança aumente. Isto faz com que o valor de correlação entre o pixel processado e a sua vizinhança fique menor, o que equivale a dizer que houve um realce de detalhes na imagem.

A auto-correlação foi calculada com Lag 1 e Lag 2 para as imagens restauradas. Sendo Lag 1 a análise de um pixel com seus vizinhos mais próximos (distância igual a 1 pixel) e Lag 2 a análise do pixel com seus vizinhos cuja distância é igual a dois pixels.

As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam os coeficientes de auto-correlação (coeficiente médio entre o LAG 1 e 2) para as imagens originais e restauradas em cada uma das cenas analisadas.

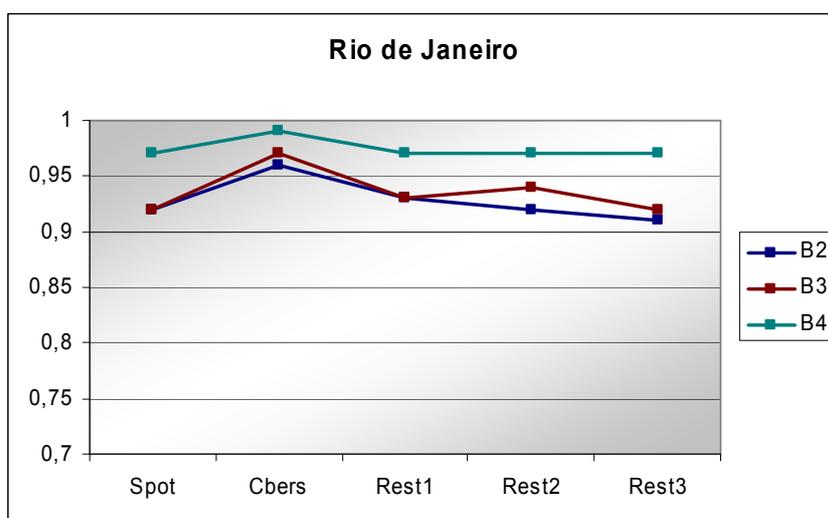


FIGURA 5.10 - Coeficiente de auto-correlação para a cena do Rio de Janeiro.

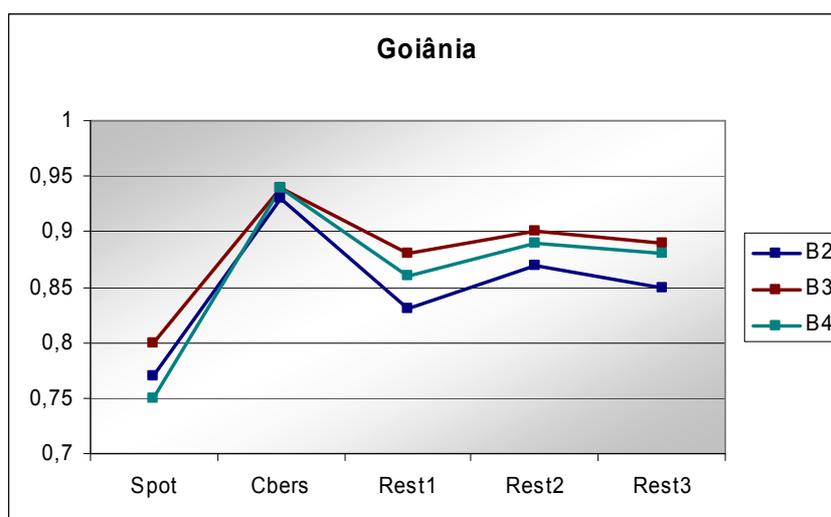


FIGURA 5.11 – Coeficiente de Auto-correlação para a cena de Goiânia.

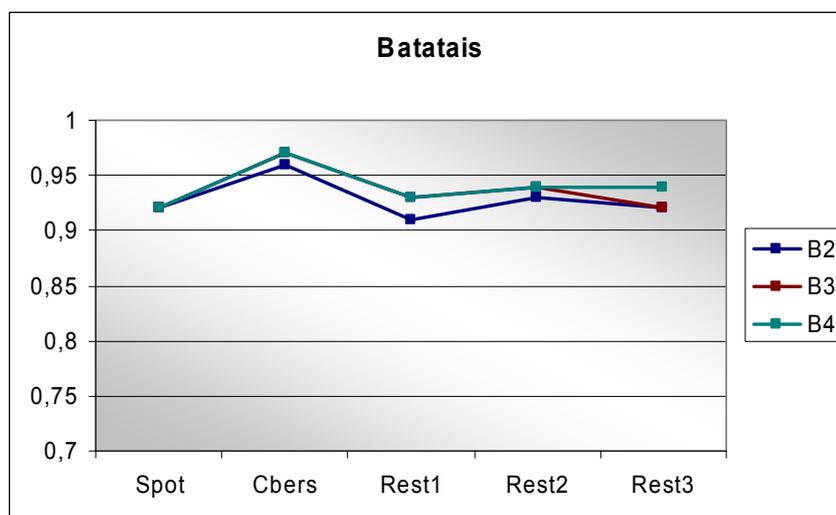


FIGURA 5.12 – Coeficiente de Auto-correlação para a cena de Batatais.

Nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 pode-se observar que a banda 4 apresenta maiores valores de auto-correlação, o que indica um maior borrimento na imagem. As bandas 2 e 3 apresentam uma maior redução nos valores de auto-correlação após a restauração, indicando redução de borrimento e melhoria da qualidade da imagem após a restauração. Pode-se observar que o filtro Rest1 apresenta um menor valor de autocorrelação em praticamente todas as cenas, o que é um indicativo de que as imagens processadas por este filtro apresentam um menor efeito de borrimento.

Um outro indicador da qualidade de informação de uma imagem restaurada é o espectro de Fourier. Mais informações sobre a transformada de Fourier podem ser encontradas em Fonseca (1988), Schowengerdt (1997) e Mather (1999).

Os espectros de Fourier das imagens do Rio de Janeiro, Goiânia e Batatais, para a banda do infravermelho próximo são mostrados nas Figuras 5.13, 5.14 e 5.15, respectivamente. O espectro de Fourier, geralmente, é utilizado para analisar a distribuição das componentes em frequência de um sinal. Quanto mais espalhados os

pontos claros (intensidade das componentes em frequência) na imagem do espectro, maior é o conteúdo em frequências altas da cena imageada.

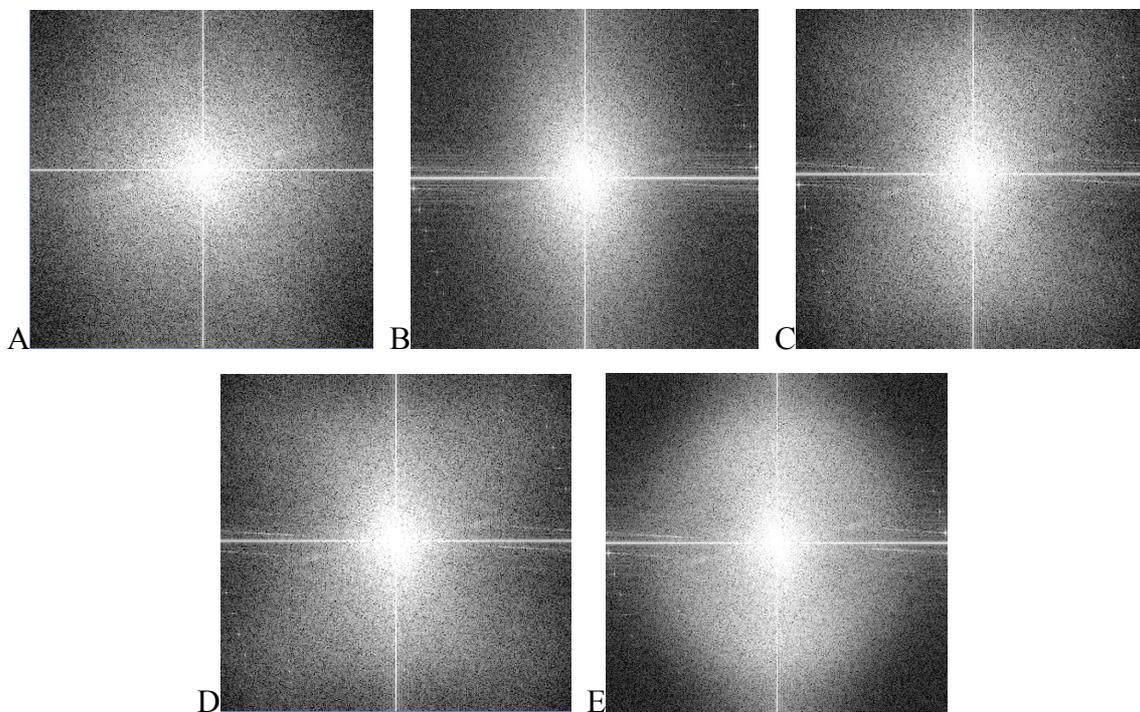


FIGURA 5.13 – Espectro de Fourier para as imagens (a) SPOT original, (b) CBERS original, (c) Rest1, (d) Rest2, (E) Rest3 – Rio de Janeiro.

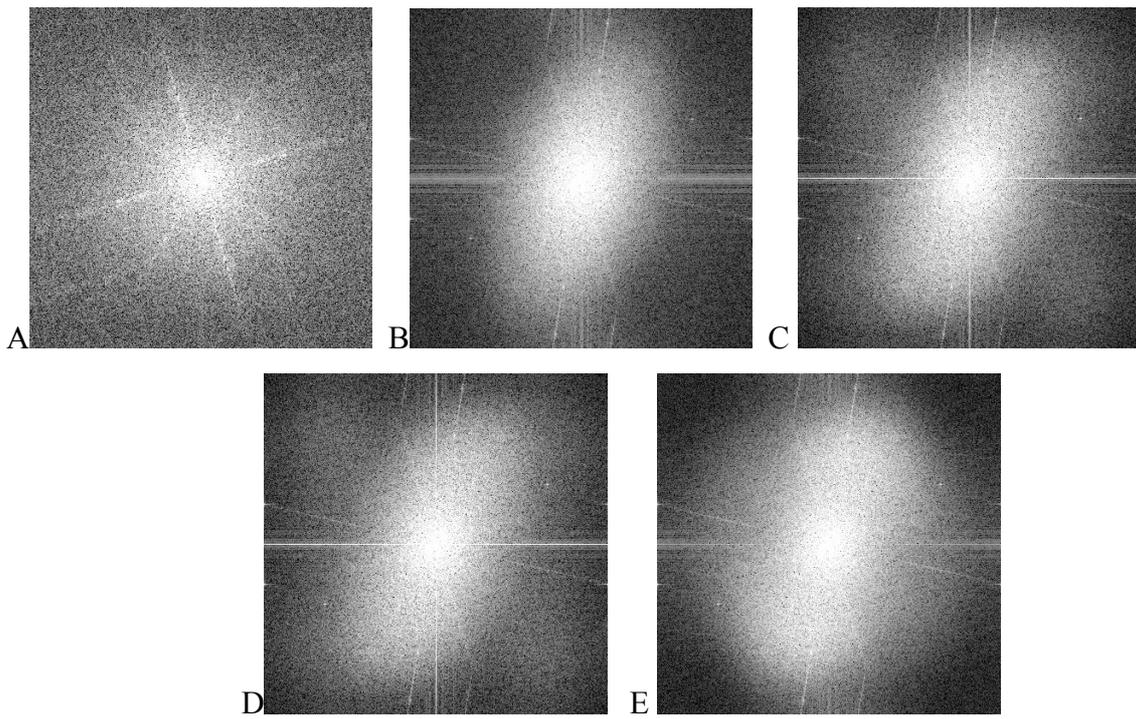


FIGURA 5.14 – Espectro de Fourier para as imagens (a) SPOT original, (b) CBERS original, (c) Rest1, (d) Rest2, (E) Rest3 – Goiânia.

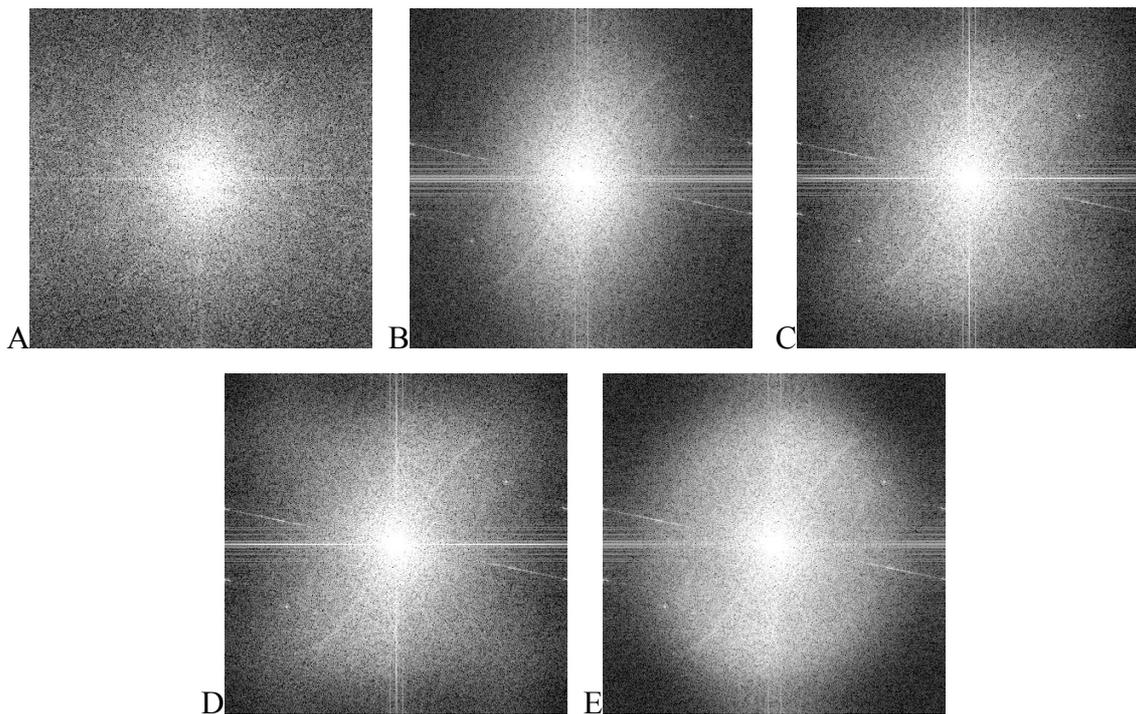


FIGURA 5.15 – Espectro de Fourier para as imagens (a) SPOT original, (b) CBERS original, (c) Rest1, (d) Rest2, (E) Rest3 – Batatais.

Pode-se observar no espectro da imagem SPOT/HRV um maior espalhamento dos pontos claros do que todas as imagens CBERS, entretanto, as imagens restauradas apresentam um maior espalhamento do que a CBERS original. Pode-se concluir que o conteúdo em frequências altas nas imagens restauradas foi aumentado em relação às imagens originais, acrescentando assim informação de detalhes.

Considerando que o ruído é constituído por altas frequências, e que o filtro de restauração atua justamente nestas frequências, é interessante fazer a avaliação do nível de ruído nas imagens. Uma forma de fazer esta avaliação é pela relação ISNR (Improvement Signal to Noise Ratio) (Papa et al., 2005). O índice ISNR é descrito na Equação 5.2.

$$ISNR = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\sum_{i,j} [g(i,j) - f(i,j)]^2}{\sum_{i,j} [\hat{f}(i,j) - f(i,j)]^2} \right\}, \quad (5.2)$$

onde $g(i,j)$, $f(i,j)$ e $\hat{f}(i,j)$ representam, respectivamente, as imagens degradada, original e restaurada. Considerando o fato de que não se dispunha das imagens CBERS não degradadas, foi tomada como imagem de referência a imagem SPOT, como imagem degradada a imagem CCD/CBERS-2 original, e como a restaurada as imagens CBERS restauradas. Além disso, como as imagens SPOT possuem uma qualidade radiométrica superior às imagens CBERS, é esperado que os valores de ISNR sejam relativamente baixos. Os resultados para o cálculo deste índice são apresentados nas Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5.

TABELA 5.3 – ISNR x 10⁻³ – Rio de Janeiro.

	B2	B3	B4
Rest1	1,0	0,5	1,7
Rest2	1,2	0,6	2,1
Rest3	-7,7	-7,3	-20,0

TABELA 5.4 – ISNR x 10⁻³ – Goiânia.

	B2	B3	B4
Rest1	1,8	0,4	2,0
Rest2	2,1	0,5	2,5
Rest3	-7,1	-2,2	-6,5

TABELA 5.5 – ISNR x 10⁻³ - Batatais.

	B2	B3	B4
Rest1	0,6	0,4	1,8
Rest2	0,7	0,5	2,3
Rest3	-3,0	-3,2	-6,1

As Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5 mostram que a imagem Rest2 apresentou, para todas as bandas, o maior valor de ISNR o que representa uma melhor estimativa do sinal. Por outro lado, a imagem Rest3 apresenta, para todas as bandas, o menor valor de ISNR o

que indica que a estimativa do sinal é inferior aos outros filtros. Ou seja, embora o filtro Rest3 tenha gerado imagens com conteúdo em frequências altas, ele pode com isto ter realçado o ruído, porque o ruído é constituído pelas altas frequências. A Figura 5.16 apresenta a cena de Goiânia original (a), Rest2 (b) e Rest3 (c).

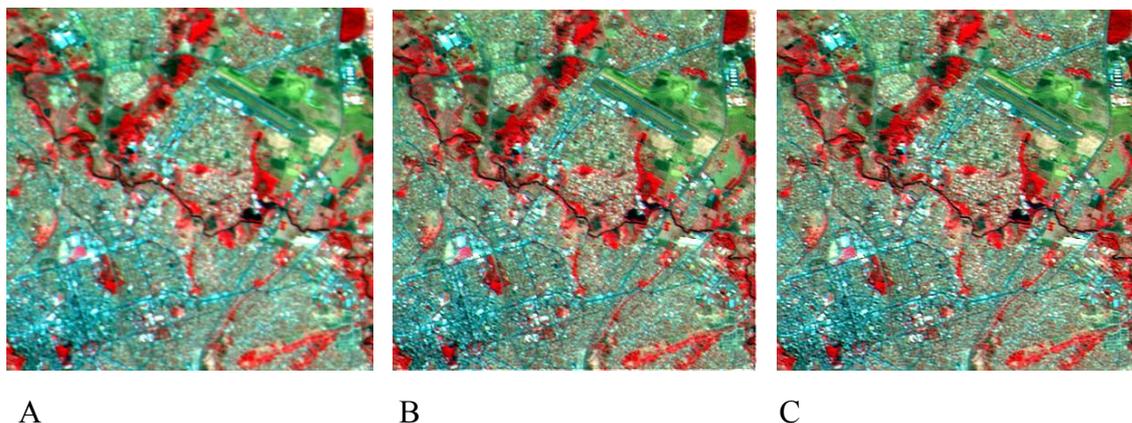


FIGURA 5.16 – Cena CCD/CBERS-2 (158/119) de 24/08/2005, (a) original, (b) Rest2 e (c) Rest 3.

De modo geral, o filtro Rest2 gerou os melhores resultados, pois além de apresentar um bom acréscimo de informação em relação à imagem original, apresentou uma menor quantidade de ruído. Portanto, a técnica de restauração melhor indicada para imagens CCD/CBERS-2 é a restauração por meio do Filtro Inverso Modificado (FIM) – com os valores de EIFOV – X = 45 e EIFOV – Y = 34.

CAPÍTULO 6

ANÁLISE GEOMÉTRICA DE IMAGENS CCD/CBERS-2

Durante o processo de aquisição de imagens, ocorrem distorções sistemáticas que afetam a geometria.

Para a correção dessas distorções deve-se: monitorar mudanças posicionais do centro da cena, realizando uma comparação direta com suas posições correspondentes; avaliar o registro entre bandas buscando detectar e corrigir a não-coincidência geométrica entre as bandas do sensor; determinar a acurácia interna e a acurácia posicional. A acurácia interna define a possibilidade de integração da imagem com outros dados georreferenciados e se refere à posição relativa de pixels com respeito à projeção de referência selecionada no procedimento de correção geométrica. A acurácia posicional determina quão distante uma imagem corrigida está de sua posição verdadeira.

Um dos esforços para garantir a qualidade geométrica das imagens CBERS é o controle do satélite, que garante sua orientação correta e ajuda a manter a órbita dentro de uma faixa desejada. Segundo Bongfang e Haiyan (1997) perturbações na órbita e na atitude promovem distorções geométricas nas imagens.

Segundo Arantes Junior (2005), a orientação de um satélite em relação a um sistema de referência conhecido é denominada atitude, e o movimento de rotação em torno do seu centro de massa é denominado movimento de atitude. Para determinar a atitude de um satélite em relação a um sistema de referência, ele deve estar equipado com sensores que possam fornecer a sua orientação em relação ao Sol, à Terra, ou a alguma estrela fixa, bem como em relação ao vetor do campo magnético terrestre (direção e magnitude).

Segundo Badue (2006), o controle de órbita do satélite consiste em monitorar e corrigir a trajetória, quando necessário, por meio do acionamento de propulsores de bordo, e isto

é necessário para garantir o bom funcionamento do satélite, prolongando sua vida útil e mantendo as características nominalmente projetadas.

O controle e a operação do CBERS-2 são realizados ora pelo Brasil, ora pela China, em períodos alternados de aproximadamente seis meses. Na China o controle é realizado pelo Centro de Controle de Xi'An e no Brasil é realizado pelo Centro de Controle de Satélites do INPE.

O Centro de Controle de Satélites é responsável por diversas operações. Entre elas estão o monitoramento e a correção da trajetória, visando manter a órbita dentro da faixa nominal; a manutenção da sincronia entre o relógio a bordo e o horário da Terra; e a constante atualização dos parâmetros orbitais (CBERS, 2005).

Assim como o Centro de Controle de Satélites, localizado em São José dos Campos, outros setores do INPE contribuem ativamente para a realização do Programa CBERS. São eles:

- O Centro de Missão, em Cachoeira Paulista, que realiza atividades relativas à programação das operações das câmeras dos satélites.
- As estações de “Telemetry, Tracking and Command” (TT&C) em Cuiabá e Alcântara, que são usadas para recepção dos dados brutos, rastreamento do satélite, e telecomando do CBERS.

As características da órbita do satélite CBERS-2 são apresentadas na Tabela 6.1.

TABELA 6.1 – Características da órbita do satélite CBERS-2.

Tipo	Polar / Helio-síncrona
Altitude	778 km
Inclinação	98,504°
Cruzamento do Equador	10h30min local
Período	100,26 min

Diversas forças agem num satélite, afastando-o de sua órbita nominal. Segundo Badue (2006), as principais perturbações são devidas:

- À não esfericidade da distribuição de massa da Terra;
- Ao arrasto produzido pela atmosfera terrestre com o satélite;
- À atração gravitacional de um terceiro corpo, por exemplo, o Sol ou a Lua;
- À pressão da radiação solar;
- À atração de marés terrestres e oceânicas;
- À ação de propulsores a bordo.

Segundo o mesmo autor a principal força não gravitacional que atua em satélites cuja altitude seja inferior a 800km (como os CBERS-1 e 2) é a força devida ao atrito com a atmosfera, conhecida como arrasto atmosférico. Essa força age sempre no sentido oposto ao movimento do satélite, tendendo a freá-lo e diminuir a altitude da órbita².

A estabilização do satélite em relação à sua atitude especificada é feita pelo controle da missão, que tem como função adquirir e manter o satélite numa atitude pré-fixada. As duas configurações básicas para estabilizar satélites são aquelas em um eixo (exemplo SCD1 e SCD2) e em dois eixos, conhecida como estabilização em três eixos, uma vez que estabilizando dois eixos garante-se a estabilização do terceiro eixo (exemplo CBERS-1 e CBERS-2). A estabilização em três eixos pode ser descrita em relação ao sistema orbital. Nesse referencial o movimento em torno da direção da velocidade orbital é denominado *roll* (rolamento). O movimento em torno da direção normal à órbita é denominado *pitch* (arfagem), e, finalmente, o movimento em torno da direção Nadir/Zênite é denominado *yaw* (guinada) (Arantes Junior, 2005).

² Maiores informações sobre o movimento orbital podem ser encontradas em Silva (2001) e Kuga e Kondapalli (1995).

A Figura 6.1 mostra como são posicionados os ângulos roll, pitch e yaw³.

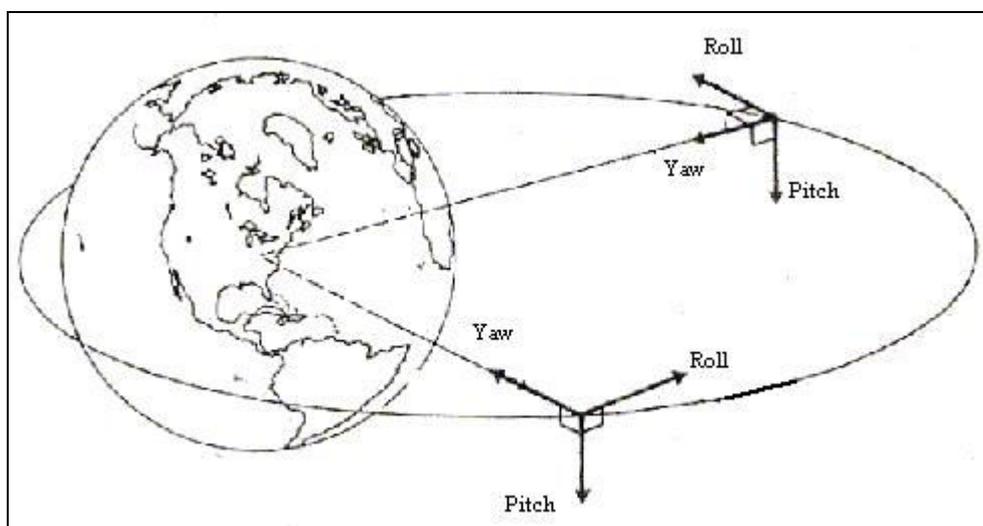


FIGURA 6.1 - Coordenadas de rolamento, arfagem e guinada.
FONTE: Adaptado de Wertz (1978).

Pesquisadores do INPE têm realizado regularmente testes para avaliar a qualidade geométrica dos dados CBERS. Em um destes experimentos, identificou-se uma diferença posicional entre as imagens CCD/CBERS-2 quando o controle estava sob a responsabilidade do Brasil e as imagens geradas sob o controle da China. Um exemplo visual desta constatação está presente na Figura 6.2 que apresenta os valores do ângulo roll dias antes da mudança de controle entre o Brasil e a China, no dia da mudança (dia 23/03/2005) e dias após a mudança, onde o eixo X representa as órbitas/ponto e o eixo Y os valores do ângulo roll.

³ Em Wertz (1978) e Neto (2001), é descrita a dinâmica de atitude de um satélite, sua determinação e seu controle.

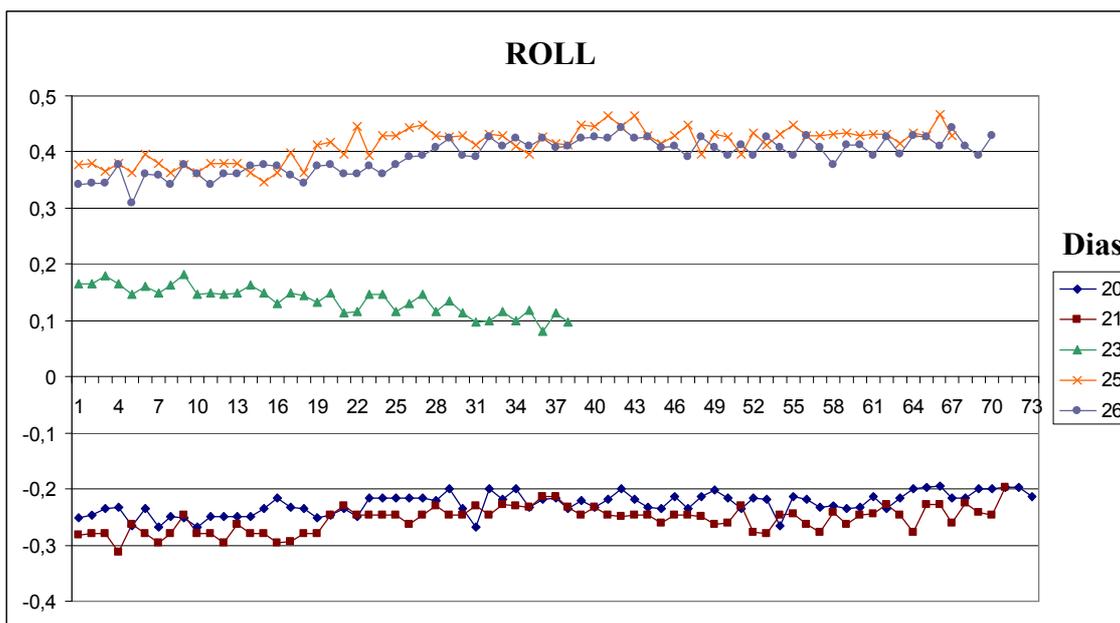


FIGURA 6.2 – Valores de Roll nas datas próximas à 2ª mudança de controle.
 FONTE: Kuga (2006).

Constatada essa variação geométrica, optou-se pela realização de um experimento que verificasse a acurácia posicional das imagens CCD/CBERS-2 em datas próximas as transferências de controle entre o Brasil e a China ao longo da vida útil do sensor.

6.1 Análise Posicional das imagens CCD/CBERS-2

Considerando que diferenças posicionais foram verificadas em consequência da mudança de controle, uma discussão entre pesquisadores brasileiros e chineses identificou que o erro poderia estar sendo causado pelo up-load de efemérides do CBERS-2, pois os outros procedimentos eram realizados independente do país que controlava o satélite.

O up-load de efemérides é um procedimento realizado com o intuito de enviar ao satélite informações sobre seu próprio posicionamento. Após essas informações chegarem ao computador de bordo, é calculada a atitude do satélite, e sua órbita é modificada se necessário. Essa diferença no procedimento de up-load fazia com que o computador de bordo transmitisse de forma errada os valores de atitude.

Após uma análise das efemérides enviadas por ambos os países, foi detectado um erro no algoritmo chinês devido a uma diferença de tempo sideral.

Com a finalidade de melhorar a qualidade das imagens CCD/CBERS-2 disponibilizadas ao usuário, este experimento analisa a acurácia posicional de cenas CCD/CBERS-2 disponíveis gratuitamente no catálogo CBERS e também de cenas geradas com dados de atitude pós-processados.

Chaves (1998) afirma que a análise da qualidade geométrica de dados georreferenciados pode ser realizada a partir do cálculo das discrepâncias entre as coordenadas de um ponto no terreno e sua representação no dado analisado, neste caso imagens CCD/CBERS-2.

Este estudo analisa diferentes cenas de datas próximas às mudanças de controle do CBERS-2 entre o Brasil e a China desde o lançamento do satélite e usa como referência as cenas georreferenciadas GeoCover Landsat⁴ no formato MrSid, também distribuídas gratuitamente na internet.

Para obter a acurácia posicional mede-se um conjunto de pontos de controle sobre a imagem CBERS e compara-os diretamente com as coordenadas dos mesmos pontos sobre uma referência. Os resultados médios dos deslocamentos (ΔE e ΔN) são usados para calcular a acurácia posicional, segundo a Equação 6.1.

$$AP = \sqrt{(\Delta E)^2 + (\Delta N)^2} \quad (6.1)$$

Onde:

AP = Acurácia Posicional;

ΔE = Deslocamento entre a imagem referência e a imagem de estudo na direção leste - oeste;

⁴ <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>

ΔN = Deslocamento entre a imagem referência e a imagem de estudo na direção norte – sul.

Imagens provenientes de dados de atitudes pós-processadas foram geradas. Entende-se que com esses dados é possível gerar imagens geometricamente mais precisas que as imagens geradas com dados de atitudes transmitidos durante a passagem do satélite. Para analisar essa questão, foram escolhidas imagens de datas próximas às mudanças de controle de órbita entre o Brasil e a China.

O CBERS-2 foi lançado em 21/10/2003 sendo controlado pela China até dia 23/07/2004, onde ocorreu a 1ª mudança de controle, passando então para o Brasil. O controle retornou aos cuidados da China em 23/03/2005 quando ocorreu a 2ª mudança de controle. A 3ª mudança de controle ocorreu em 23/10/2005 quando o CBERS-2 voltou a ser controlado pelo Brasil. A 4ª mudança de controle ocorreu em 23/04/2006, quando o CBERS-2 voltou a ser controlado pela China.

Para a análise geométrica das cenas CCD/CBERS-2 foram utilizadas como referência as imagens ortorretificadas GeoCover Landsat com resolução espacial de 14,25m, que foram transformadas de WGS-84 para o Datum SAD-69.

Pontos homólogos foram identificados nas três imagens: CCD/CBERS-2 original, CCD/CBERS-2 pós-processada e a referência GeoCover Landsat. A acurácia posicional foi então calculada.

As Tabelas que apresentam as coordenadas obtidas em pontos homólogos das imagens referência, CCD/CBERS-2 originais e CCD/CBERS-2 pós-processadas para cada uma das datas em estudo estão disponíveis no Apêndice C.

6.1.1 Primeira Mudança de Controle

Dados de atitude da 1ª mudança de controle foram recuperados com dificuldade, de forma que foi possível apenas a disponibilização de pequenos intervalos de atitude, que cobriam apenas alguns segundos das órbitas de interesse e, coincidentemente, não foi encontrada nenhuma imagem sem cobertura de nuvem nesse intervalo, o que

inviabilizou a realização do experimento junto à 1ª data de mudança de controle de órbita.

6.1.2 Segunda Mudança de Controle

A segunda mudança de controle ocorreu em 23/03/2005. Para o experimento foram selecionadas imagens de 20/03/2005 a 26/03/2005, uma órbita/ponto diferente para cada uma das datas.

As Tabelas 6.2, 6.4, 6.6, 6.8, 6.10, 6.12 e 6.14 apresentam em metros o deslocamento de cada ponto das imagens CCD/CBERS-2 em relação à imagem referência GeoCover Landsat, além de sua média e desvio padrão.

DIF1 é a diferença entre as coordenadas da imagem referência e a imagem CCD/CBERS-2 original. DIF2 é a diferença entre a as coordenadas da imagem referência e a imagem CCD/CBERS-2 pós-processada.

O erro de posicionamento de uma imagem é dado pela acurácia posicional. Esses erros foram calculados para as cenas originais e pós-processadas e são apresentados nas Tabelas 6.3, 6.5, 6.7, 6.9, 6.11, 6.13 e 6.15.

Dia 20/03/2005

Cena CCD/CBERS-2: 162/102

Cena Referência: GeoCover Landsat S-22-00_2000

TABELA 6.2 – Diferença entre as coordenadas – 20/03/2005.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	ΔE : 492,8755 ΔN : -4072,328	ΔE : 449,3755 ΔN : -4130,828	ΔE : 489,6255 ΔN : -4043,578	$\overline{\Delta E}$: 477,2922 $\overline{\Delta N}$: -4082,2447	S_E : 24,2311 S_N : 44,4623
DIF 2	ΔE : 6112,8755 ΔN : -8712,328	ΔE : 6069,3755 ΔN : -8510,828	ΔE : 6109,6255 ΔN : -8543,578	$\overline{\Delta E}$: 6097,2922 $\overline{\Delta N}$: -8588,9113	S_E : 24,2311 S_N : 108,1291

TABELA 6.3 – Erro de Posicionamento – 20/03/2005.

Original	4.110,052 m
Pós-processada	10.533,108 m

Dia 21/03/2005

Cena CCD/CBERS-2: 153/111

Cena Referência: GeoCover Landsat S-23-05_2000

TABELA 6.4 – Diferença entre as coordenadas – 21/03/2006.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	ΔE : 1215,6531 ΔN : -2879,7613	ΔE : 948,6531 ΔN : -3092,7613	ΔE : 1021,6531 ΔN : -2960,0113	$\overline{\Delta E}$: 1061,9864 $\overline{\Delta N}$: -2977,5113	S_E : 137,9940 S_N : 107,5729
DIF 2	ΔE : 6112,8755 ΔN : -8712,328	ΔE : 6069,3755 ΔN : -8510,828	ΔE : 6109,6255 ΔN : -8543,578	$\overline{\Delta E}$: 6097,2922 ΔN : -8588,9113	S_E : 130,0346 S_N : 48,9074

TABELA 6.5 – Erro de Posicionamento - 21/03/2006.

Original	3.161,232 m
Pós-processada	9.900,291 m

Dia 22/03/2005

Cena CCD/CBERS-2: 170/093

Cena Referência: GeoCover Landsat N-21-05_2000

TABELA 6.6 – Diferença entre as coordenadas - 22/03/2006.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	ΔE : 579,499 ΔN : -5067,218	ΔE : 400,749 ΔN : -5104,718	ΔE : 510,499 ΔN : -5025,218	$\overline{\Delta E}$: 496,9157 $\overline{\Delta N}$: -5065,718	S_E : 90,1458 S_N : 39,7712
DIF 2	ΔE : 6079,499 ΔN : -8947,218	ΔE : 6060,749 ΔN : -8804,718	ΔE : 6150,499 ΔN : -8985,218	$\overline{\Delta E}$: 6096,9157 ΔN : -8912,3847	S_E : 47,3421 S_N : 95,1582

TABELA 6.7– Erro de Posicionamento - 22/03/2006.

Original	5.090,0318 m
Pós-processada	10.783,064 m

Dia 23/03/2005

Cena CCD/CBERS-2: 161/117

Referência: GeoCover Landsat S-22-15_2000

TABELA 6.8 – Diferença entre as coordenadas - 23/03/2006.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	ΔE : 6331,012 ΔN : -4929,289	ΔE : 6348,512 ΔN : -4943,289	ΔE : 6439,262 ΔN : -5039,039	$\overline{\Delta E}$: 6372,9287 $\overline{\Delta N}$: -4970,539	S_E : 58,1089 S_N : 59,7343
DIF 2	ΔE : 5511,012 ΔN : -7189,289	ΔE : 5528,512 ΔN : -7203,289	ΔE : 6150,499 ΔN : -7459,039	$\overline{\Delta E}$: 5539,5953 $\overline{\Delta N}$: -7283,8723	S_E : 35,4492 S_N : 151,8602

TABELA 6.9 – Erro de Posicionamento - 23/03/2006.

Original	8.082,108 m
Pós-processada	9.151,061 m

Dia 24/03/2005

Cena CCD/CBERS-2: 152/118

Cena Referência: GeoCover Landsat S-23-15_2000

TABELA 6.10 – Diferença entre as coordenadas - 24/03/2006.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	ΔE : 7799,05 ΔN : -7368,599	ΔE : 7784,3 ΔN : -7345,099	ΔE : 7804,8 ΔN : -7364,599	$\overline{\Delta E}$: 7798,45 $\overline{\Delta N}$: -7359,4323	S_E : 10,5741 S_N : 12,5731
DIF 2	ΔE : 5779,05 ΔN : -6688,599	ΔE : 5784,3 ΔN : -6645,099	ΔE : 5784,8 ΔN : -6764,599	$\overline{\Delta E}$: 5782,7167 $\overline{\Delta N}$: -6699,4323	S_E : 3,1853 S_N : 60,4821

TABELA 6.11 – Erro de Posicionamento - 24/03/2006.

Original	10.722,736 m
Pós-processada	8.849,983 m

Dia 25/03/2005

Cena CCD/CBERS-2: 169/108

Cena Referência: GeoCover Landsat S-21-05_2000

TABELA 6.12– Diferença entre as coordenadas – 25/03/2006.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	ΔE : 8718,4404 ΔN : -8416,2380	ΔE : 8823,3892 ΔN : -8438,9452	ΔE : 8767,4088 ΔN : -8454,5592	$\overline{\Delta E}$: 8769,7461 $\overline{\Delta N}$: -8436,5808	S_E : 52,5134 S_N : 19,2697
DIF 2	ΔE : 5658,4404 ΔN : -9836,2380	ΔE : 5743,3892 ΔN : -9938,9452	ΔE : 5707,4088 ΔN : -9814,5592	$\overline{\Delta E}$: 5703,0795 $\overline{\Delta N}$: -9863,2475	S_E : 42,6396 S_N : 66,4462

TABELA 6.13– Erro de Posicionamento - 25/03/2006.

Original	12.168,9910 m
Pós-processada	11.393,3650 m

Dia 26/03/2005

Cena CCD/CBERS-2: 160/113

Cena Referência: GeoCover Landsat S-22-10_2000

TABELA 6.14 – Diferença entre as coordenadas - 26/03/2006.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	$\Delta E: 9373,125$ $\Delta N: -5713,75$	$\Delta E: 9386,125$ $\Delta N: -5838,0$	$\Delta E: 9332,875$ $\Delta N: -5811,0$	$\overline{\Delta E}: 9364,0417$ $\overline{\Delta N}: -5787,5833$	$S_E: 27,7628$ $S_N: 65,3511$
DIF 2	$\Delta E: 5813,125$ $\Delta N: -7353,75$	$\Delta E: 5806,125$ $\Delta N: -7598,0$	$\Delta E: 5752,875$ $\Delta N: -7451,0$	$\overline{\Delta E}: 5790,7083$ $\overline{\Delta N}: -7467,5833$	$S_E: 32,9510$ $S_N: 122,9665$

TABELA 6.15 - Erro de Posicionamento - 26/03/2006.

Original	11.008,242 m
Pós-processada	9.449,714 m

6.1.3 Terceira Mudança de Controle

A terceira mudança de controle ocorreu em 23/10/2005. Para o experimento foram selecionadas imagens de 20/10/2005 a 26/10/2005, uma órbita/ponto diferente para cada uma das datas.

As Tabelas 6.16, 6.18, 6.20, 6.22, 6.24, 6.26 e 6.28 apresentam em metros o deslocamento de cada ponto das imagens CCD/CBERS-2 em relação à imagem referência GeoCover Landsat, além de sua média e desvio padrão.

Os erros de posicionamento (acurácia posicional) das imagens originais e pós-processadas analisadas nesta seção são apresentados nas Tabelas 6.17, 6.19, 6.21, 6.23, 6.25, 6.27 e 6.29.

Dia 20/10/2005

Cena CCD/CBERS-2: 160/122

Cena Referência: GeoCover Landsat S-22-15_2000

TABELA 6.16 – Diferença entre as coordenadas – 20/10/2005.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	$\Delta E: 8595,38$ $\Delta N: -7748,00$	$\Delta E: 8518,13$ $\Delta N: -7791,50$	$\Delta E: 8505,13$ $\Delta N: -7750,75$	$\overline{\Delta E}: 8539,54$ $\overline{\Delta N}: -7763,42$	$S_E: 48,79$ $S_N: 24,36$
DIF 2	$\Delta E: 7295,38$ $\Delta N: -4048,00$	$\Delta E: 7238,13$ $\Delta N: -3971,50$	$\Delta E: 7225,13$ $\Delta N: -3910,75$	$\overline{\Delta E}: 7252,88$ $\overline{\Delta N}: -3976,75$	$S_E: 37,38$ $S_N: 68,78$

TABELA 6.17 - Erro de Posicionamento– 20/10/2005.

Original	11.540,99 m
Pós-processada	8.271,56 m

Dia 21/10/2005

Cena CCD/CBERS-2: 151/125

Cena Referência: GeoCover Landsat S-23-20_2000

TABELA 6.18 – Diferença entre as coordenadas – 21/10/2005.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	$\Delta E: 8608,25$ $\Delta N: -5757,25$	$\Delta E: 8707,75$ $\Delta N: -5774,75$	$\Delta E: 8787,25$ $\Delta N: -5804,75$	$\overline{\Delta E}: 8701,08$ $\overline{\Delta N}: -5778,92$	$S_E: 89,69$ $S_N: 24,02$
DIF 2	$\Delta E: 6388,25$ $\Delta N: -6337,25$	$\Delta E: 6467,75$ $\Delta N: -6554,75$	$\Delta E: 6487,25$ $\Delta N: -6704,75$	$\overline{\Delta E}: 6447,75$ $\overline{\Delta N}: -6532,25$	$S_E: 52,44$ $S_N: 184,78$

TABELA 6.19 - Erro de Posicionamento – 21/10/2005..

Original	10.445,32 m
Pós-processada	9.178,44 m

Dia 22/10/2005

Cena CCD/CBERS-2: 168/119

Cena Referência: GeoCover Landsat S-21-15_2000

TABELA 6.20 – Diferença entre as coordenadas – 22/10/2005..

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	ΔE : 9107,00 ΔN : -6312,63	ΔE : 8923,50 ΔN : -6351,63	ΔE : 9150,25 ΔN : -6382,38	$\overline{\Delta E}$: 9060,25 $\overline{\Delta N}$: -6348,88	S_E : 120,39 S_N : 34,96
DIF 2	ΔE : 7147,00 ΔN : -6592,63	ΔE : 7023,50 ΔN : -6171,63	ΔE : 7150,25 ΔN : -6842,38	$\overline{\Delta E}$: 7106,92 $\overline{\Delta N}$: -4254,75	S_E : 72,26 S_N : 339,00

TABELA 6.21 - Erro de Posicionamento – 22/10/2005.

Original	11.063,29 m
Pós-processada	8.283,19 m

Dia 23/10/2005

Cena CCD/CBERS-2: 159/123

Cena Referência: GeoCover Landsat S-22-20_2000

TABELA 6.22 – Diferença entre as coordenadas – 23/10/2005.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	ΔE : 8663,75 ΔN : -6017,25	ΔE : 8705,75 ΔN : -6020,75	ΔE : 8644,25 ΔN : -5968,25	$\overline{\Delta E}$: 8671,25 $\overline{\Delta N}$: -6002,08	S_E : 31,43 S_N : 29,35
DIF 2	ΔE : 6523,75 ΔN : -6557,25	ΔE : 6545,75 ΔN : -6680,75	ΔE : 6504,25 ΔN : -6488,25	$\overline{\Delta E}$: 6524,58 $\overline{\Delta N}$: -6575,42	S_E : 20,76 S_N : 97,53

TABELA 6.23 - Erro de Posicionamento – 23/10/2005.

Original	10.545,88 m
Pós-processada	9.263,17 m

Dia 24/10/2005

Cena CCD/CBERS-2: 150/106

Cena Referência: GeoCover Landsat S-24-05_2000

TABELA 6.24 – Diferença entre as coordenadas – 24/10/2005.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	ΔE : 8206,00 ΔN : -7354,00	ΔE : 8164,75 ΔN : -7387,75	ΔE : 8171,25 ΔN : -7404,50	$\overline{\Delta E}$: 8180,67 $\overline{\Delta N}$: -7382,08	S_E : 22,18 S_N : 25,72
DIF 2	ΔE : 6446,00 ΔN : -7634,00	ΔE : 6464,75 ΔN : -7267,75	ΔE : 6451,25 ΔN : -7404,50	$\overline{\Delta E}$: 6454,00 $\overline{\Delta N}$: -4967,25	S_E : 9,67 S_N : 185,07

TABELA 6.25 - Erro de Posicionamento – 24/10/2005.

Original	11.019,00 m
Pós-processada	8.144,18 m

Dia 25/10/2005

Cena CCD/CBERS-2:

Cena Referência: GeoCover Landsat

TABELA 6.26 – Diferença entre as coordenadas – 25/10/2005.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	ΔE : 1191,5432 ΔN : -3240,5967	ΔE : 1266,7914 ΔN : -3119,3261	ΔE : 1403,0354 ΔN : -2971,8031	$\overline{\Delta E}$: 1287,1233 $\overline{\Delta N}$: -3110,5753	S_E : 107,2020 S_N : 134,6103
DIF 2	ΔE : 5951,5432 ΔN : -9680,5967	ΔE : 5986,7914 ΔN : -9799,3261	ΔE : 6063,0354 ΔN : -9991,8031	$\overline{\Delta E}$: 6000,4567 $\overline{\Delta N}$: -9823,9086	S_E : 56,9884 S_N : 157,0528

TABELA 6.27 - Erro de Posicionamento – 25/10/2005.

Original	3.366,3578 m
Pós-processada	11.511,5013 m

Dia 26/10/2005

Cena CCD/CBERS-2: 158/120

Cena Referência: GeoCover Landsat S-22-15_2000

TABELA 6.28 – Diferença entre as coordenadas – 26/10/2005.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	ΔE : 603,63 ΔN : -2700,75	ΔE : 685,88 ΔN : -2627,75	ΔE : 564,38 ΔN : -2764,50	$\overline{\Delta E}$: 617,96 $\overline{\Delta N}$: -2697,67	S_E : 62,01 S_N : 68,43
DIF 2	ΔE : 6203,63 ΔN : -9100,75	ΔE : 6245,88 ΔN : -9287,75	ΔE : 6184,38 ΔN : -8864,50	$\overline{\Delta E}$: 6211,29 $\overline{\Delta N}$: -9084,33	S_E : 31,46 S_N : 212,10

TABELA 6.29 - Erro de Posicionamento – 26/10/2005.

Original	2.767,54 m
Pós-processada	8.726,45 m

6.1.4 Quarta Mudança de Controle

A quarta mudança de controle ocorreu em 23/04/2006. Para o experimento foram selecionadas imagens de 21/04/2006 a 25/04/2006, uma órbita/ponto diferente para cada uma das datas.

As Tabelas 6.30, 6.32, 6.34, 6.36 e 6.38 apresentam em metros o deslocamento de cada ponto das imagens CCD/CBERS-2 em relação à imagem referência GeoCover Landsat, sua média e desvio padrão.

A acurácia posicional (erro de posicionamento) das imagens analisadas nesta seção são apresentadas nas Tabelas 6.31, 6.33, 6.35, 6.37 e 6.39.

Dia 21/04/2006

Cena CCD/CBERS-2: 151/104

Cena Referência: GeoCover Landsat S-24-00_2000

TABELA 6.30 – Diferença entre as coordenadas – 21/04/2006.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	ΔE : 300,938 ΔN : -2150,601	ΔE : 284,938 ΔN : -2081,601	ΔE : 184,438 ΔN : -2159,101	$\overline{\Delta E}$: 256,7713 $\overline{\Delta N}$: -2130,4343	S_E : 63,1513 S_N : 42,5039
DIF 2	ΔE : 6000,938 ΔN : -8730,601	ΔE : 6044,938 ΔN : -8901,601	ΔE : 6024,438 ΔN : -8519,101	$\overline{\Delta E}$: 6023,438 $\overline{\Delta N}$: -8717,101	S_E : 22,0170 S_N : 191,6070

TABELA 6.31 - Erro de Posicionamento – 21/04/2006.

Original	2.145,852 m
Pós-processada	10.595,738 m

Dia 22/04/2006

Cena CCD/CBERS-2 168/102

Cena Referência: GeoCover Landsat S-21-00_2000

TABELA 6.32 – Diferença entre as coordenadas – 22/04/2006.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	ΔE : 168,875 ΔN : -2074,0	ΔE : 281,625 ΔN : -2015,75	ΔE : 224,125 ΔN : -2104,0	$\overline{\Delta E}$: 224,875 $\overline{\Delta N}$: -2064,5833	S_E : 56,3787 S_N : 44,8723
DIF 2	ΔE : 5928,875 ΔN : -9294,0	ΔE : 6021,625 ΔN : -9315,75	ΔE : 6004,125 ΔN : -9484,0	$\overline{\Delta E}$: 5984,875 $\overline{\Delta N}$: -9364,5833	S_E : 49,2804 S_N : 103,9881

TABELA 6.33 - Erro de Posicionamento – 22/04/2006.

Original	2.076,794 m
Pós-processada	11.113,692 m

Dia 23/04/2006

Cena CCD/CBERS-2: 159/106

Cena Referência: GeoCover Landsat S-23-05_2000

TABELA 6.34 – Diferença entre as coordenadas – 23/04/2006.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	ΔE : 4,274 ΔN : -1863,37	ΔE : 9,774 ΔN : -1804,87	ΔE : 13,024 ΔN : -1859,87	$\overline{\Delta E}$: 9,024 $\overline{\Delta N}$: -1842,71	S_E : 4,4230 S_N : 32,8113
DIF 2	ΔE : 5904,274 ΔN : -8063,37	ΔE : 5909,774 ΔN : -8024,87	ΔE : 5953,024 ΔN : -8019,87	$\overline{\Delta E}$: 5922,357 $\overline{\Delta N}$: -8036,04	S_E : 26,7001 S_N : 23,8030

TABELA 6.35 - Erro de Posicionamento – 23/04/2006.

Original	1.842,732 m
Pós-processada	9.982,597 m

Dia 24/04/2006

Cena CCD/CBERS-2: 176/099

Cena Referência: GeoCover Landsat N-20-00_2000

TABELA 6.36 – Diferença entre as coordenadas – 24/04/2006.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	ΔE : -98,284 ΔN : -2483,184	ΔE : -113,284 ΔN : -2717,434	ΔE : 244,716 ΔN : -2502,434	$\overline{\Delta E}$: 11,0493 $\overline{\Delta N}$: -2567,778	S_E : 202,5002 S_N : 130,0440
DIF 2	ΔE : 6121,716 ΔN : -8623,184	ΔE : 6166,716 ΔN : -7797,434	ΔE : 6324,716 ΔN : -8842,434	$\overline{\Delta E}$: 6204,3827 $\overline{\Delta N}$: -8421,0173	S_E : 106,6130 S_N : 551,0533

TABELA 6.37 - Erro de Posicionamento – 24/04/2006.

Original	2.567,802 m
Pós-processada	10.459,823 m

Dia 25/04/2006

Cena CCD/CBERS-2: 169/108

Cena Referência: GeoCover Landsat S-21-05_2000

TABELA 6.38 – Diferença entre as coordenadas – 25/04/2006.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Desvio Padrão
DIF 1	ΔE : 202,375 ΔN : -2585,875	ΔE : 229,875 ΔN : -2609,875	ΔE : 248,875 ΔN : -2594,875	$\overline{\Delta E}$: 227,0417 $\overline{\Delta N}$: -2596,875	S_E : 23,3791 S_N : 12,1244
DIF 2	ΔE : 6142,375 ΔN : -8805,875	ΔE : 6169,875 ΔN : -8709,875	ΔE : 6188,875 ΔN : -8874,875	$\overline{\Delta E}$: 6167,0417 $\overline{\Delta N}$: -8796,875	S_E : 23,3791 S_N : 82,8674

TABELA 6.39 - Erro de Posicionamento – 25/04/2006.

Original	2.606,782 m
Pós-processada	10.743,249 m

6.1.5 Análise Posicional

Para meio de comparação entre as datas, as médias das diferenças entre a imagem referência e a imagem CCD/CBERS-2 original são apresentadas nas Figuras 6.3, 6.4 e 6.5. As médias das diferenças entre a imagem referência e a imagem CCD/CBERS-2 pós-processadas são apresentadas na Figura 6.6, 6.7 e 6.8.

Em todas as figuras as linhas vermelhas representam as médias do deslocamento em cada direção.

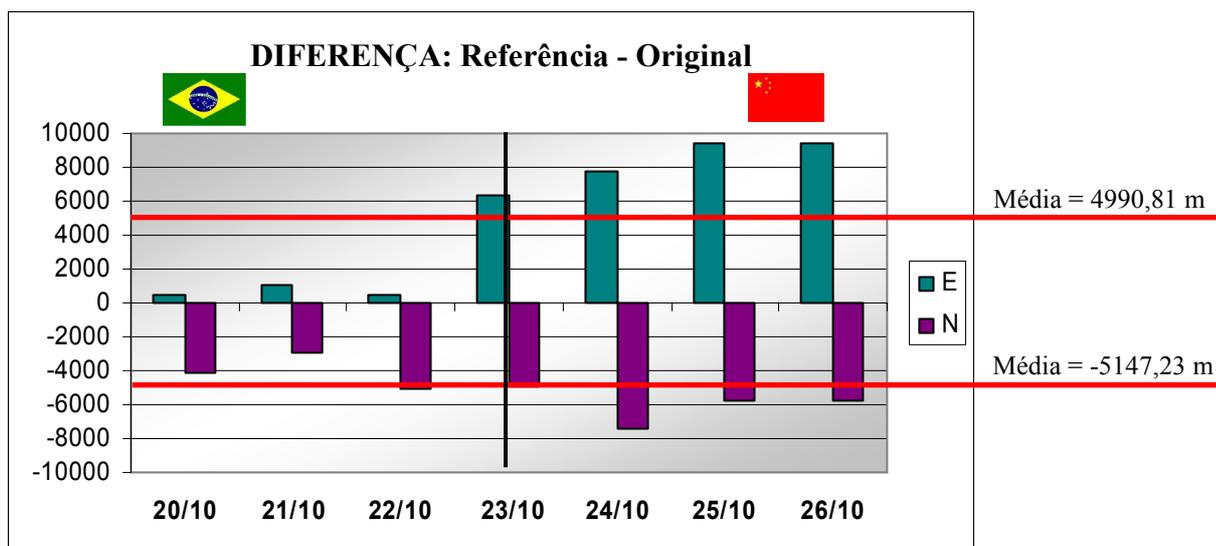


FIGURA 6.3 – Diferença entre as imagens referência e a as imagens originais – 2ª Mudança de Controle.

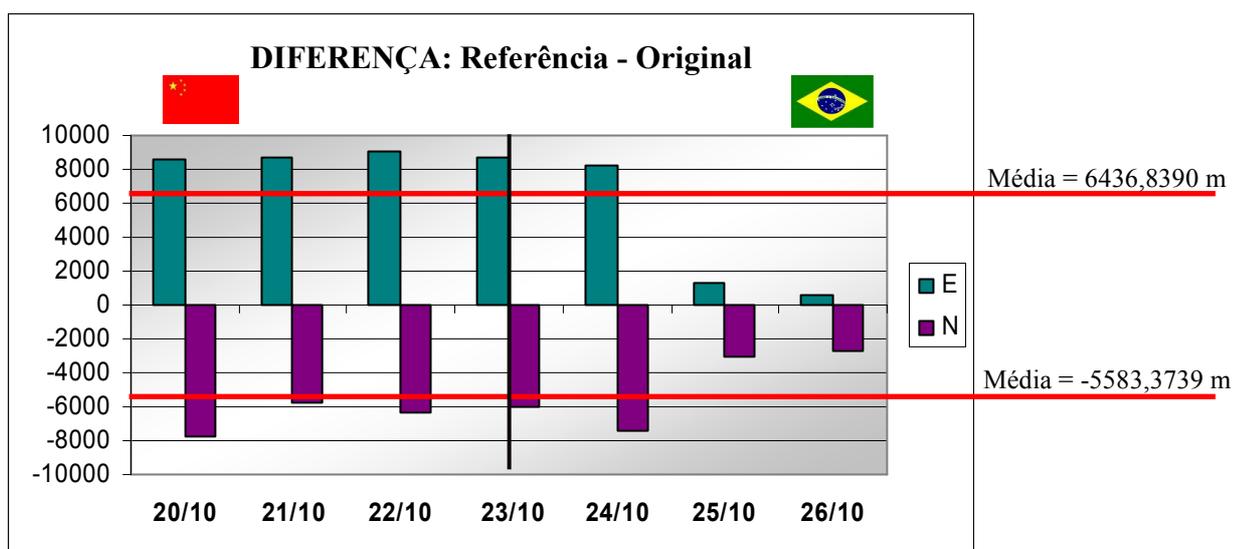


FIGURA 6.4 - Diferença entre as imagens referência e a as imagens originais - 3ª Mudança de Controle.

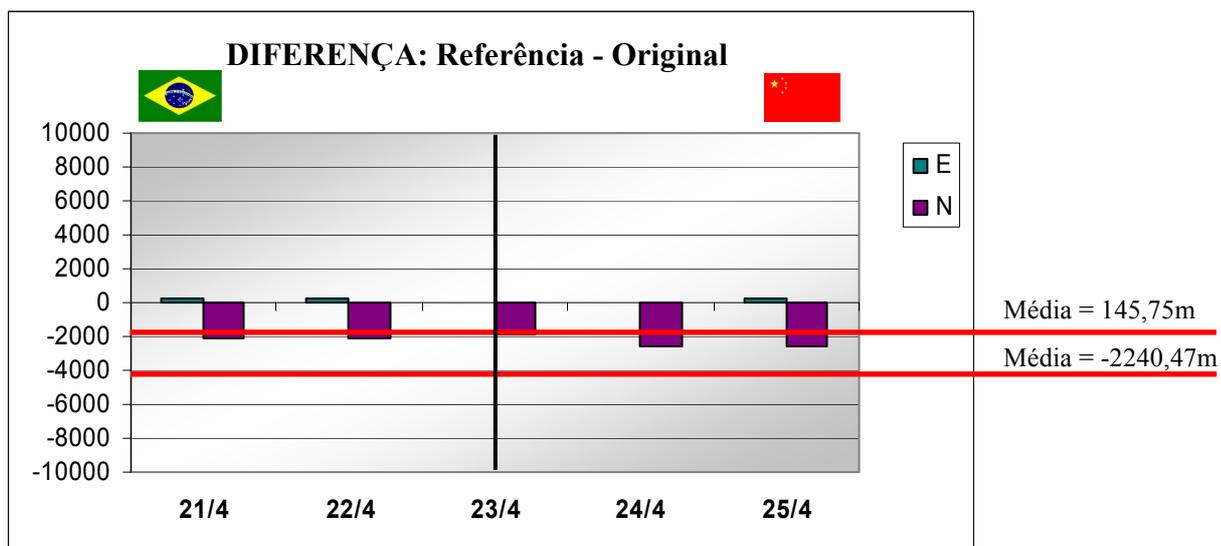


FIGURA 6.5 - Diferença entre as imagens referência e a as imagens originais – 4ª Mudança de Controle.

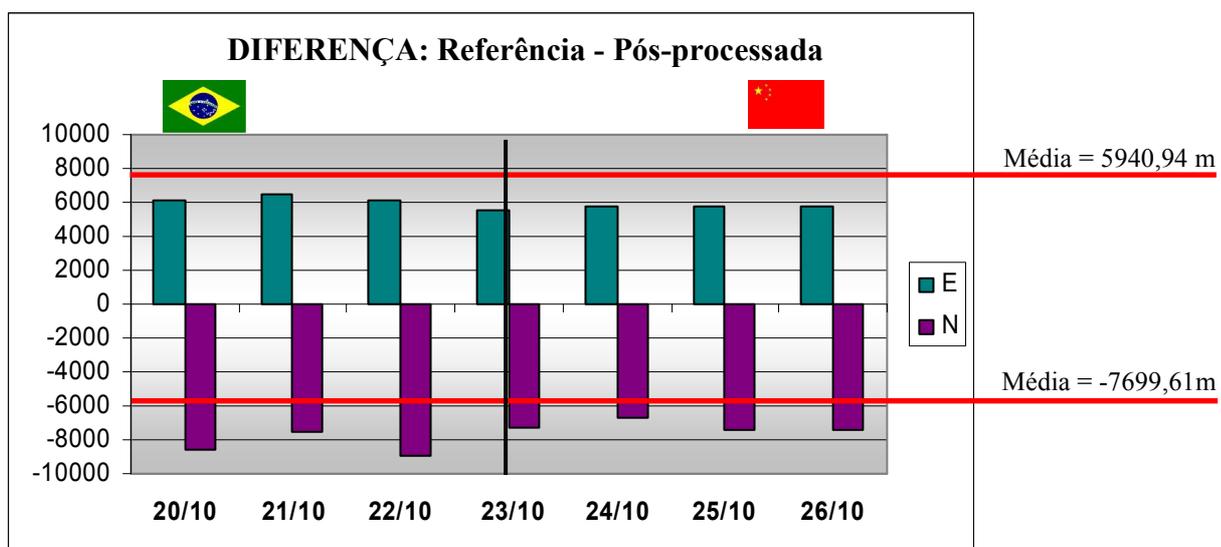


FIGURA 6.6 – Diferença entre as imagens referência e a as imagens pós-processadas - 2ª Mudança de Controle.

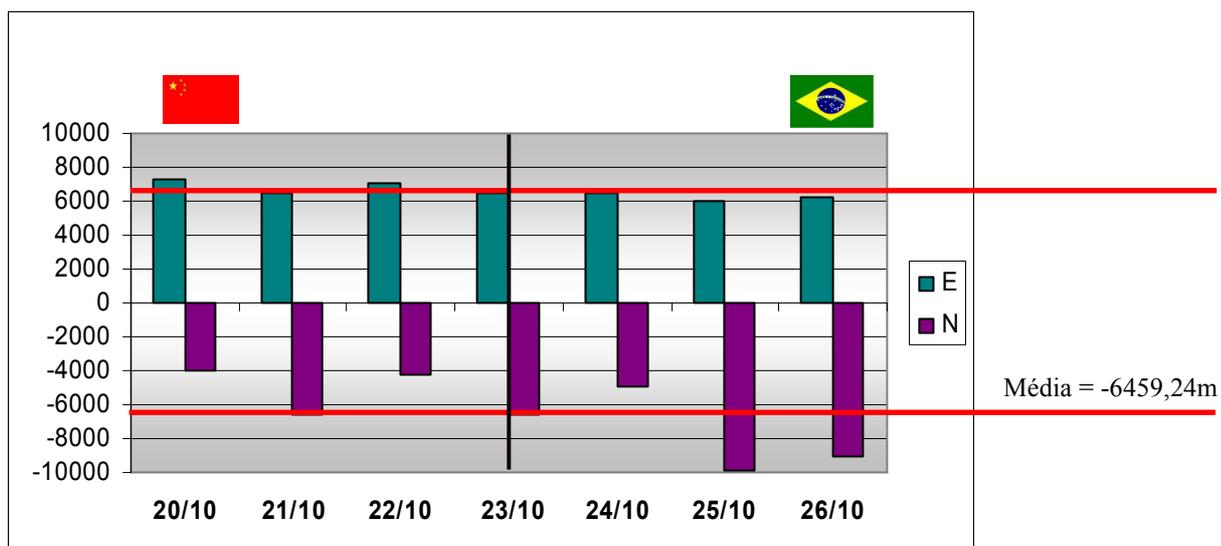


FIGURA 6.7 – Diferença entre as imagens referência e a as imagens pós-processadas – 3ª Mudança de Controle.

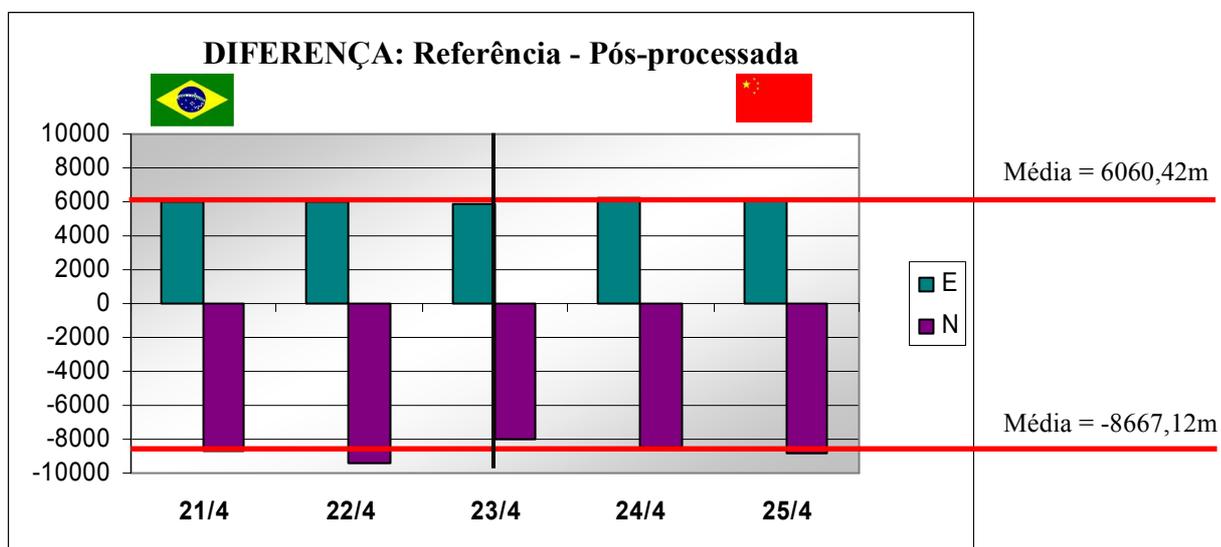


FIGURA 6.8 – Diferença entre as imagens referência e a as imagens pós-processadas - 4ª Mudança de Controle.

Nota-se que as Figuras 6.3 e 6.4, referentes a 2ª e 3ª mudança de controle apresentam uma variação nítida em torno das datas de mudança. Já a Figura 6.5 não apresenta essa variação nítida, pois nesta data a correção do erro posicional já tinha sido implantada no procedimento Chinês.

As Figuras 6.6, 6.7 e 6.8 geradas a partir do deslocamento das imagens pós-processadas são bem similares e apresentam seus deslocamentos e médias bem similares. Isso ocorre, pois neste caso os cálculos para a geração de todas as imagens são realizadas por um único método, que independe das informações enviadas pelo satélite.

Antes da última mudança, as imagens originais apresentam deslocamentos posicionais variados ao passo que as imagens pós-processadas apresentam um deslocamento padrão na direção E e na direção N.

Os resultados obtidos na direção E são mais constantes que os resultados em N isso ocorre pois além das distorções geométricas gerais, a direção N sofre influência da órbita do satélite, pois ao imagear ele está se movimentando na mesma direção.

A acurácia posicional calculada mostrou que as imagens originais apresentaram um erro variável, ao passo que as imagens pós-processadas apresentaram um erro praticamente constante.

A Figura 6.10 mostra em azul o erro posicional das imagens originais ao longo da vida útil do CBERS-2, enquanto em vermelho é apresentado, o erro posicional das imagens pós-processadas.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou uma análise de características radiométricas e geométricas do CBERS2-CCD que apresentam impacto na qualidade das imagens. Foram analisados os efeitos de saturação e da degradação da resolução espacial assim como o erro de posicionamento do sensor.

Foi proposta uma metodologia para estimar os valores de ND dos pixels da banda 4 cuja informação foi perdida pelo efeito de saturação. Os resultados dos experimentos para reparação deste efeito mostrou que devido a baixa correlação entre a banda saturada (infravermelho próximo) e as outras bandas do sensor (bandas do visível) do sensor CCD/CBERS-2, a metodologia utilizada é indicada apenas para solucionar o problema da saturação quando a banda saturada possui, no mesmo sensor, outras bandas correlacionadas, como é o caso da TM/Landsat-5.

Para a correção efetiva do efeito de saturação das imagens CBERS, recomenda-se que os próximos sensores da série apresentem o controle do ganho de forma individual. Ou seja, cada banda deve possuir seu próprio controle de ganho, podendo assim ser alterado sempre que necessário, para que o sensor possa captar corretamente os valores de energia em qualquer época do ano sem apresentar o fenômeno da saturação.

Com relação ao problema de degradação da resolução espacial das imagens CBERS-CCD, o uso de filtros de restauração sobre as imagens CCD/CBERS-2 permitiu a geração de imagens com maior realce de detalhes. Os parâmetros dos filtros de restauração foram selecionados a partir de uma análise visual das imagens restauradas. O filtro inverso modificado com EIFOV (X) = 45 e EIFOV (Y) = 34 apresentou bons resultados no realce das componentes em altas frequências, sem realce do ruído.

Para tanto, recomenda-se para análises futuras, o uso de um método mais eficaz na identificação de ruídos. Sugere-se também uma análise mais aprofundada em relação aos valores de EIFOV, baseando-se no trabalho de Gouvêa (2006).

Outra sugestão seria o fornecimento de imagens restauradas ao usuário CBERS. Esta pode ser uma alternativa que possibilitaria ao usuário a escolha entre a aquisição de imagens restauradas ou não.

O experimento referente à geometria do sensor CCD/CBERS-2 permitiu o cálculo do erro de posicionamento de imagens originais e imagens geradas por meio de atitude pós-processadas. Para este estudo foram consideradas como referência as imagens ortorretificadas GeoCover Landsat. Os resultados mostraram que as imagens originais, disponibilizadas em catálogo, apresentam um erro de posicionamento variável, enquanto as imagens pós-processadas apresentam um erro posicional praticamente constante.

A partir da constatação dessa variabilidade no erro posicional das imagens originais, um erro de up-load de efemérides foi identificado. Este erro foi corrigido antes da quarta mudança de controle, entretanto as imagens geradas antes da correção apresentam esse deslocamento. Sugere-se então a geração de imagens pós-processadas e a implementação do deslocamento médio (9.800m) encontrado neste experimento, gerando assim imagens mais precisas geometricamente.

Antes da implementação do método, o aumento do número de pontos de controle utilizados deve ser considerado. Este maior número de pontos possibilitaria uma maior precisão no resultado do experimento, além de permitir o cálculo do erro interno de cada uma das imagens utilizadas, no que se refere à posição de cada pixel em relação à projeção de referência utilizada na correção geométrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, L. L.; Tommaselli, A. M. G. Melhora da resolução espacial a partir de seqüências de imagens. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.9, n.2, p.163-178, 2003.

Badue, G. S. **Estimação de erros de efemérides orbitais e de atitude por meio de pontos de controle**. 2006. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais / Mecânica e Controle) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Bensebaa, K. **Estimação da resolução espacial da câmera CCD dos satélites CBERS 1 e 2**. 2005-03-21. 90 p. (INPE-13597-TDI/1036) Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.

Bensebaa, K.; Banon, G. J. F.; Fonseca, L. M. G. On-orbit spatial resolution estimation of CBERS-1 CCD imaging system from bridge images. In: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 20., 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey. **Proceedings...** Istanbul: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004. v.35, Part B1, p.36-41.

Boggione, G. A. **Restauração de imagens do satélite Landsat-7**. 2003-06-17. 160 p. (INPE-10462-TDI/929). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2003. Disponível na biblioteca digital URLib:

<<http://iris.sid.inpe.br:1912/rep-sid.inpe.br/jeferson/2003/08.19.08.48>>. Acesso em: 13 fev. 2005.

Boletim Agência Fapesp. **Novo satélite será montado no Brasil**. Disponível em:

<[http://www.agencia.fapesp.br/boletim_dentro.php?data\[id_materia_boletim\]=2957](http://www.agencia.fapesp.br/boletim_dentro.php?data[id_materia_boletim]=2957)>

Acesso em: 06 dez 2004.

Bongfang, W.; Haiyan, L. A. A simplified method of accurate geometric correction for NOAA AVHRR 1B data. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, n.8, p.1-21, 1997.

China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS). **Programa CBERS**. São José dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://www.CBERS.inpe.br/>>. Acesso em fevereiro 2005.

Chaves, E. E. D. **Análise da qualidade de dados georreferenciados utilizando a tecnologia GPS**. 1998. 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos. 1998.

D’Alge, J.; Cartaxo, R.; Erthal G. **Geometric quality assessment of CBERS-2**. São José dos Campos: INPE, 2004. 17p. (APPL-13-2004, 1.2).

D’Alge **CBERS-**: attitude control and its effects on image geometric correction. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006). Comunicação pessoal.

Dowdeswell, J. A.; McIntyre, N. F. The saturation of LANDSAT MSS detectors over large ice masses. **International Journal of Remote Sensing**, n.7, v.1, p.151-164, 1986.

Fonseca, L. M. G. **Restauração e Interpolação de Imagens do Satélite Landsat por meio de Técnicas de projeto de filtros FIR**. 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos. 1988.

Fonseca, L.M.G.; Prasad, G. S. S. D e Mascarenhas, N. D. A. Combined Interpolation-Restoration of Landsat Images Through a FIR Filter Design Techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v.13, n.14, p.1247-2561, 1993.

Fonseca, L. M. G. **Processamento digital de imagens**. Notas de aula ministradas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, p.105, 2004.

Fonseca, L. M. G. ; Ponzoni, F.; Cartaxo, R. **Radiometric quality assessment of CBERS-2**. São José dos Campos: INPE, 2004. 17p. (APPL-06-2004, 1.1).

Gouvêa, E. J. C. **Restauração de imagens CBERS-2/CCD usando técnicas de mineração de dados**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006). Comunicação pessoal.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Seminário de aplicações do CBERS-2: 2º ano de sucesso**. São José dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/seminarioCBERS/index.htm>>. Acesso em junho 2006.

Itten, K. I.; Meyer, P. Geometric and radiometric correction of TM data of mountainous forested areas. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.31, n. 4, p.764-770, July 1993.

Johnson, B. C.; Brown, S. W.; Rice, J. P. Metrology for remote sensing radiometry. In: Morain, S. A.; Bugde, A. M. (ed.) **Post-launch calibration of satellite sensors**. London: Taylor & Francis Group, 2004. cap.1, p.7-16.

Arantes Junior, G. **Estudo comparativo de técnica de controle de atitude em três eixos para satélites artificiais**. 2005-02-23. 201p. (INPE-12970-TDI/1018) Dissertação (Mestrado em Engenharia e tecnologia Espaciais / Mecânica e Controle) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.

Karnieli, A.; Ben-Dor, E.; Bayarjargal, Y.; Lugasi, R. Radiometric saturation of Landsat-7 ETM+ data over the Negev Desert (Israel): problems and solutions. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.5, n.3, p. 219-237, 2004.

Kuga, H.K.; Kondapalli, R.R. **Introdução à mecânica orbital**. São José dos Campos, 1995 (INPE-5615-PUD/064).

Kuga, H. K. **Determinação de atitudes pós-processadas CBERS-2**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006). Comunicação pessoal.

Markelin, L.; Honkavaara, E. Procedures for radiometric quality of scanned CIR images. In: XX Congress International Society for Photogrammetric and Remote Sensing. 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey. **Anais...** Istanbul: XX ISPRS, 2004. 1 CD-ROM.

Masek, J. G.; Honsak, M.; Goward, S. N.; Liu P.; Pak, E. Landsat-7 ETM+ as an observatory for land cover initial radiometric and geometric comparisons with Landsat-5 Thematic Mapper. **Remote Sensing of Environment**, v.78, p.118-130, 2001.

Mather, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images**. New York: John Wiley & Sons, 1999. 292p.

Meneses, P. R. Fundamentos da radiometria óptica espectral. In: Meneses, P. R.; Netto, J. S. M. (ed.) **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UNB, 2001. cap.1, p.15-42.

Neter, J.; Kutner, M. N.; Nachtsheim, C. J.; Wasserman, W. **Applied linear statistical models**. Boston: WCB/McGraw-Hill, 4ª Ed. 1996, 791 p.

Neto, A. F. M. Atitude e seu controle. In: Prado, A. F. B. A.; Kuga, H. K. (ed.) **Fundamentos da tecnologia espacial**. São José dos Campos: INPE, 2001. p. 65-79.

Papa, J. P.; Mascarenhas, N. D. A.; Fonseca, L. M. G. Uma comparação entre algoritmos de projeção para restauração de imagens do satélite CBERS-1. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 16-21 abril 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 1035-1044. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/10.27.16.38/doc/1045.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2006.

Ponzoni, F. J.; Junior, J. Z.; Lamparelli, R. A. C. Calibração absoluta da câmera CCD/CBERS-2. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 16-21 abril 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 1067-1074. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.09.15.05/doc/1067.pdf>. Acesso em 13 out. 2005.

Poros, D. J.; Peterson, C. J. Methods for destriping Landsat Thematic Mapper images – a feasibility study for an online destriping process in the Thematic Mapper Image Processing System (TIPS). **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.51, p. 1371-1378, 1985.

Schowengerdt, R. A. **Remote sensing models and methods for image processing**. San Diego: Academic Press, 1997. 522p.

Silva, A. J. F. M. **Modelos de correção geométrica para imagens HRV-SPOT**. 1988-10-28. 218 p. (INPE-5001-TDL/395). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1988.

Silva, W. C. C. Movimento orbital. In: Prado, A. F. B. A.; Kuga, H. K. (ed.) **Fundamentos da tecnologia espacial**. São José dos Campos: INPE, 2001. cap.1, p. 9 - 24.

Souza, P. E. U. Restauração de imagens CCD/CBERS-2 pelo método de Richardson-Lucy modificado. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 16-21 abril 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 1107-1114. Disponível em <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.15.33/doc/355.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2005.

Wang, Z.; Bovik, A. C. A universal image quality index. **IEEE Signal Processing Letters**, v.9, n.3, p.81-84, 2002.

Wang, Z.; Bovik, A. C.; Sheikh, H. R.; Simoncelli, E. P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. **IEEE Transactions on Image Processing**, v.13, n.4, p.600-612, 2004.

Wertz, J. R. **Spacecraft attitude determination and control**. London, England: D. Reideil Publishing Company, 1978. 861p.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.