



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-15270-TDI/1347

## **CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA RELATIVA DA CÂMARA CCD DOS SATÉLITES CBERS-2 E CBERS-2B**

Érica Josiane Coelho Gouvêa

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada,  
orientada pelos Drs. Leila Maria Garcia Fonseca e Luciano Vieira Dutra, aprovada em 8  
de abril de 2008.

O original deste documento está disponível em:  
<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/02.12.12.07>>

INPE  
São José dos Campos  
2008

## **PUBLICADO POR:**

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) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: [pubtc@sid.inpe.br](mailto:pubtc@sid.inpe.br)

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO:**

### **Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

### **Membros:**

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva e Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Viveca Sant'Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-15270-TDI/1347

## **CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA RELATIVA DA CÂMARA CCD DOS SATÉLITES CBERS-2 E CBERS-2B**

Érica Josiane Coelho Gouvêa

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada,  
orientada pelos Drs. Leila Maria Garcia Fonseca e Luciano Vieira Dutra, aprovada em 8  
de abril de 2008.

O original deste documento está disponível em:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/02.12.12.07>>

INPE  
São José dos Campos  
2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

G746c Gouvêa, Érica Josiane Coelho.

Calibração radiométrica relativa da Câmara CCD dos Satélites CBERS-2 e CBERS-2B/ Érica Josiane Coelho Gouvêa. – São José dos Campos: INPE, 2008.

102p. ; (INPE-15270-TDI/1347)

1. Calibração. 2. Radiometria. 3. CBERS. 4. Câmara.  
I. Título.

CDU 528.711.7

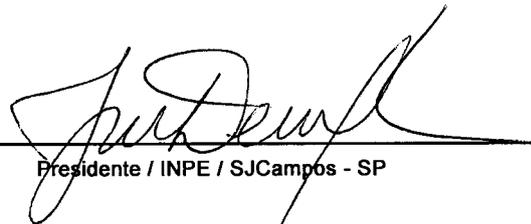
---

Copyright © 2008 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, microfilmico, reprográfico ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2008 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

Dr. José Demisio Simões da Silva



---

Presidente / INPE / SJCampos - SP

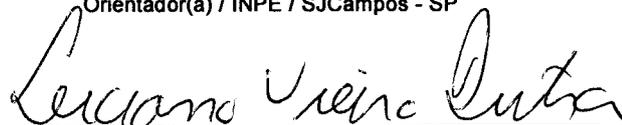
Dra. Leila Maria Garcia Fonseca



---

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Luciano Vieira Dutra



---

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Camilo Daleles Rennó



---

Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Ph.D. Max Henrique Machado Costa



---

Convidado(a) / UNICAMP / Campinas - SP

Aluno (a): Érica Josiane Coelho Gouvêa

São José dos Campos, 08 de Abril de 2008



*“E eu vos digo: Pedi, e dar-se-vos-á; buscai, e achareis; batei, e abrir-se-vos-á. Pois todo aquele que pede, recebe; aquele que procura, encontra; e ao que bater, se lhe abrirá”.*

LUCAS 11, 9-10.



*A meus pais.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por estar sempre comigo, sendo o alicerce de minha vida.

A Dra. Leila Maria Garcia Fonseca e Dr. Luciano Vieira Dutra pela serenidade, competência e dedicação na orientação deste trabalho. Em especial a Dra. Leila pela confiança depositada em mim e disponibilidade em sua função de orientadora. Sempre cativante, ela sabe transmitir sua energia positiva e seu conhecimento aos alunos.

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

À CAPES, FUNCATE e SELPER pelo auxílio financeiro, cada um ao seu tempo, claro!

Aos professores do INPE pelo conhecimento compartilhado. Em especial ao Prof. Dr. João Ricardo pela grande amizade!

Ao Ricardo Cartaxo, José Dias, Júlio D'Alge, Flávio Ponzoni e Epiphanyo pela amizade e pela atenção dispensada a todas as minhas dúvidas.

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

Aos amigos da senzala: Annette, Alessandra, Eliana, Fernanda, Graziela, Joelma, Rogério, Vantier, Orlando e Thiago. Vocês foram essenciais! E ao meu amigo Sidnei Sant'Anna pelas boas conversas e brincadeiras durante a realização deste trabalho.

Ao Glauber Santana, uma pessoa exemplar. Obrigada pelas ajudas, conversas e pela verdadeira amizade. E ao Jeferson Souza pela disponibilização das inúmeras imagens e pela força nos momentos difíceis.

Agradeço à Flávia, desde a graduação fazendo parte da minha vida e aos amigos de disciplina: Eduardo, Eduílson, Heloísa e Roberta. Em especial à Heloísa que sempre me ajudou e me acolheu em sua casa nos árduos momentos.

Aos meus grandes amigos que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a realização deste trabalho.

À minha família, principalmente aos meus pais Antonio e Vicentina por toda dedicação e apoio para que mais essa etapa fosse concluída. A minha irmã e amiga Carina e aos meus sobrinhos Marina e João Guilherme que sempre me deram forças e entenderam minha ausência. Foi por vocês que cheguei até aqui e é por vocês que seguirei adiante!



## RESUMO

Os satélites CBERS-2 e CBERS-2B foram lançados em 2003 e 2007, respectivamente. As imagens são recebidas pela estação de recepção em Cuiabá e processadas antes de serem distribuídas aos usuários. Nesta fase de processamento, correções radiométricas e geométricas são realizadas para melhorar a qualidade das imagens. Uma das técnicas de correção radiométrica é a calibração relativa, que tem como objetivo uniformizar as respostas dos detectores para que eles tenham a mesma resposta (mesmo valor digital) quando sensibilizados por um sinal de mesma intensidade. Portanto, dada a importância e a necessidade de gerar imagens com boa qualidade radiométrica, este trabalho tem como objetivo implementar e avaliar um método de calibração relativa da câmara CCD dos satélites CBERS-2 e CBERS-2B. Uma avaliação das distorções presentes na resposta dos detectores da câmara CCD é também apresentada. Para efeito de avaliação, o método proposto é testado em imagens de três diferentes tipos de alvos: agricultura, urbano e vegetação.



# RELATIVE RADIOMETRIC CALIBRATION OF SATELLITES CBERS-2 AND CBERS-2B CCD CAMERA

## ABSTRACT

The satellites CBERS-2 and CBERS-2B were launched in 2003 and 2007, respectively. The images are received by reception station in Cuiabá and processed before being available to the users. In this step of the image processing, radiometric and geometric corrections are performed to improve image quality. One of the radiometric correction techniques is the relative calibration, which aims to homogenize the detector responses so that they have the same digital value when reached by a signal of same intensity. Therefore, given the need to generate images with good radiometric quality, this work aims to implement and evaluate a method to perform the relative calibration of CBERS-2 and CBERS-2B CCD camera. An evaluation of the distortion in the response of CCD camera detectors is also presented. To perform the evaluation, the proposed method was tested with images from three kinds of targets: agriculture, urban and vegetation.



# SUMÁRIO

Pág.

## LISTA DE FIGURAS

## LISTA DE TABELAS

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	<b>SATÉLITE CBERS</b>	<b>29</b>
2.1	Satélites a bordo	29
2.2	Câmara CCD	33
2.3	Produtos CBERS	36
<b>3</b>	<b>CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA DE SENSORES ORBITAIS</b>	<b>39</b>
3.1	Radiometria e Qualidade de Imagens	39
3.2	Calibração Radiométrica Relativa	41
3.3	Procedimentos de Calibração em Laboratório	43
3.4	Método Tradicional de Calibração Relativa	47
<b>4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO RADIOMÉTRICA DA CÂMARA CCD</b>	<b>49</b>
4.1	Imagem de Calibração $L_0$	50
4.2	Detectores Escuros	52
4.3	Detectores Pares e Ímpares	60
4.4	Região de Sobreposição entre os Arranjos	66
4.5	Diferentes Ganhos para cada Arranjo	68
<b>5</b>	<b>PROCESSO DE CALIBRAÇÃO RELATIVA IMPLEMENTADO</b>	<b>71</b>
5.1	Coefficientes de Calibração Relativa	72
5.1.1	Cálculo do <i>Offset</i>	72
5.1.2	Correção Dinâmica dos Detectores Escuros	72
5.1.3	Determinação do Ganho para cada Detector	75
5.1.4	Determinação do Ganho para cada Arranjo	75
5.2	Aplicação dos Coeficientes	76
5.3	Região de Sobreposição	76

<b>6 RESULTADOS E AVALIAÇÃO</b> . . . . .	<b>79</b>
6.1 Correção Radiométrica de cada Arranjo . . . . .	79
6.2 Sobreposições entre os Arranjos . . . . .	82
6.3 Avaliação da Qualidade Radiométrica . . . . .	91
<b>7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> . . . . .	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> . . . . .	<b>97</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Região de Goiás (161/121) R3G4B2 - CCD/CBERS-2 (a)antes e (b) após a calibração relativa. . . . .	26
2.1 Satélite CBERS-2. . . . .	30
2.2 Respostas espectrais das cinco bandas CCD/CBERS-2 e CBERS-2B. . . . .	33
2.3 Arranjo de detectores CCD/CBERS. . . . .	34
2.4 Formação da imagem de cada arranjo de detectores CCD/CBERS. . . . .	36
3.1 Componentes da radiação proveniente da fonte de energia. . . . .	39
3.2 Detalhes da região de Campo Grande (163/123) R3G4B2 - CCD/CBERS-2 (a)antes e (b) após a calibração relativa. . . . .	43
3.3 Aquisição das imagens de calibração. . . . .	44
3.4 Imagens de calibração - Banda3-CCD/CBERS-2. . . . .	47
4.1 Variação média dos detectores escuros - nível <i>L0</i> , arranjo 1, banda 3/CBERS-2.	53
4.2 Média dos detectores escuros - 2004 / CBERS-2. . . . .	56
4.3 Média dos detectores escuros - 2005 / CBERS-2. . . . .	57
4.4 Média dos detectores escuros - 2006 / CBERS-2. . . . .	58
4.5 Média dos detectores escuros - 2007 / CBERS-2. . . . .	59
4.6 Imagem com variação radiométrica nos detectores pares e ímpares. . . . .	61
4.7 Listras verticais causadas pela variação radiométrica dos detectores pares e ímpares na imagem com composição colorida (2B3G4R). . . . .	61
4.8 Efeito da calibração radiométrica imperfeita após correção geométrica. . . . .	62
4.9 Média dos detectores pares e ímpares da imagem de calibração - Banda1/CBERS-2. . . . .	62
4.10 Média dos detectores pares e ímpares da imagem de calibração - Banda1/CBERS-2B. . . . .	63
4.11 Média dos detectores escuros pares e ímpares da imagem de calibração - Banda1/CBERS-2. . . . .	64
4.12 Média dos detectores escuros pares e ímpares da imagem de calibração - Banda1/CBERS-2B. . . . .	65
4.13 Distribuição dos arranjos do sensor CCD-CBERS. . . . .	66
4.14 Região de sobreposição entre os arranjos 1 e 2 da câmara CCD/CBERS-2. . . . .	67
4.15 Região de Campo Grande (163/123) sem sobreposição dos arranjos - Banda 1/CBERS-2. . . . .	68

4.16	Região de Campo Grande (163/123) com sobreposição inadequada entre os arranjos - Banda 1/CBERS-2. . . . .	68
4.17	Variação dos níveis de cinza entre os três arranjos da câmara CCD - Banda 3/CBERS-2. . . . .	69
4.18	Diferentes respostas entre os arranjos da câmara CCD. . . . .	69
5.1	Processo de calibração relativa. . . . .	71
5.2	Região de sobreposição. . . . .	77
6.1	Arranjo 1 - Região de Goiás (P161/R121)-04/07/2006 - Banda2/CBERS-2 (a)Imagem original e (b)Imagem calibrada. . . . .	79
6.2	Arranjo 2 - Região de Goiás (P161/R121)-04/07/2006 - Banda2/CBERS-2 (a)Imagem original e (b)Imagem calibrada. . . . .	80
6.3	Arranjo 3 - Região de Goiás (P161/R121)-04/07/2006 - Banda2/CBERS-2 (a)Imagem original e (b)Imagem calibrada. . . . .	80
6.4	Detalhe do arranjo 1 da banda 2 (a)Nível 0 (b)Nível 1 - Urbano: Região de Campo Grande (P163/R123) - 28/06/2006. . . . .	81
6.5	Detalhe do arranjo 1 da banda 2 (a) Nível 0 (b)Nível 1 - Agricultura: Região de Goiás (P161/R121) - 04/07/2006. . . . .	81
6.6	Detalhe do arranjo 1 da banda 2 (a)Nível 0 (b)Nível 1 - Vegetação: Região de Rio Grande do Sul (P158/R133) - 31/03/2006. . . . .	82
6.7	Região de sobreposição da Banda 2 - (a)Campo Grande (P163/R123)-28/06/2006, (b)Goiás (P161/R121)-04/07/2006 e (c)Paraguai (P170/R123)-03/07/2006. . . . .	82
6.8	Área de sobreposição do arranjo 3 com o arranjo 2 - Banda3/CBERS-2. . . . .	83
6.9	Área de sobreposição do arranjo 2 com o arranjo 1 - Banda3/CBERS-2. . . . .	83
6.10	Detalhe da banda 2 após a calibração - (a)Campo Grande (P163/R123)-28/06/2006, (b)Goiás (P161/R121)-04/07/2006 e (c)Paraguai (P170/R123)-03/07/2006. . . . .	84
6.11	Imagem de Campo Grande(163/123) Banda 1/CBERS-2 calibrada considerando (a)154 <i>pixels</i> e (b)54 <i>pixels</i> no processo de junção dos arranjos. . . . .	85
6.12	Imagem de Campo Grande(163/123) Banda 3/CBERS-2 calibrada considerando (a)154 <i>pixels</i> e (b)54 <i>pixels</i> no processo de junção dos arranjos. . . . .	85
6.13	Imagem de Campo Grande(163/123) Banda 5/CBERS-2 calibrada considerando (a)154 <i>pixels</i> e (b)54 <i>pixels</i> no processo de junção dos arranjos. . . . .	86
6.14	Imagem de Mato Grosso(166/114) Banda 1/CBERS-2 calibrada considerando (a)154 <i>pixels</i> e (b)54 <i>pixels</i> no processo de junção dos arranjos. . . . .	86
6.15	Imagem de Rio Grande do Sul(158/133) Banda 3/CBERS-2 calibrada considerando (a)154 <i>pixels</i> e (b)54 <i>pixels</i> no processo de junção dos arranjos. . . . .	87

6.16	Detalhe da imagem de Campo Grande(163/123) Banda 2/CBERS-2 calibrada considerando (a)154 <i>pixels</i> e (b)54 <i>pixels</i> no processo de junção dos arranjos. . . . .	87
6.17	Detalhe da imagem de Goiás(161/121) Banda 2/CBERS-2 calibrada considerando (a)154 <i>pixels</i> e (b)54 <i>pixels</i> no processo de junção dos arranjos. . . . .	88
6.18	Detalhe da imagem de Rio Grande do Sul(158/133) Banda 2/CBERS-2 calibrada considerando (a)154 <i>pixels</i> e (b)54 <i>pixels</i> no processo de junção dos arranjos. . . . .	88
6.19	Imagens calibradas R3G4B2 de Mato Grosso (166/114) - 15/07/2006 CBERS-2 considerando 154 <i>pixels</i> no processo de junção dos arranjos. . . . .	89
6.20	Imagens calibradas R3G4B2 de Mato Grosso (166/114) - 15/07/2006 considerando 54 <i>pixels</i> no processo de junção dos arranjos. . . . .	89
6.21	Agricultura - Goiás(161/121)-29/10/2007 Banda 3/CBERS-2B calibrada considerando (a)154 <i>pixels</i> e (b)54 <i>pixels</i> no processo de junção dos arranjos. . . . .	90
6.22	Agricultura - Goiás(161/121)-29/10/2007 Banda 4/CBERS-2B calibrada considerando (a)154 <i>pixels</i> e (b)54 <i>pixels</i> no processo de junção dos arranjos. . . . .	90
6.23	Imagem calibrada R3G4B2 da região de Goiás(P161/R121) - 29/10/2007 CBERS-2B considerando (a)154 <i>pixels</i> e (b)54 <i>pixels</i> no processo de junção dos arranjos. . . . .	91
6.24	Região do deserto de GOBI (25/55) - 19/08/2004 Composição 2(B)3(G)4(R). . . . .	92
6.25	Região de Lousiana (212/66) - 23/12/2007 Composição 2(B)3(G)4(R). . . . .	92
6.26	Região do Rio de Janeiro (151/126) - 13/06/2005 Composição 2(B)3(G)4(R). . . . .	94



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Características da câmara CCD dos satélites CBERS-2 e CBERS-2B. . . . .	34
3.1 Processo de calibração da câmara CCD. . . . .	46
4.1 Informações das imagens selecionadas - CBERS-2. . . . .	49
4.2 Informações das imagens selecionadas - CBERS-2B. . . . .	50
4.3 Arranjo 1: medidas estatísticas na imagem de calibração <i>L0</i> /CBERS-2. . . . .	51
4.4 Arranjo 2: medidas estatísticas na imagem de calibração <i>L0</i> /CBERS-2. . . . .	51
4.5 Arranjo 3: medidas estatísticas na imagem de calibração <i>L0</i> /CBERS-2. . . . .	51
4.6 Arranjo 1: medidas estatísticas na imagem de calibração <i>L0</i> /CBERS-2B. . . . .	52
4.7 Arranjo 2: medidas estatísticas na imagem de calibração <i>L0</i> /CBERS-2B. . . . .	52
4.8 Arranjo 3: medidas estatísticas na imagem de calibração <i>L0</i> /CBERS-2B. . . . .	52
4.9 Arranjo 1: medidas estatísticas dos detectores escuros da imagem de calibração <i>L0</i> /CBERS-2. . . . .	53
4.10 Arranjo 2: medidas estatísticas dos detectores escuros da imagem de calibração <i>L0</i> /CBERS-2. . . . .	54
4.11 Arranjo 3: medidas estatísticas dos detectores escuros da imagem de calibração <i>L0</i> /CBERS-2. . . . .	54
4.12 Arranjo 1: medidas estatísticas dos detectores escuros da imagem de calibração <i>L0</i> /CBERS-2B. . . . .	54
4.13 Arranjo 2: medidas estatísticas dos detectores escuros da imagem de calibração <i>L0</i> /CBERS-2B. . . . .	55
4.14 Arranjo 3: medidas estatísticas dos detectores escuros da imagem de calibração <i>L0</i> /CBERS-2B. . . . .	55
4.15 Média dos valores de níveis de cinza dos detectores pares e ímpares para as imagens de calibração do CBERS-2. . . . .	63
4.16 Média dos valores de níveis de cinza dos detectores pares e ímpares para as imagens de calibração do CBERS-2B. . . . .	64
4.17 Média dos valores de níveis de cinza dos detectores escuros pares e ímpares para as imagens de calibração do CBERS-2. . . . .	65
4.18 Média dos valores de níveis de cinza dos detectores escuros pares e ímpares para as imagens de calibração do CBERS-2B. . . . .	66
5.1 Arranjo 1: Valores médios dos níveis de cinza dos detectores escuros da imagem de calibração ( <i>L0</i> , <i>L1</i> , <i>L2</i> , <i>L3</i> ... <i>L11</i> )/CBERS-2. . . . .	73

5.2	Arranjo 2: Valores médios dos níveis de cinza dos detectores escuros da imagem de calibração ( $L_0, L_1, L_2, L_3 \dots L_{11}$ )/CBERS-2. . . . .	73
5.3	Arranjo 3: Valores médios dos níveis de cinza dos detectores escuros da imagem de calibração ( $L_0, L_1, L_2, L_3 \dots L_{11}$ )/CBERS-2. . . . .	74
6.1	Características das imagens homogêneas selecionadas. . . . .	92
6.2	Valores do erro calculado para cada banda/CBERS-2. . . . .	93
6.3	Valores do erro calculado para cada banda/CBERS-2B. . . . .	94
6.4	Valores médios dos erros para cada banda antes e depois da calibração relativa. . . . .	94

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	– Analógico-Digital
B	– <i>Blue</i> (Azul)
B1	– Banda do Azul (0,45 – 0,52 $\mu$ m)
B2	– Banda do Verde (0,52 – 0,59 $\mu$ m)
B3	– Banda do Vermelho (0,63 – 0,69 $\mu$ m)
B4	– Banda do Infra-Vermelho Próximo (0,77 – 0,89 $\mu$ m)
B5	– Banda Pancromática (0,51 – 0,73 $\mu$ m)
CAPES	– Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CAST	– <i>Chinese Academy of Space Technology</i>
CBERS	– <i>China-Brazil Earth Resources Satellite</i>
CCD	– <i>Charge Coupled Device</i>
CCD-1	– Canal 1 da CCD (Bandas 2, 3 e 4)
CCD-2	– Canal 2 da CCD (Bandas 1, 3 e 5)
DE	– Detectores Escuros
DGI	– Divisão de Geração de Imagens
DP	– Desvio-Padrão
FASC	– <i>Full Aperture Solar Calibrator</i>
G	– <i>Green</i> (Verde)
GRALHA	– <i>Generic Raw Level Hierarchical Archive</i>
HDF	– <i>Hierarchical Data File</i>
HRC	– <i>High Resolution Camera</i>
IAS	– <i>Image Assessment System</i>
IBAMA	– Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IC	– <i>Internal Calibrator</i>
INCRA	– Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRMSS	– <i>InfraRed Multispectral Scanner</i>
MM	– <i>Main/Main</i> (Configuração do sensor)
MNE	– Modelo Numérico de Elevação
MR	– <i>Main/Redundant</i> (Configuração do sensor)
MTF	– <i>Modulation Transfer Function</i>
NC	– Nível de Cinza
ONG	– Organização Não Governamental
PAN	– Banda Pancromática
PASC	– <i>Partial Aperture Solar Calibrator</i>
PETROBRÁS	– Petróleo Brasileiro S/A
R	– <i>Red</i> (Vermelho)
RR	– <i>Redundant/Redundant</i> (Configuração do sensor)
RM	– <i>Redundant/Main</i> (Configuração do sensor)
S/N	– <i>Signal/Noise</i> (Relação Sinal Ruído)
TM	– <i>Thematic Mapper</i>
WFI	– <i>Wide Field Imager</i>



## 1 INTRODUÇÃO

O programa *China-Brazil Earth Resources Satellite* (CBERS) nasceu a partir de um projeto resultante do acordo entre o Brasil e a China em 1988, cuja missão é o monitoramento eficiente do espaço terrestre e a coleta remota de informações utilizáveis em vários campos de aplicações. Com a aquisição dessa tecnologia, uma nova era começa no Brasil, articulada por um rápido progresso na construção de satélites e o desenvolvimento de sensores altamente sofisticados.

Três 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. Ambos possuem a mesma carga útil imageadora, formada pelos sensores CCD (câmara imageadora de alta resolução), WFI (câmara imageadora de amplo campo de visada) e IRMSS (imageador por varredura de média resolução).

O terceiro satélite da série CBERS, chamado CBERS-2B, foi lançado com sucesso em setembro de 2007. Praticamente idêntico ao CBERS-1 e CBERS-2, o CBERS-2B carrega algumas melhorias, sendo a principal delas a substituição do imageador IRMSS por uma câmara de alta resolução, HRC.

A distribuição de imagens CBERS para o Brasil tem sido gratuita. Mais de 5 mil instituições e 30.000 usuários estão cadastrados e, até outubro de 2007, mais de 350.000 cenas CBERS-2 foram distribuídas, numa média superior a 10.000 cenas por mês. As imagens do satélite CBERS estão sendo utilizadas nas mais variadas aplicações, tais como, meio-ambiente, monitoramento florestal, monitoramento do desenvolvimento, expansão agrícola, fiscalização, apoio a levantamentos de solo e aplicações educacionais (INPE, 2007).

Nesse sentido, é fundamental que haja investimentos no aprimoramento de metodologias que visem melhorar a qualidade dos dados gerados pelos sensores dos satélites CBERS-2, CBERS-2B e por outros que futuramente serão desenvolvidos, sob pena de manter dependência permanente de instituições estrangeiras para acesso a dados radiométricos confiáveis de sensores desenvolvidos em programas nacionais.

A qualidade dos dados depende da correção radiométrica e geométrica dos produtos de sensoriamento remoto. Segundo Itten e Meyer (1993), dados orbitais de boa qualidade são necessários para aplicações que envolvam a integração de dados obtidos por diferentes sensores, diferentes datas, etc.

As técnicas de correção de imagem incluem, basicamente, as correções radiométricas (calibração relativa, calibração absoluta, detectores defeituosos, correção atmosférica, etc.) e

geométricas (correção de sistema, registro entre bandas, etc.). Estas correções melhoram a qualidade da imagem e, portanto, facilitam sua interpretação e processamento.

A calibração relativa tem como objetivo corrigir as diferenças nas respostas entre os detectores e assim obter a mesma resposta na imagem para o mesmo alvo imageado (CHAVEZ, 1989), (YUAN; ELVIDGE, 1996), (ELVIDGE et al., 1995), (HALL et al., 1991) e (VALORGE et al., 2004).

Para ilustrar o efeito da calibração, a Figura 1.1 apresenta uma imagem da câmara CCD do satélite CBERS-2 antes e após a calibração relativa.

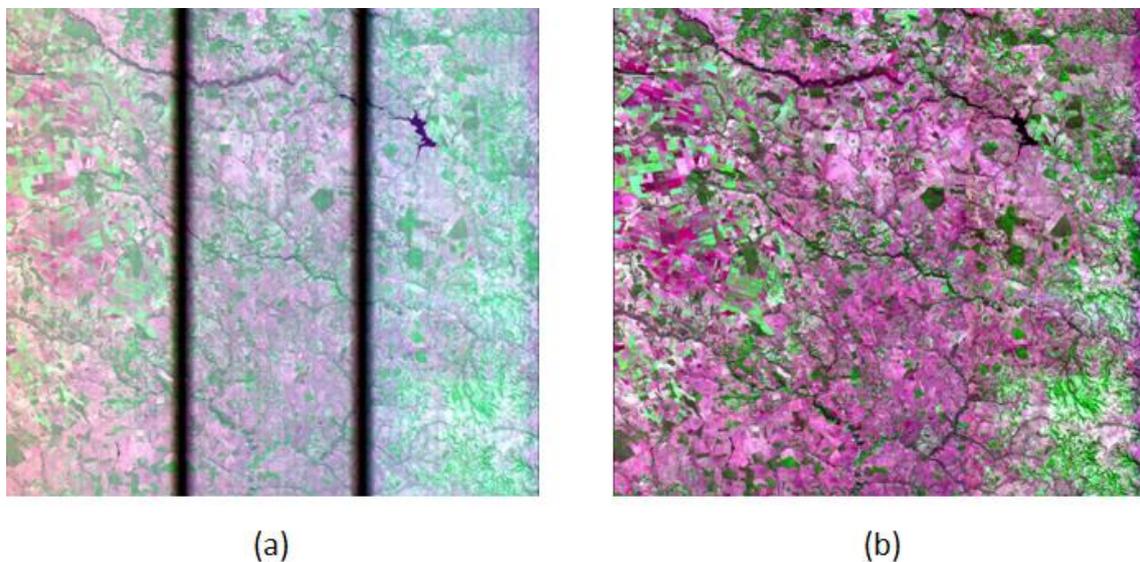


Figura 1.1 - Região de Goiás (161/121) R3G4B2 - CCD/CBERS-2 (a) antes e (b) após a calibração relativa.

Geralmente, a calibração relativa dos sensores é realizada pelo fabricante em laboratório durante a montagem do sistema sensor. Assim, os coeficientes de calibração são fornecidos pelo fabricante, como é o caso das câmaras WFI e IRMSS. No caso da câmara CCD, como o sistema eletrônico e o conversor analógico-digital são integrados durante a fase de integração e testes do satélite no laboratório, uma fase de testes de calibração é necessária. Nesta fase de testes, dados de calibração são adquiridos em laboratório e usados para o cálculo dos coeficientes de calibração.

Dada a importância do processo de correção radiométrica, este trabalho tem como objetivo implementar e avaliar um método de calibração radiométrica relativa dos dados CCD dos satélites CBERS-2 e CBERS-2B, visando melhorar a qualidade radiométrica das imagens geradas por este sensor.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta uma revisão sobre os satélites da série CBERS e suas principais aplicações. Algumas características técnicas da câmara CCD e os diferentes níveis de processamento das imagens CBERS são também apresentadas nesse Capítulo. Uma sucinta fundamentação teórica sobre a radiometria de imagens de satélites e a metodologia de calibração radiométrica relativa são apresentados no Capítulo 3. No Capítulo 4, problemas radiométricos da câmara CCD são apresentados. O algoritmo de calibração radiométrica relativa implementado neste trabalho é definido no Capítulo 5. O Capítulo 6 apresenta os resultados das imagens da câmara CCD dos satélites CBERS-2 e CBERS-2B obtidas pelo algoritmo proposto. A avaliação da calibração radiométrica relativa também é apresentada nesse Capítulo. Finalmente, conclusões e recomendações para trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 7.



## 2 SATÉLITE CBERS

Alguns conceitos básicos importantes para o desenvolvimento deste trabalho são descritos, de forma sucinta, nas próximas seções. A Seção 2.1 descreve uma visão global sobre o Programa CBERS e suas principais aplicações. Na Seção 2.2 são apresentadas algumas características da câmara CCD dos satélites CBERS-2 e CBERS-2B, foco de estudo deste trabalho. Na Seção 2.3 os diferentes níveis de processamento das imagens do satélite CBERS são apresentados.

Todas as informações relacionadas com o satélite CBERS, contidas neste trabalho, foram baseadas em documentações de especificações técnicas do CBERS.

### 2.1 Satélites a bordo

O Programa Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS) teve início em julho de 1988, quando foi assinado um acordo de cooperação entre Brasil e China para o desenvolvimento conjunto de satélites de observação da Terra. O programa previa o uso dos recursos financeiros e da capacidade técnica dos dois países para estabelecer um sistema completo de sensoriamento remoto competitivo e compatível com as necessidades de cada um.

Na China, a implementação do Programa CBERS ficou a cargo da CAST (*Chinese Academy of Space Technology*/Academia Chinesa de Tecnologia Espacial) e no Brasil, do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

O primeiro satélite, CBERS-1, foi lançado na China em outubro de 1999 e operou com sucesso por quase quatro anos, até agosto de 2003. A vida útil programada para esse satélite era de dois anos. O segundo satélite, CBERS-2 ([Figura 2.1](#)) - uma réplica do CBERS-1, foi lançado em outubro de 2003 e opera até hoje. O CBERS-2B, lançado em setembro de 2007, foi construído para dar continuidade ao programa de imageamento do país, as aplicações espaciais, e não interromper os projetos de instituições e usuários do Programa CBERS. Ainda pertencente à primeira geração do CBERS, o CBERS-2B é, portanto, praticamente idêntico aos CBERS-1 e 2. Paralelamente, estão sendo desenvolvidos os CBERS-3 e CBERS-4, com características mais avançadas do que seus três antecessores. O lançamento do CBERS-3 está previsto para 2010 e o do CBERS-4, para 2012.

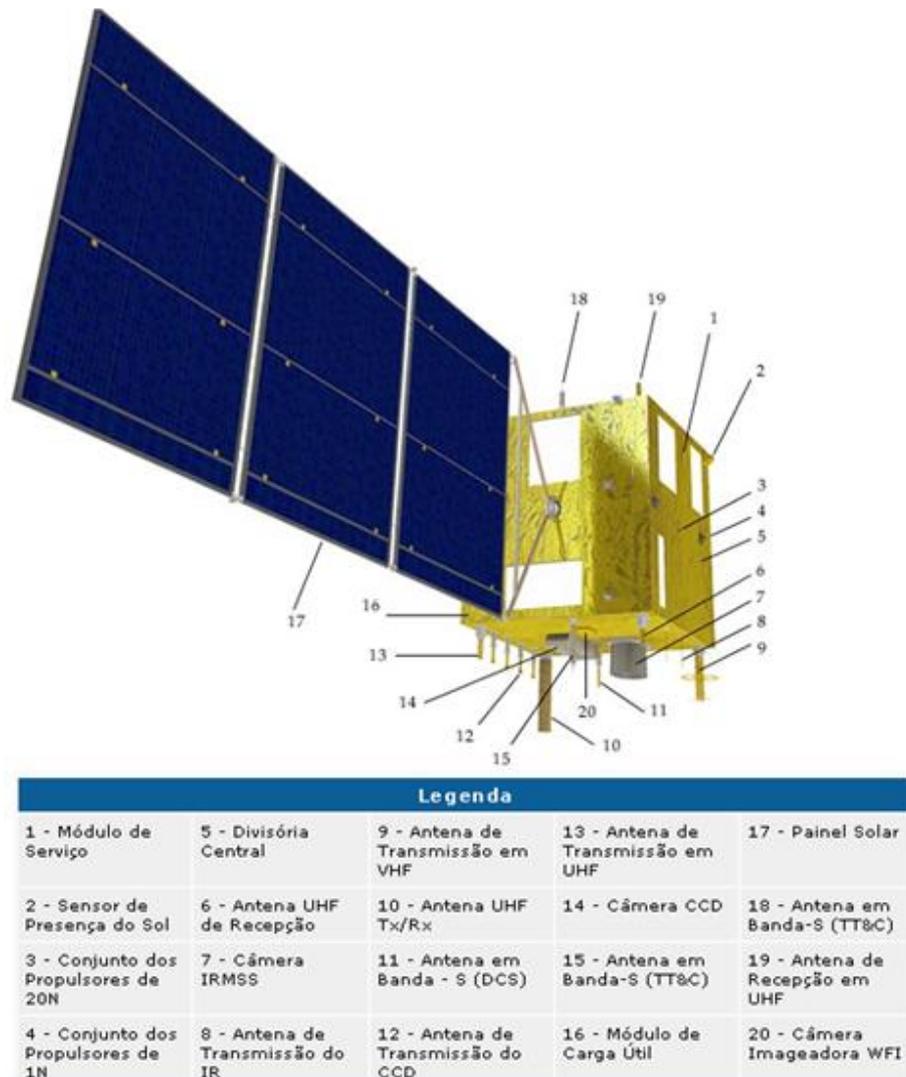


Figura 2.1 - Satélite CBERS-2.

Fonte: INPE (2007).

Os satélites CBERS-1, 2 e 2B são equipados com sensores ópticos para observações da superfície terrestre, além de um sistema de coleta de dados ambientais. Os três sensores imageadores a bordo do CBERS-2 são: Imageador de Amplo Campo de Visada (WFI - *Wide Field Imager*), câmara Imageadora de Alta Resolução (CCD - *High Resolution Camera*) e Imageador por Varredura de Média Resolução (IRMSS - *Infrared Multispectral Scanner*). Para o CBERS-2B, os sensores a bordo são praticamente idênticos aos do CBERS-2. A diferença está na substituição do sensor IRMSS por uma câmara de Alta Resolução, a HRC (*High Resolution Camera*).

As câmaras WFI, IRMSS, CCD e HRC possuem, respectivamente, 260, 80, 20 e 2,7 m

de resolução espacial. Para mais informações sobre estes sensores ver [INPE \(2007\)](#). As características técnicas da câmara CCD, foco deste trabalho, são apresentadas na Seção 2.2 com mais detalhes.

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. Nele estão instalados os instrumentos que justificam a missão, como: câmaras, 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) A carga útil deve estar orientada na direção correta;
- b) A carga útil deve ter sua confiabilidade especificada por um período de tempo;
- c) Os dados obtidos pela carga útil devem ser enviados a uma estação terrestre para serem analisados;
- d) A órbita e a atitude do satélite devem ser controladas;
- e) A carga útil deve estar fixa na plataforma sobre a qual foi montada;
- f) Uma fonte de energia deve estar disponível para permitir a realização das funções programadas.

O corpo principal do satélite é uma caixa de dimensões 2 x 3,3 x 8,3 metros, pesando 1450 *kg* (no lançamento). O satélite gira ao redor da Terra a uma altitude de 778 *km*, numa órbita heliossíncrona perfazendo cerca de 14 revoluções por dia, levando um período de 26 dias para a cobertura global da Terra. Nesta órbita, o satélite cruza o Equador sempre na mesma hora local, 10:30h da manhã, permitindo assim que se tenha sempre as mesmas condições de iluminação solar para a comparação de imagens tomadas em dias diferentes.

Esse padrão de recobrimento orbital forma o que se denomina Sistema de Referência Mundial. Esse sistema permite que se localize uma imagem correspondente a qualquer ponto da Terra através de dois números, correspondentes à órbita (sentido longitudinal) e ao ponto (sentido latitudinal).

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 Brasil têm distribuído gratuitamente para países vizinhos, da América Latina, imagens CBERS e promovendo atividades de capacitação técnica para sua utilização. A partir de 2008, as imagens CBERS deverão passar a ser distribuídas também para países da América Central, do Caribe, da África e do sudeste asiático, mediante a entrada em operação de novas estações de recepção de dados. Os satélites CBERS tornam-se, cada vez mais, instrumento fundamental de cooperação internacional, em benefício dos países em desenvolvimento.

Com a disponibilização de imagens gratuitamente <sup>1</sup>, o Programa CBERS tem viabilizado muitas pesquisas em instituições públicas e privadas, que tinham pouco acesso à tecnologia do Sensoriamento Remoto. No seminário realizado no INPE em comemoração aos dois anos de lançamento do CBERS-2 ([INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS \(INPE\), 2005](#); [EPIPHANIO, 2007](#)), setores governamentais, educacionais, iniciativa privada e ONGs (Organizações Não Governamentais) estiveram presentes e puderam relatar o impacto que o CBERS vem tendo em suas atividades, projetos e realizações. Vários casos foram relatados para as mais diversas aplicações. Alguns deles são destacados a seguir:

- a) A Secretaria da Fazenda de Goiás tem evitado evasão fiscal, pois usam imagens do CBERS no monitoramento agrícola;
- b) A PETROBRÁS tem conseguido detectar finas películas de óleo no mar, que podem indicar fendas no fundo do oceano, que merecem investigação ou prospecção;
- c) O IBAMA tem conseguido ampliar substancialmente seus trabalhos de monitoramento em função de terem as imagens de boa qualidade do CBERS à disposição a qualquer momento;
- d) O INCRA tem nas imagens do satélite o sustentáculo das suas atividades de mapeamento, cadastramento e avaliações;
- e) A Secretaria de Meio Ambiente de São Paulo usa rotineiramente essas imagens nos seus trabalhos de licenciamento ambiental e de proteção de recursos naturais.

Neste seminário, ficou patente a importância que o CBERS adquiriu no âmbito das mais variadas e importantes instituições brasileiras, o que motiva a melhoria da qualidade dos dados disponibilizados aos usuários.

---

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

## 2.2 Câmara CCD

A câmara CCD dos satélites CBERS-2 e CBERS-2B possui varredura eletrônica, campo de visada de 113 *km* e resolução espacial de 20 *m*. Gera imagens nas bandas espectrais do azul (B1 - 0,45 - 0,52  $\mu m$ ), verde (B2 - 0,52 - 0,59  $\mu m$ ), vermelho (B3 - 0,63 - 0,69  $\mu m$ ) e infravermelho próximo (B4 - 0,77 - 0,89  $\mu m$ ), além da banda pancromática (B5 - 0,51 - 0,73  $\mu m$ ). Cada banda espectral da câmara CCD pode ser representada por sua função de resposta espectral. A [Figura 2.2](#) apresenta as funções de resposta espectral das bandas da câmara CCD.

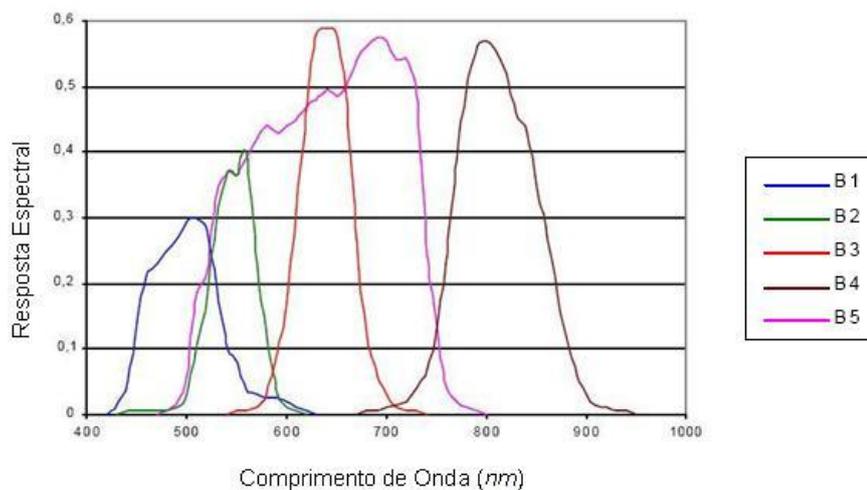


Figura 2.2 - Respostas espectrais das cinco bandas CCD/CBERS-2 e CBERS-2B.

Fonte: [Sielingardi \(1999\)](#).

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. A [Tabela 2.1](#) apresenta um resumo das características técnicas da câmara CCD.

Tabela 2.1 - Características da câmara CCD dos satélites CBERS-2 e CBERS-2B.

Características	CCD
Bandas espectrais	0,51–0,73 $\mu m$ (pan) 0,45–0,52 $\mu m$ (B) 0,52–0,59 $\mu m$ (G) 0,63–0,69 $\mu m$ (R) 0,77–0,89 $\mu m$ (NIR)
Resolução espacial	20 x 20 m
Largura da faixa imageada	113 km
Capacidade de apontamento do espelho	$\pm 32^\circ$
Resolução temporal	26 dias com visada vertical 3 dias com visada lateral

Fonte: Adaptado de [INPE \(2007\)](#).

O sinal da câmara CCD é transmitido através de dois canais: CCD-1 transmite sinais das bandas B2, B3 e B4 e CCD-2 transmite sinais das bandas B1, B3 e B5. A banda 3 é transmitida nos dois canais ([FONSECA et al., 2004](#)).

A câmara é formada por uma organização de três arranjos de 2048 detectores para cada banda, onde 154 detectores em cada arranjo são sobrepostos, oito são detectores escuros e 16 detectores do arranjo 3 não são recebidos pela estação de solo devido a atrasos na transmissão dos dados. A [Figura 2.3](#) mostra o arranjo dos três detectores da câmara CCD do CBERS-2 e CBERS-2B. Os oito detectores escuros em cada arranjo são chamados desta forma pois não recebem nenhum sinal de radiância.

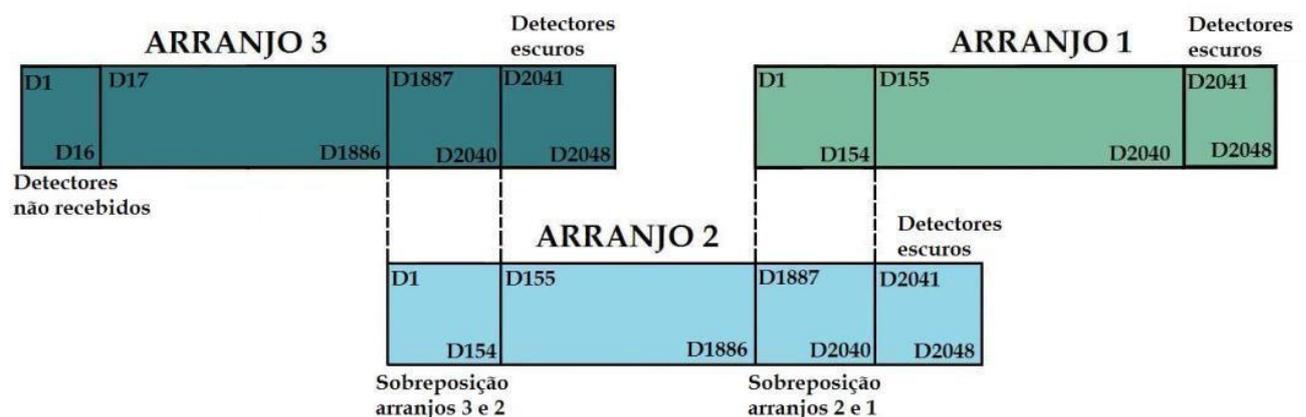


Figura 2.3 - Arranjo de detectores CCD/CBERS.

Fonte: Adaptado de [Fonseca et al. \(2004\)](#).

Conforme mostra a [Figura 2.3](#), cada arranjo de detectores da câmara CCD possui uma configuração própria, descrita abaixo:

Arranjo 3:

- a) 16 detectores cujos sinais não são recebidos;
- b) 1870 detectores normais;
- c) 154 detectores na área de sobreposição com o arranjo 2;
- d) 8 detectores escuros.

Arranjo 2:

- a) 154 detectores na área de sobreposição com o arranjo 3;
- b) 1732 detectores normais;
- c) 154 detectores na área de sobreposição com o arranjo 1;
- d) 8 detectores escuros.

Arranjo 1:

- a) 154 detectores na área de sobreposição com o arranjo 2;
- b) 1886 detectores normais;
- c) 8 detectores escuros.

Cada arranjo de detectores da câmara CCD do CBERS-2 e CBERS-2B é organizado como mostra a [Figura 2.4](#). A conversão analógico-digital dos sinais dos detectores é realizada utilizando duas áreas de armazenamento, uma para os detectores de números pares e outra para os detectores de números ímpares. As respostas desses detectores são combinadas para gerar os dados de saída.

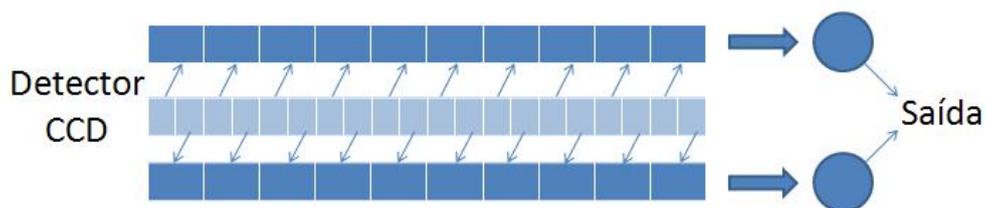


Figura 2.4 - Formação da imagem de cada arranjo de detectores CCD/CBERS.

Fonte: Adaptado de [Fonseca et al. \(2004\)](#).

Embora os satélites tenham uma projeção de tempo de vida útil, podem ocorrer problemas técnicos, radiométricos e geométricos durante sua atividade no espaço. Diante de cada situação de anormalidade, são feitos testes e estudos para identificar precisamente o problema e definir que ações devem ser tomadas de modo a prejudicar o menos possível a disponibilização de imagens com boa qualidade aos usuários, minimizar os riscos ao satélite, preservar e estender sua vida em órbita.

### 2.3 Produtos CBERS

As imagens do satélite CBERS recebidas pelo INPE são processadas em 5 (cinco) diferentes níveis. Os níveis de correção variam de 0 (zero) a 4 (quatro). A qualidade radiométrica e geométrica das imagens melhoram na medida em que o nível de processamento cresce ([D'ALGE; CARTAXO, 2004](#)) e ([SILVA, 2007](#)).

O nível 0 representa os dados de imagem em estado bruto. Não há qualquer alteração nos valores dos *pixels*, nem tão pouco há inclusão ou exclusão destes. Este nível de processamento é geralmente restrito a usuários especiais, e serve também para intercâmbio entre estações de processamento de imagens. No caso da estação multi-satélite do INPE, os dados em nível 0 estão armazenados nos arquivos denominados GRALHA (*Generic Raw Level Hierarchical Archive*). Estes arquivos, em formato HDF (*Hierarchical Data File*), contêm, além dos dados brutos de imagem, dados orbitais (efemérides e atitude), dados de calibração radiométrica, entre outros.

O nível 1 realiza, basicamente, o processo de correção radiométrica dos dados de imagem. Este produto não é distribuído abertamente ao usuário comum. Quem procura por este tipo de imagem é um profissional interessado nos níveis de cinza dos *pixels*, que não podem ter sofrido alterações inerentes ao processo de transformação geométrica.

O processo de correção radiométrica inclui, basicamente, a calibração relativa, correção

de *pixels* defeituosos e eventualmente restauração do sinal transmitido. O processo de calibração relativa tem como objetivo uniformizar as respostas espectrais dos diferentes detectores, mas sem compromisso com a verdade terrestre, como é o caso da calibração absoluta. O processo de restauração tem como objetivo reduzir as degradações radiométricas inseridas pelo sensor durante a aquisição das imagens (GONZALEZ; WOODS, 2000) e (FONSECA et al., 1996). A restauração é executada por meio da aplicação de filtros espaciais lineares. Esses filtros são definidos a partir da análise da função de transferência de modulação, MTF (*Modulation Transfer Function*), de cada sistema sensor. Este procedimento pode ser utilizado quando solicitado pelo usuário.

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

O nível 2 é o primeiro nível que inclui o processo de correção geométrica. Este é o produto básico, distribuído aos usuários. As imagens desse nível passam por todos os tratamentos radiométricos referentes ao nível 1, além do processo de correção geométrica do sistema.

A correção geométrica do sistema não faz uso de elementos externos, tais como pontos de controle ou modelo representativo da topografia do terreno. Os modelos de correção geométrica utilizam informação sobre a geometria de visada do instrumento, montagem do instrumento no satélite, dados orbitais e um modelo representativo da superfície da Terra.

O nível 3 cresce de importância quando os dados orbitais não são muito precisos, o que causa deslocamento da imagem em relação à referência geográfica e outras deformações. Para resolver estes problemas, o sistema de correção geométrica pode usar pontos de controle para os quais são precisamente conhecidas as coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude), em um determinado *datum*, e que são facilmente identificáveis na imagem.

Para os pontos de controle, as coordenadas obtidas externamente são comparadas com as coordenadas de projeção obtidas pelo modelo do nível 2. A partir desta comparação, é definido um modelo que reduz as diferenças encontradas e, então, este modelo é adotado para toda a imagem. Todos os processos executados neste nível são também executados nos níveis mais elevados.

O produto nível 3 é satisfatório quando se trata de imagens obtidas por sensores de média resolução espacial e em visada nadir (ortogonal à superfície da Terra). Para imagens de sensores de alta resolução espacial, ou de média resolução espacial em visada oblíqua,

geralmente, é necessário uma melhor caracterização do terreno. Neste caso, o modelo de correção geométrica incorpora um MNE (Modelo Numérico de Elevação do Terreno) para representar a variação do relevo na área da imagem. O deslocamento devido ao relevo é proporcional à altitude e ao ângulo de visada. A distorção geométrica da imagem, entretanto, não está diretamente relacionada à altitude, e sim à variação da topografia em relação à altitude média.

Não faz sentido empregar o MNE dissociado de pontos de controle. Estes são necessários para garantir a correta associação entre cada ponto da imagem com uma altitude obtida do MNE. As imagens resultantes do processamento em nível 4 são denominadas como ortorretificadas.

### 3 CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA DE SENSORES ORBITAIS

Antes de abordar os procedimentos de calibração relativa, alguns conceitos sobre radiometria e qualidade de imagens são apresentados.

#### 3.1 Radiometria e Qualidade de Imagens

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

Os sensores medem a radiância a partir da reflexão e espalhamento de irradiância solar da superfície e da atmosfera ([DINGUIRARD; SLATER, 1999](#)). O sinal coletado pelo sensor, na maioria das vezes, é a radiação proveniente do sol que interage com a atmosfera até atingir o alvo e retorna ao sensor interagindo novamente com a atmosfera. A [Figura 3.1](#) apresenta estes elementos e exemplifica os vários caminhos que a radiação eletromagnética pode tomar antes de atingir o sensor.

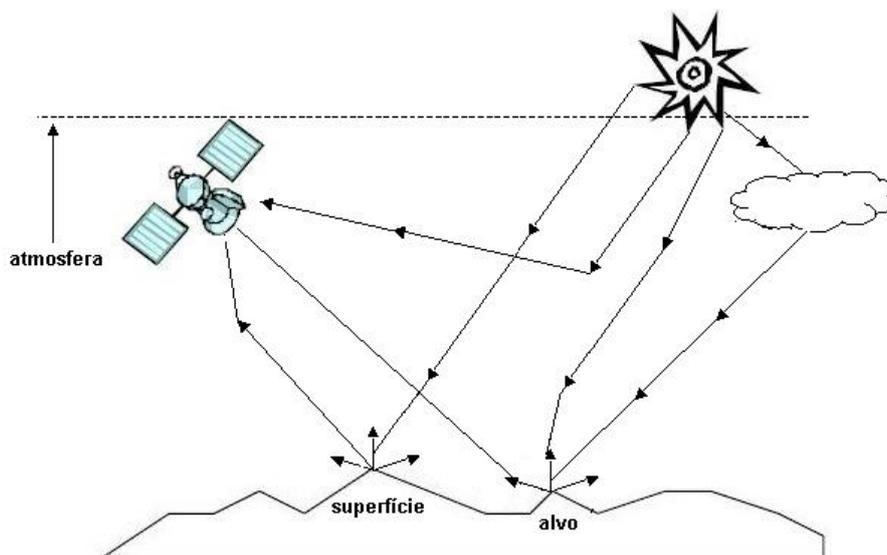


Figura 3.1 - Componentes da radiação proveniente da fonte de energia.

Fonte: Adaptado de [Schowengerdt \(1997\)](#).

O valor de radiância medido pelo sensor para cada banda espectral é dado por:

$$L_b = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) S_b(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_b(\lambda) d\lambda} [W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}] \quad (3.1)$$

onde  $L(\lambda)$  é o sinal de radiância captado pelo detector e  $S_b(\lambda)$  é a função de resposta espectral de cada banda. O valor de radiância  $L_b$  na saída do detector é transformado em número digital.

Durante a aquisição de dados pelos sensores orbitais, vários fatores causam as distorções radiométricas das imagens, tais como, a diferença das condições atmosféricas, iluminação, ângulos de visada, entre outros. Segundo [Mather \(1999\)](#), tais efeitos 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 mídias de gravação.

As degradações radiométricas diminuem a precisão da informação, reduzindo assim a utilidade dos dados. Portanto, a avaliação da qualidade radiométrica deve ser realizada durante a vida útil do satélite afim de detectar anomalias que possam prejudicar a qualidade das imagens.

A qualidade radiométrica de uma imagem está diretamente ligada ao desempenho do sensor (equipamento, montagem, conformidade com especificações, etc.). Quanto mais correta a relação entre a reflectância de um alvo e o nível de cinza de seu *pixel* referente, melhor será a qualidade radiométrica da imagem ([FONSECA et al., 2004](#)). Assim, o objetivo principal da aplicação de correções radiométricas é reduzir a influência de inconsistências ou erros nos valores de brilho da imagem que poderiam limitar a habilidade do pesquisador para interpretar ou processar quantitativamente e analisar as imagens de sensoriamento remoto ([MOREIRA et al., 2003](#)).

De acordo com [Câmara et al. \(2002\)](#), 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 obtidos em laboratório antes de serem avaliadas. Durante o tempo de vida operacional do satélite, os testes de avaliação devem ser realizados periodicamente e, quando necessário, os parâmetros de correção, tal como os coeficientes de calibração relativa, devem ser atualizados.

Uma análise de qualidade radiométrica da imagem deve levar em consideração os seguintes fatores ([FONSECA et al., 2004](#)):

- a) Relação Sinal/Ruído (S/N) - 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 (YONG et al., 2006).
- b) Desempenho da MTF (*Modulation Transfer Function*) - está relacionado com a resolução espacial do sensor e mede a resposta do sensor em função da frequência espacial da cena (BENSEBAA, 2005) e (BENSEBAA et al., 2005).
- c) Calibração relativa - permite determinar os parâmetros de ganho e *offset* de cada detector para corrigir as diferenças nas respostas dos detectores.
- d) Calibração absoluta - fornece coeficientes que permitem a conversão dos valores de nível de cinza para dados físicos, como radiância e reflectância (PONZONI et al., 2005) e (HELDER et al., 1998).
- e) Ruídos - tais como: perda de linha ou coluna na imagem, saturação dos níveis de cinza, etc.

Neste trabalho a ênfase será dada ao estudo da calibração relativa.

### 3.2 Calibração Radiométrica Relativa

Há dois tipos de calibração radiométrica: relativa e absoluta. A calibração relativa, foco deste trabalho, tem como objetivo corrigir o efeito da variação das respostas dos detectores quando submetidos a sinais de mesma intensidade.

A calibração absoluta tem como objetivo permitir a transformação de um valor de nível de cinza contido em imagens geradas em diferentes faixas espectrais, em valores de radiância. Essa transformação é sobretudo importante em trabalhos que requeiram o estabelecimento de relações entre a radiometria da imagem e parâmetros geofísicos ou biofísicos de objetos/recursos naturais existentes na superfície terrestre (PONZONI et al., 2007).

Dentre os procedimentos de calibração de sensores, destacam-se as calibrações em superfície, antes do lançamento e a bordo do satélite, pós-lançamento. A calibração antes do lançamento é realizada em laboratório e geralmente utiliza fontes de radiação internas ao sensor para gerar coeficientes de calibração. Na fase de validação dos dados, são realizadas avaliações para verificar se os coeficientes de calibração obtidos em laboratório estão adequados. Caso sejam encontrados erros na calibração, um novo procedimento de calibração dos detectores com o sensor em órbita é realizado. A calibração em órbita pode ser feita através de lâmpadas padrão, através de medidas de radiação solar ou através de objetos

de referência localizados na superfície terrestre que apresentam características específicas (SLATER et al., 2001), (PONZONI et al., 2006).

Segundo Dinguirard e Slater (1999), na calibração pré-lançamento mudanças inesperadas podem ocorrer com o sensor, desde o momento do lançamento até sua total entrada em órbita. Além disso, as condições operacionais em órbita são invariavelmente diferentes das simuladas em laboratório. Com o passar do tempo, o sensor degrada-se e os coeficientes de calibração precisam ser redefinidos.

A calibração pós-lançamento é necessária para atualizar os coeficientes de calibração radiométrica. Por exemplo, a avaliação do sensor TM do Landsat-5, medida em vôo a partir de referências no solo, foi degradada em 20% em relação àquela determinada antes do lançamento (MORAN et al., 1995). Neste caso, foram realizadas novas medidas para atualizar os parâmetros. Com calibrações regulares, é possível quantificar este desgaste e, dessa forma, manter a qualidade necessária para monitorar mudanças temporais na superfície do planeta (DINGUIRARD; SLATER, 1999), (THOME et al., 1997).

Para o sensor ETM+ do satélite LANDSAT-7 há três dispositivos de calibração pós-lançamento (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY(USGS), 2003) e (NASA, 2008):

- a) Calibrador Interno (IC): útil para calibrar todas as bandas espectrais do sensor ETM+. O IC é constituído por duas lâmpadas e uma fonte escura, sendo que cada lâmpada pode ser configurada como “ligada” ou “desligada”, de tal forma que quatro estágios são possíveis (ambas desligadas [0,0], uma ligada [1,0] ou [0,1] ou ambas ligadas [1,1]);
- b) Calibrador Solar de Abertura Parcial (PASC): usado para calibrar as bandas 1-5, 7 e 8 do sensor ETM+. O PASC consiste de um pequeno dispositivo que permite o sensor ETM+ imagear o sol enquanto a Terra é vista como “escura”. Este calibrador é formado por quatro conjuntos de elementos ópticos idênticos, com ligeiras diferenças em suas orientações, onde cada conjunto consiste de um reflector, um espelho e uma abertura de  $\approx 4mm$ , sendo estes utilizados para o imageamento. O PASC é executado um vez por dia, com uma órbita especificada pelo Sistema de Avaliação de Imagens (IAS);
- c) Calibrador Solar de Abertura Total (FASC): consiste de um painel pintado de branco que reflete a radiação solar para a abertura total do sensor ETM+. Com o conhecimento da reflectância da superfície do painel, da irradiação solar e das condições de geometria, este dispositivo se comporta como um calibrador independente para calibração de abertura total.

No caso da câmara CCD dos satélites CBERS-2 e CBERS-2B existe um calibrador interno, mas que não tem sido usado para realizar a calibração relativa. A calibração relativa é realizada através de dados de calibração obtidos em laboratório, antes do lançamento, por uma esfera integradora. Detalhes deste procedimento serão descritos na Seção 3.3.

Para ilustrar o efeito da calibração, a [Figura 3.2](#) mostra detalhes de uma imagem da câmara CCD do satélite CBERS-2 antes e após a calibração radiométrica relativa.

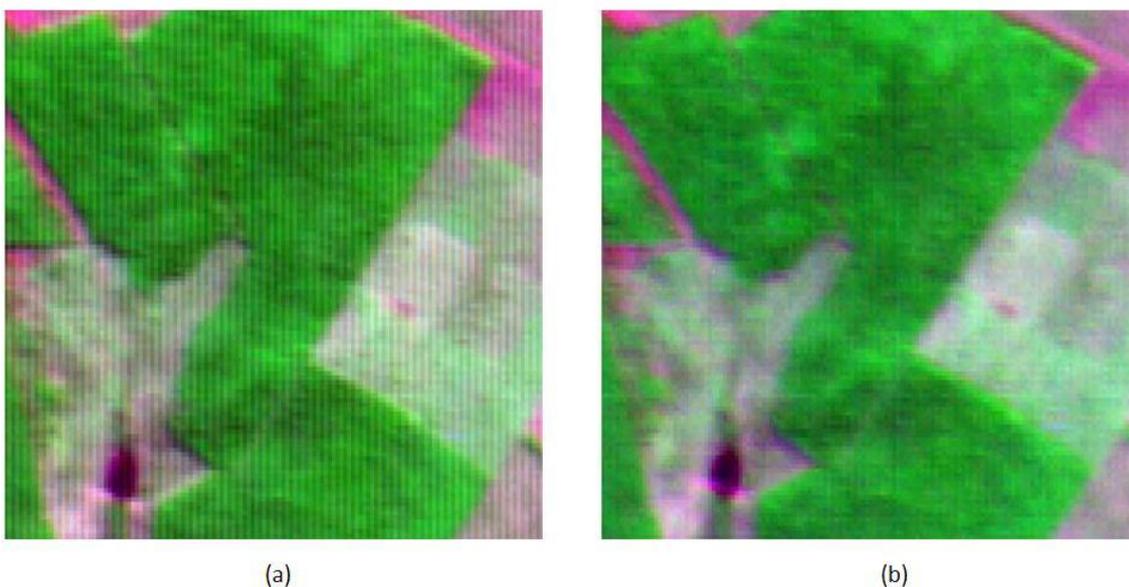


Figura 3.2 - Detalhes da região de Campo Grande (163/123) R3G4B2 - CCD/CBERS-2 (a) antes e (b) após a calibração relativa.

### 3.3 Procedimentos de Calibração em Laboratório

No caso do sensor CCD dos satélites CBERS-1, 2 e 2B, os coeficientes de calibração foram calculados a partir de imagens de calibração obtidas em laboratório por uma esfera integradora.

As imagens de calibração são obtidas durante os testes de integração do satélite, quando a câmara é integrada ao satélite. A [Figura 3.3](#) mostra a câmara CCD integrada ao satélite CBERS-2B e a semi-esfera integradora durante o teste de calibração.

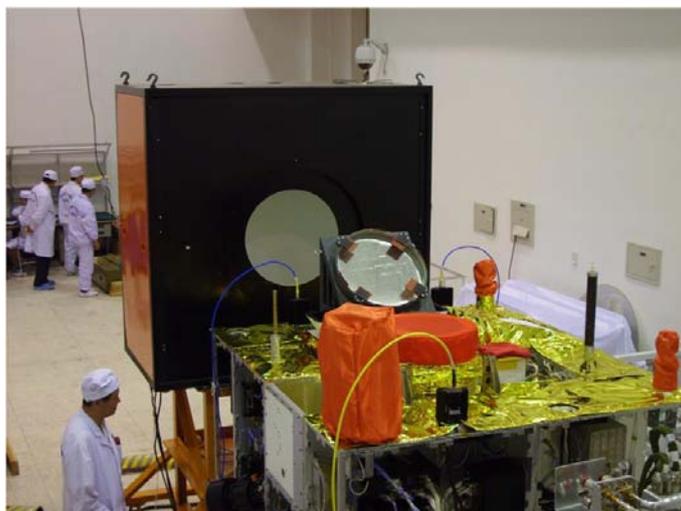


Figura 3.3 - Aquisição das imagens de calibração.

A câmara a ser testada é montada no módulo de carga útil. A semi-esfera integradora é colocada em uma posição na frente da câmara. A energia radiante é emitida e direcionada para o plano focal da câmara através de um espelho montado sobre a câmara.

A semi-esfera integradora fornece a radiância necessária para a calibração pré-lançamento da câmara CCD num intervalo espectral de  $400\text{ nm}$  a  $2500\text{ nm}$ . O equipamento possui 24 lâmpadas de  $150\text{ W}$  divididas em 12 grupos (2 lâmpadas simétricas por grupo) para gerar 12 níveis de iluminação. Cada grupo de lâmpadas pode ser ligado ou desligado individualmente (ZHANG et al., 2001).

Segundo Zhang et al. (2001), a não uniformidade da radiância espectral da semi-esfera integradora é muito pequena, menos de 2%. Isto permite calibrar todos os detectores de cada banda ao mesmo tempo.

A câmara CCD, foco desse estudo, possui dois módulos eletrônicos: o sistema sensor e o sistema de conversão analógico-digital (A/D). É importante observar que nos satélites CBERS-2 e CBERS-2B, os dois módulos do sistema eletrônico, sensor e conversor A/D, são duplicados. Assim temos um sistema principal (M) e um outro redundante (R). Durante o imageamento do satélite, 4 configurações são possíveis: MM, MR, RM, RR. Ou seja, a configuração MR significa: sensor M e conversor R.

Os dois módulos eletrônicos da câmara CCD são integrados somente durante a fase de integração e testes do satélite. Por isso, há a necessidade de se calcular os coeficientes de calibração nesta fase.

Na fase de integração são realizados os seguintes testes e medidas (YONG et al., 2006):

- a) Teste do simulador de cena: obtém as imagens de simulador de cenas para testar o formato dos dados. Através deste teste pode-se analisar também o efeito de vibrações que eventualmente possa existir;
- b) Calibração da semi-esfera integradora: adquire e registra dados de calibração da semi-esfera integradora que serão usados no cálculo dos coeficientes de calibração. Após a análise e o processamento dos dados, os coeficientes de calibração radiométrica são gerados e usados após o lançamento do satélite; o formato dos dados (dados de telemetria, detectores escuros, área de sobreposição, etc) é identificado a fim de localizar cada detector dentro do arranjo;
- c) Calibração com lâmpadas internas: adquire e registra dados de calibração usando lâmpadas internas para verificar se houve mudanças no desempenho da câmara. No caso do CBERS-2 e CBERS-2B, a calibração interna não é utilizada, porque as lâmpadas não possuem uniformidade de radiância espectral adequada;
- d) Resposta espectral e calibração interna: mede a resposta espectral de cada lâmpada de calibração interna para todos os níveis de iluminação.
- e) Resposta espectral e calibração da semi-esfera: mede a resposta espectral da semi-esfera integradora para todos os níveis de iluminação.

Os testes são realizados para cada canal (1 e 2) da câmara CCD, para os diferentes ganhos nominais do sensor (0,59; 1,00; 1,69 e 2,86), para cada banda, cada arranjo e cada nível de iluminação. O ganho do sensor é predefinido para ajustar o sinal de cada banda a fim de satisfazer todos os requisitos.

O procedimento de calibração da câmara CCD é mostrado na [Tabela 3.1](#) (YONG et al., 2006).

Tabela 3.1 - Processo de calibração da câmara CCD.

<b>Testes</b>	<b>Processos</b>
Preparação	Ajustar a temperatura: 22,3 C Umidade relativa: 34%
Medidas de radiância	Ligar a fonte de alimentação da esfera integradora; Medir a radiância espectral da esfera do nível de radiância com um radiômetro espectral; Verificar os dados medidos, se não houver problema, desligar a fonte de alimentação da esfera integradora; Processar os dados de radiância espectral da esfera integradora.
Instalação da câmara CCD	Colocar a câmara CCD na frente da abertura da esfera integradora.
Ligando o sistema	Ligar a fonte de alimentação da esfera integradora; Ligar o sistema de aquisição da câmara CCD; Ligar o sistema eletrônico da câmara CCD.
Aquisição dos dados de saída da câmara CCD	Adquirir os dados de saída da câmara CCD do nível de radiância alto para o baixo (sem luz), para cada canal e cada ganho; Salvar os valores digitais adquiridos.
Finalizando a calibração	Confirmar se as aquisições de cada estado foi concluída corretamente ou não; Se todas as aquisições forem concluídas corretamente, o sistema de teste é desligado e a câmara CCD é tirada de frente da abertura da esfera integradora.
Analisar e processar os dados de calibração	Gerar os coeficientes de calibração radiométrica relativa; Gerar os coeficientes de calibração radiométrica absoluta.

Fonte: (YONG et al., 2006).

A [Figura 3.4](#) mostra um exemplo de imagem de calibração de ganho 1,0 com 12 níveis de iluminação ( $L = 0, 1, 2, 3, 4 \dots 11$ ) referentes à lâmpada da semi-esfera integradora, da banda 3 da câmara CCD do satélite CBERS-2. Para cada nível de iluminação  $L$ , aproximadamente 1000 linhas de imagem são gravadas para cada banda e cada arranjo. Os dados são salvos em um arquivo em ordem crescente em relação à sua intensidade de sinal, para cada banda (1, 2, 3, 4 e 5) e cada arranjo (1, 2 e 3). Problemas na aquisição das imagens de calibração podem acarretar saturação dos níveis de cinza, o que as tornam inutilizáveis. A [Figura 3.4](#) mostra este efeito de saturação para os níveis de iluminação mais altos.

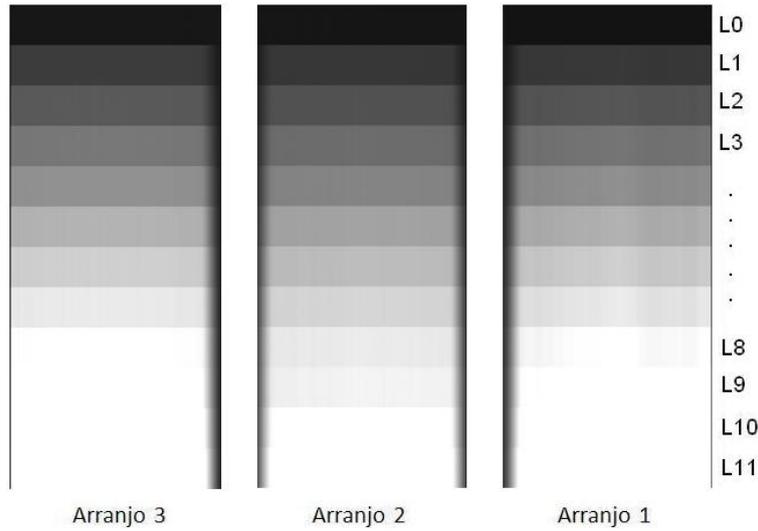


Figura 3.4 - Imagens de calibração - Banda3-CCD/CBERS-2.

De acordo com a [Figura 3.4](#), o nível  $L0$  representa a ausência de iluminação, usado para calcular o coeficiente de calibração *offset*. Os outros níveis ( $L1, L2, L3...L11$ ) são adquiridos de acordo com o nível de iluminação da lâmpada da semi-esfera integradora. Existe ainda, oito detectores escuros (DE) no final de cada arranjo.

Para alguns níveis de iluminação e bandas espectrais, as imagens de calibração apresentam algumas anomalias (saturação e variações abruptas dos níveis de cinza). Assim, para cada banda são escolhidos os melhores níveis de iluminação para o cálculo dos coeficientes de calibração. Daqui para frente, as imagens obtidas em laboratório, durante os testes de calibração, antes do lançamento, serão chamadas de imagens de calibração.

### 3.4 Método Tradicional de Calibração Relativa

O processo de calibração relativa, geralmente, é modelado matematicamente por uma função linear:

$$NC'_i = a_i \cdot NC_i + b_i \quad (3.2)$$

Os parâmetros do modelo são conhecidos como ganho (multiplicativo:  $a$ ) e *offset* (aditivo:  $b$ ). O nível de cinza calibrado ( $NC'_i$ ) de um detector  $i$  é função somente do nível de cinza original ( $NC_i$ ) deste mesmo detector  $i$ . Cada detector tem o seu par de parâmetros de calibração ( $a_i, b_i$ ).

Geralmente, os valores de ganho ( $a_i$ ) e *offset* ( $b_i$ ) são obtidos em laboratório e fornecidos

pelo fabricante da câmara. Como visto na Seção 3.3, no caso da câmara CCD dos satélites da série CBERS (1, 2 e 2B), os coeficientes de calibração foram obtidos durante os testes de calibração na fase de integração e testes do satélite.

O método de calibração relativa tradicional calcula o coeficiente *offset* a partir de uma imagem uniforme de reflectância zero ( $L0$ ). O valor do nível de cinza de cada *pixel* da imagem de calibração é subtraído do coeficiente *offset*. A partir desta imagem, calcula-se o ganho dos detectores para uniformizar as respostas dos mesmos.

Assim, o procedimento de geração dos coeficientes de calibração relativa de cada detector  $i$  é dado da seguinte forma:

- a) Calcula-se o coeficiente *offset*  $b_i$  através da média dos valores de níveis de cinza da imagem  $L0$ ;
- b) Calcula-se o coeficiente ganho  $a_i$  através da média dos valores de níveis de cinza da imagem de calibração dos níveis de iluminação diferentes de zero.

No caso particular da câmara CCD do CBERS, o modelo apresentado na [Equação 3.2](#) não é suficiente para gerar imagens com boa qualidade radiométrica, devido aos seguintes fatores ([FONSECA et al., 2004](#)):

- a) Os detectores podem apresentar respostas diferente de zero quando não há nível de iluminação. Estes valores podem ser medidos para cada detector através dos oito detectores escuros em cada um dos três arranjos de detectores;
- b) Os três arranjos de detectores apresentam respostas diferentes (ganho) para um determinado nível de iluminação e alvo;
- c) Os valores de níveis de cinza de um detector podem variar ao longo da órbita para um mesmo alvo e mesmo nível de iluminação.

No próximo capítulo, são apresentados os efeitos de distorções radiométricas presentes nas imagens da câmara CCD dos satélites CBERS-2 e CBERS-2B. Para uma melhor análise desses efeitos, imagens de calibração e imagens brutas, de nível de processamento 0, são utilizadas.

#### 4 CARACTERIZAÇÃO RADIOMÉTRICA DA CÂMARA CCD

Para analisar as características radiométricas das imagens da câmara CCD, algumas imagens do nível de processamento 0 com diferentes tipos de alvos: urbano, agricultura e vegetação, foram selecionadas. A escolha das imagens da câmara CCD do CBERS-2 foi baseada nos seguintes critérios:

- a) Diferentes alvos importantes em várias áreas de aplicação em sensoriamento remoto;
- b) Ausência de nuvens;
- c) Imagens adquiridas em diferentes datas, mesma órbita/ponto para os anos de 2004, 2005, 2006 e 2007, do mesmo mês e com dias próximos.

No caso do satélite CBERS-2B, foram selecionadas imagens somente do ano de 2007 devido ao recente lançamento do satélite.

As informações das imagens selecionadas da câmara CCD dos satélites CBERS-2 e CBERS-2B, são apresentadas nas Tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente.

Tabela 4.1 - Informações das imagens selecionadas - CBERS-2.

CBERS-2	Cena	Órbita/Ponto	Datas
Urbano	Campo Grande	163/123	30/06/2004, 03/06/2005, 28/06/2006, 01/06/2007
	Rio de Janeiro	151/125	10/07/2004, 04/08/2005, 08/07/2006, 07/07/2007
	Ribeirão Preto	156/124	16/08/2004, 15/08/2005, 14/08/2006, 13/08/2007
Agricultura	Goiás	161/121	06/07/2004, 31/07/2005, 04/07/2006, 03/07/2007
	Minas Gerais	157/121	13/08/2004, 12/08/2005, 11/08/2006, 10/08/2007
	Mato Grosso	166/114	17/07/2004, 16/07/2005, 15/07/2006, 14/07/2007
Vegetação	Paraguai	170/123	31/07/2004, 30/07/2005, 03/07/2006, 02/07/2007
	Rio Grande do Sul	158/133	07/03/2004, 06/03/2005, 31/03/2006, 30/03/2007
	Bolívia	173/117	22/07/2004, 21/07/2005, 20/07/2006, 23/06/2007

Tabela 4.2 - Informações das imagens selecionadas - CBERS-2B.

<b>CBERS-2B</b>	<b>Cena</b>	<b>Órbita/Ponto</b>	<b>Datas</b>
Urbano	Campo Grande	163/123	27/09/2007
	Rio de Janeiro	151/125	07/10/2007
	Ribeirão Preto	156/124	04/01/2008
Agricultura	Goiás	161/121	29/10/2007
	Minas Gerais	157/121	15/10/2007
	Mato Grosso	165/114	17/10/2007
Vegetação	Paraguai	170/123	28/10/2007
	Rio Grande do Sul	158/133	07/11/2007
	Bolívia	173/117	19/10/2007

Como citado anteriormente, todas as imagens selecionadas representam dados de imagem em estado bruto, ou seja, nível de processamento 0. Não há qualquer alteração nos valores dos *pixels*. As imagens deste nível são separadas por arranjos, conforme a [Figura 2.3](#), e armazenadas no formato RAW.

Imagens de calibração ( $L = 0, 1, 2, 3, 4...11$ ) são também utilizadas na análise das características radiométricas da câmara CCD. Deve-se ressaltar também que todos os experimentos foram realizados com imagens de ganho do sensor 1,0 e configuração da câmara MM, que é a mais usada.

#### 4.1 Imagem de Calibração $L0$

Na ausência total de sinal (reflectância igual a zero), o nível de cinza dos detectores deveria ser zero ou muito próximo de zero. Mas, na prática, os valores de nível de cinza (NC) da imagem de calibração  $L0$  da câmara CCD podem apresentar valores diferentes de zero. Afim de analisar a variação dos NC das imagens de calibração no nível  $L0$ , medidas estatísticas foram calculadas.

As Tabelas [4.3](#), [4.4](#) e [4.5](#) apresentam os valores de níveis de cinza mínimos, máximos, média e desvio-padrão para o nível de iluminação  $L0$  de cada arranjo e banda da imagem de calibração do CBERS-2, excluindo os detectores escuros (DE).

Tabela 4.3 - Arranjo 1: medidas estatísticas na imagem de calibração *L0*/CBERS-2.

<b>Banda</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>
B1	14	26	20,2916	1,2487
B2	15	28	21,0206	1,1782
B3	13	25	19,0108	1,2877
B4	14	26	20,3251	1,3292
B5	23	34	28,4506	1,3186

Tabela 4.4 - Arranjo 2: medidas estatísticas na imagem de calibração *L0*/CBERS-2.

<b>Banda</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>
B1	17	31	22,3899	1,2423
B2	15	26	19,7298	0,9414
B3	16	28	21,3208	1,2673
B4	14	25	19,3997	1,3352
B5	23	34	28,9315	0,7754

Tabela 4.5 - Arranjo 3: medidas estatísticas na imagem de calibração *L0*/CBERS-2.

<b>Banda</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>
B1	10	35	29,1990	1,1074
B2	8	27	21,0182	1,1501
B3	7	28	22,6794	0,9518
B4	0	29	22,2791	1,3271
B5	0	34	28,4550	1,4312

Como se pode observar nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5, o valor médio dos níveis de cinza dos detectores da imagem de calibração *L0* são similares para os três arranjos da mesma banda, com a exceção da banda 1, onde o valor médio do arranjo 3 é superior aos valores dos outros dois arranjos.

No processo de calibração relativa, os valores médios são utilizados para corrigir a variação de brilho entre as respostas dos detectores. Para cada valor de nível de cinza subtrai-se o valor de *offset* do detector correspondente.

As Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8, apresentam os valores de níveis de cinza mínimos, máximos, média e desvio-padrão medidos a partir das imagens de calibração *L0* da câmara CCD do satélite CBERS-2B.

Tabela 4.6 - Arranjo 1: medidas estatísticas na imagem de calibração L0/CBERS-2B.

Banda	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-padrão
B1	0	14	5,2961	1,4368
B2	9	17	12,9176	0,9092
B3	5	19	9,0297	0,9423
B4	13	23	16,3501	1,1597
B5	5	13	9,1676	1,0932

Tabela 4.7 - Arranjo 2: medidas estatísticas na imagem de calibração L0/CBERS-2B.

Banda	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-padrão
B1	9	19	13,2498	1,2623
B2	11	20	15,0084	0,9265
B3	13	25	21,3767	1,0481
B4	18	26	22,1179	0,9425
B5	4	12	7,7497	0,7424

Tabela 4.8 - Arranjo 3: medidas estatísticas na imagem de calibração L0/CBERS-2B.

Banda	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-padrão
B1	8	24	14,7524	1,0100
B2	10	25	15,9344	0,9776
B3	9	25	12,8173	0,8737
B4	16	30	18,5473	0,5811
B5	6	12	8,5266	0,6114

No caso do CBERS-2B, a variação do valor médio dos níveis de cinza entre os arranjos, para uma mesma banda, é maior do que no CBERS-2.

## 4.2 Detectores Escuros

Com relação aos oito detectores escuros (DE) dispostos no final de cada arranjo, os valores de NC (nível de cinza) deveriam também ser próximos de zero, mesmo na presença de iluminação. Na prática, verificou-se que estes detectores apresentam valores diferentes de zero. Além disso, os valores médios dos níveis de cinza dos oito detectores escuros variam de linha para linha, impedindo uma perfeita calibração da imagem. A [Figura 4.1](#) apresenta a variação média dos níveis de cinza de 100 linhas referentes aos oito detectores escuros da imagem de calibração L0 do arranjo 1, banda 3 do CBERS-2. Esta variação de NC nas linhas é um indicativo da necessidade de realizar a calibração relativa linha a linha,

tomando como referência os detectores escuros da imagem de calibração *L0*.

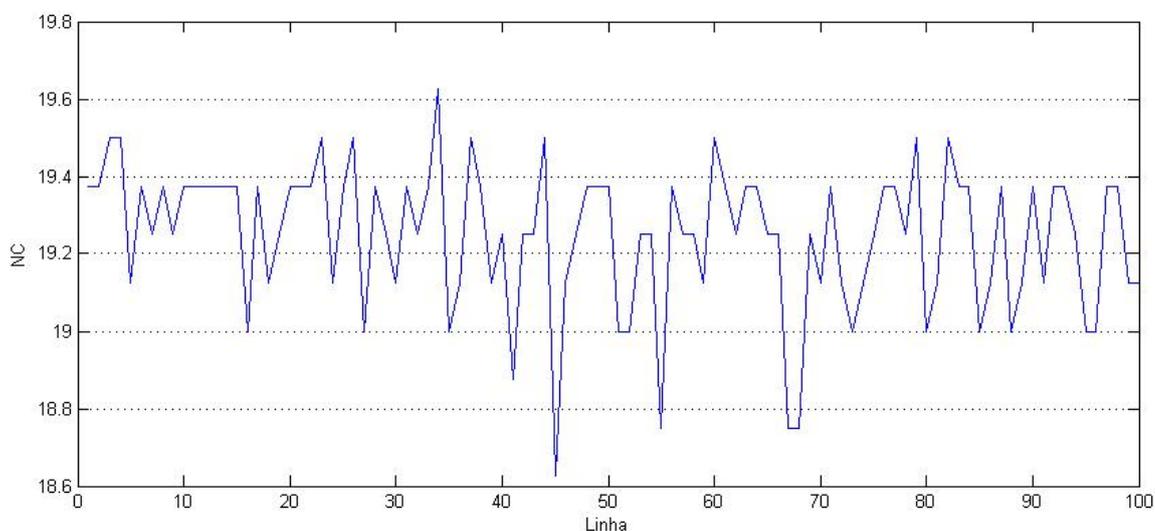


Figura 4.1 - Variação média dos detectores escuros - nível *L0*, arranjo 1, banda 3/CBERS-2.

As Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam os valores de níveis de cinza mínimos, máximos, média e desvio-padrão para os oito detectores escuros, dispostos no final de cada arranjo e de cada banda da imagem de calibração do CBERS-2. Os valores foram calculados usando imagem de calibração *L0*.

Tabela 4.9 - Arranjo 1: medidas estatísticas dos detectores escuros da imagem de calibração *L0*/CBERS-2.

<b>Banda</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>
B1	19	24	21,5613	0,6768
B2	19	27	21,4767	1,5419
B3	17	22	19,2487	1,3384
B4	18	23	20,4835	1,3015
B5	26	30	28,4490	1,1868

Tabela 4.10 - Arranjo 2: medidas estatísticas dos detectores escuros da imagem de calibração L0/CBERS-2.

<b>Banda</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>
B1	19	25	21,6820	0,8222
B2	16	22	19,2844	1,2186
B3	19	24	21,3420	1,2015
B4	16	23	19,6075	0,8683
B5	27	31	28,9899	0,8433

Tabela 4.11 - Arranjo 3: medidas estatísticas dos detectores escuros da imagem de calibração L0/CBERS-2.

<b>Banda</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>
B1	27	32	29,7740	0,7096
B2	18	24	20,8039	0,9578
B3	20	25	22,4414	1,3125
B4	21	26	23,5475	0,6214
B5	26	31	28,9768	0,8805

Para as imagens de calibração da câmara CCD do satélite CBERS-2, pode-se observar uma variação de 16 a 32 NC entre as bandas nos oito detectores escuros. Esses valores são considerados altos para estes detectores que deveriam possuir níveis de cinza próximos de zero.

A média total de todos os detectores escuros, para todas as bandas, arranjos, da imagem de calibração L0 é de aproximadamente 23 NC.

No caso do satélite CBERS-2B, os valores dos detectores escuros para cada arranjo e banda das imagens de calibração possuem uma variação de 3 a 26 NC, conforme mostram as Tabelas 4.12, 4.13 e 4.14.

Tabela 4.12 - Arranjo 1: medidas estatísticas dos detectores escuros da imagem de calibração L0/CBERS-2B.

<b>Banda</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>
B1	3	9	6,5192	0,6925
B2	10	16	13,4201	1,0448
B3	7	12	9,7908	0,7780
B4	15	19	17,2139	0,9318
B5	7	12	9,6260	0,6269

Tabela 4.13 - Arranjo 2: medidas estatísticas dos detectores escuros da imagem de calibração L0/CBERS-2B.

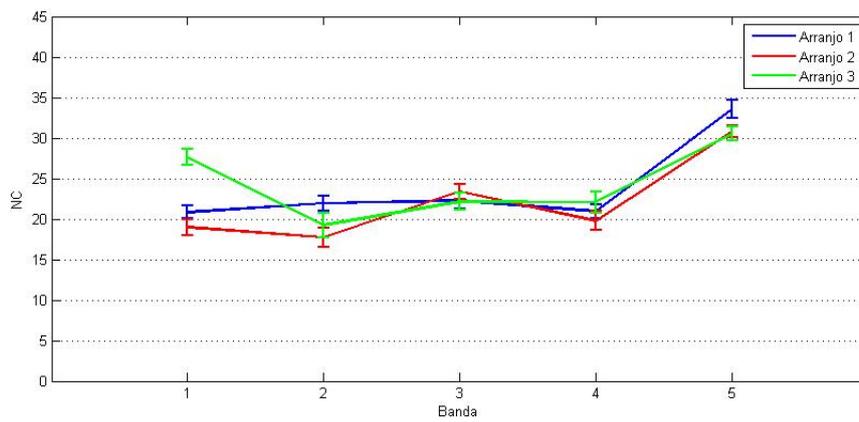
<b>Banda</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>
B1	10	17	13,4599	1,3423
B2	12	17	14,9272	0,7228
B3	20	24	21,6843	0,5918
B4	20	25	20,6449	0,7067
B5	5	11	8,1499	0,8743

Tabela 4.14 - Arranjo 3: medidas estatísticas dos detectores escuros da imagem de calibração L0/CBERS-2B.

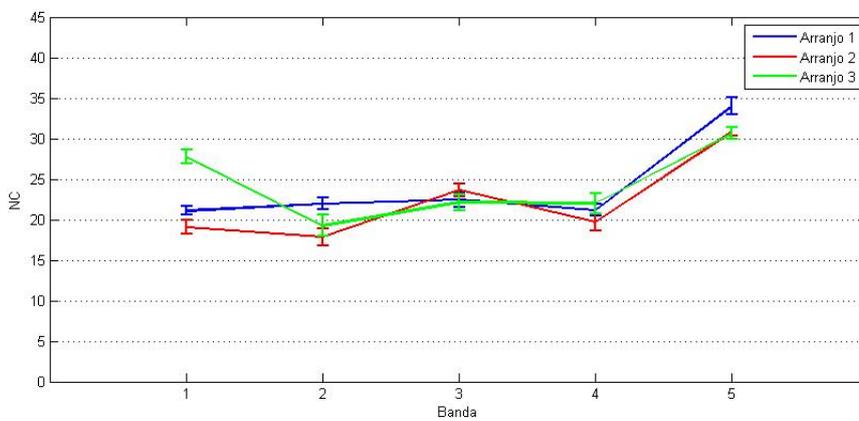
<b>Banda</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>
B1	13	20	16,4009	1,3443
B2	13	18	16,3524	1,1193
B3	11	16	13,4289	1,0414
B4	20	26	22,0563	1,2747
B5	6	12	8,4899	1,4320

Como pode ser observado nas tabelas anteriores, o menor valor de nível de cinza dos oito detectores escuros das imagens de calibração do CBERS-2B é para o arranjo 1 da banda 1, possuindo apenas 3 NC. Para a mesma imagem, mesmo arranjo, desta mesma banda, foi encontrado também o menor valor de *offset*, conforme mostrado na [Tabela 4.6](#).

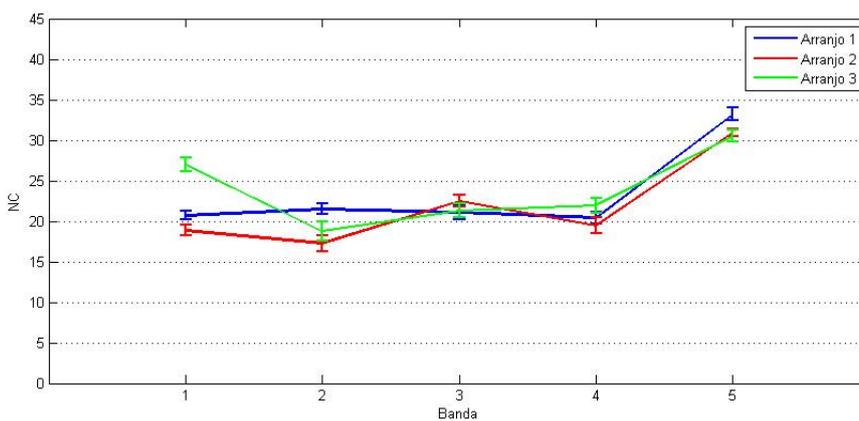
Para as imagens brutas, nível de processamento 0, os detectores escuros também possuem uma variação de níveis de cinza relevante para cada banda. As Figuras [4.2](#), [4.3](#), [4.4](#) e [4.5](#) mostram a variação média dos detectores escuros ao longo do tempo (por ano), para cada tipo de alvo selecionado da câmara CCD do satélite CBERS-2.



(a) Urbano - Campo Grande (163/123)

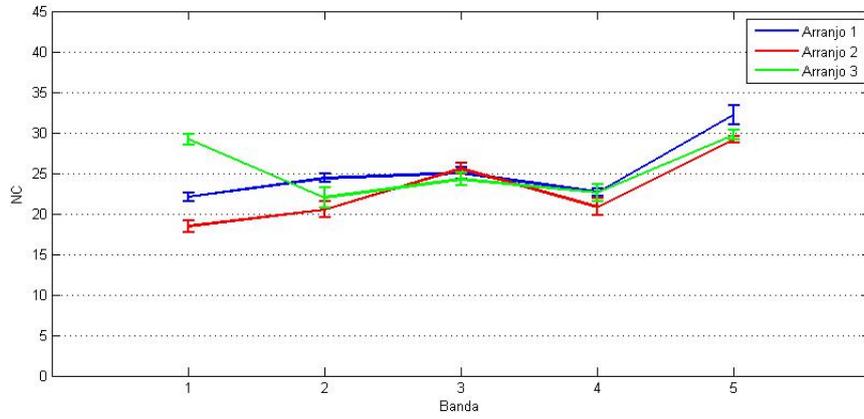


(b) Agricultura - Goiás (161/121)

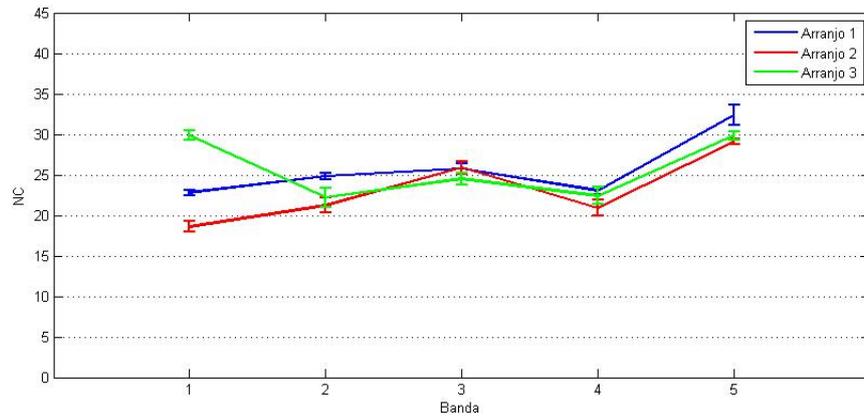


(c) Vegetação - Paraguai (170/123)

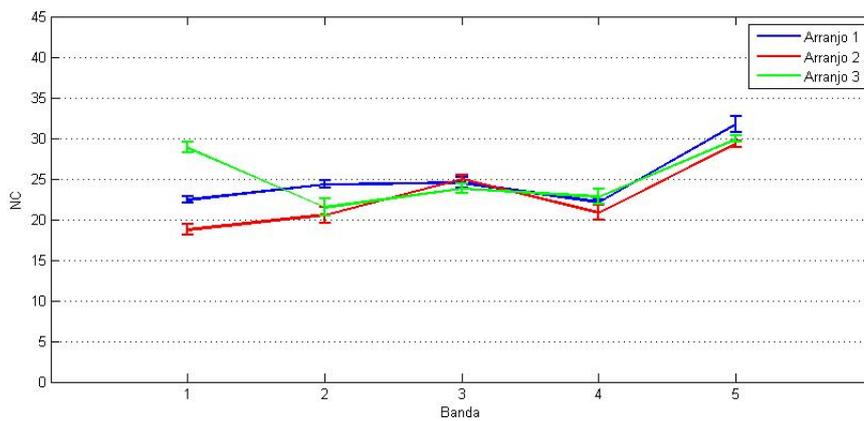
Figura 4.2 - Média dos detectores escuros - 2004 / CBERS-2.



(a) Urbano - Campo Grande (163/123)

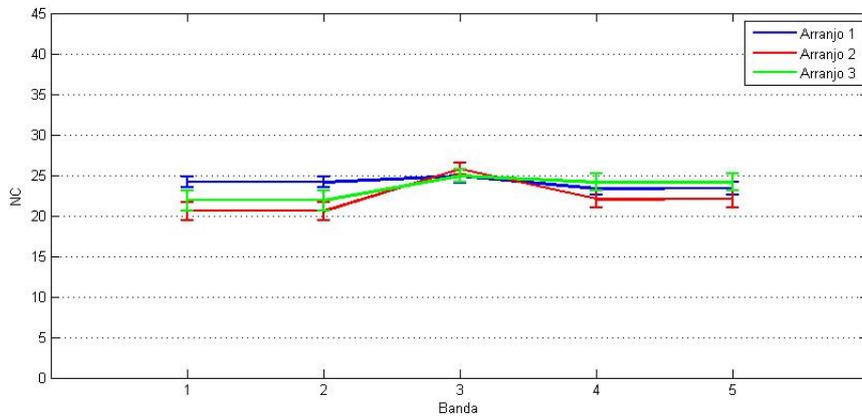


(b) Agricultura - Goiás (161/121)

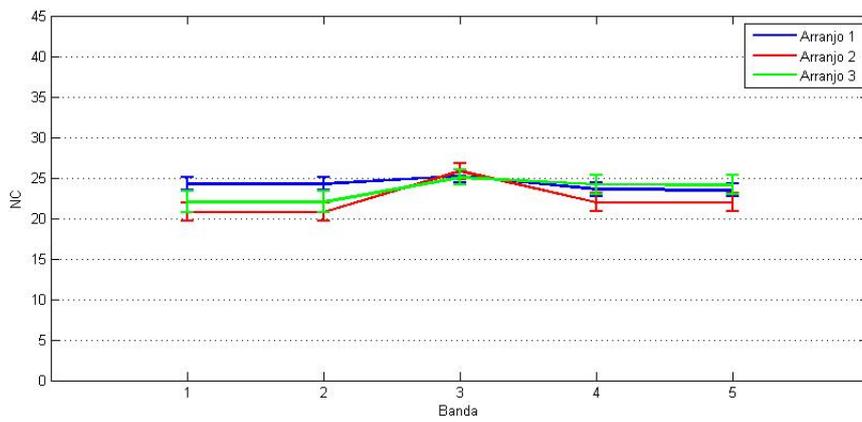


(c) Vegetação - Paraguai (170/123)

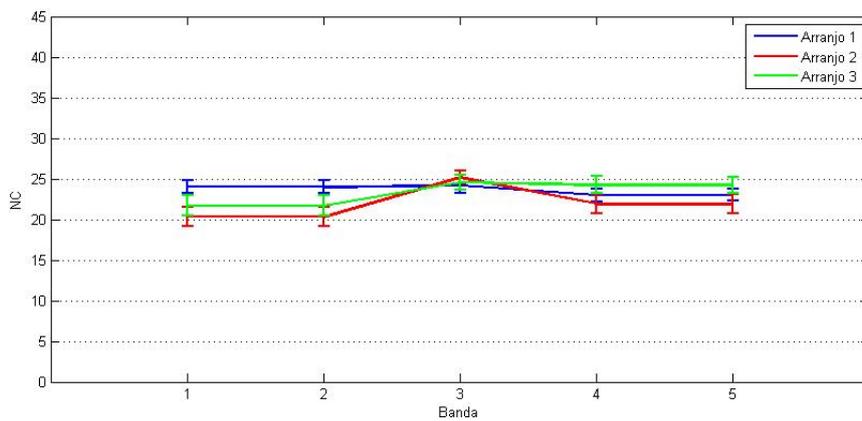
Figura 4.3 - Média dos detectores escuros - 2005 / CBERS-2.



(a) Urbano - Campo Grande (163/123)

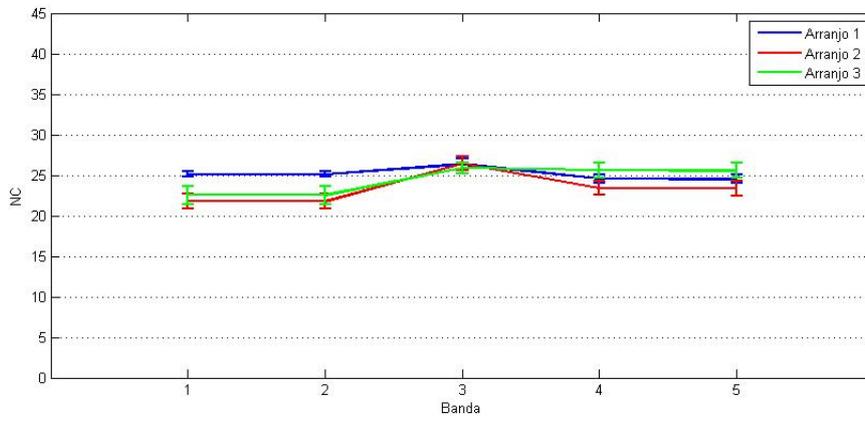


(b) Agricultura - Goiás (161/121)

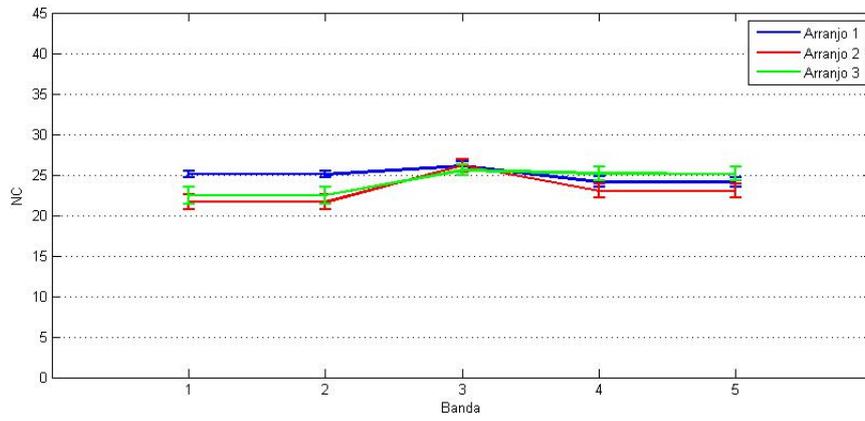


(c) Vegetação - Paraguai (170/123)

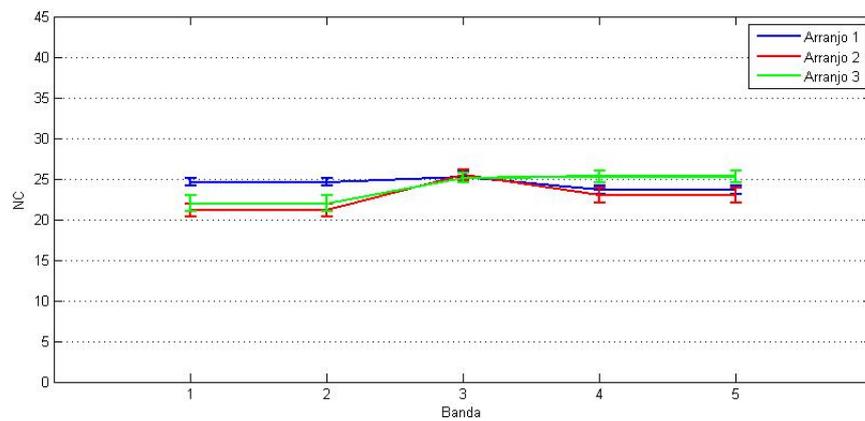
Figura 4.4 - Média dos detectores escuros - 2006 / CBERS-2.



(a) Urbano - Campo Grande (163/123)



(b) Agricultura - Goiás (161/121)



(c) Vegetação - Paraguai (170/123)

Figura 4.5 - Média dos detectores escuros - 2007 / CBERS-2.

Como se pode observar nas Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, para cada banda, de uma mesma região, existe uma variação dos valores médios dos níveis de cinza dos detectores escuros para os três arranjos da câmara CCD. A banda 1 possui a maior variação de níveis de cinza entre os arranjos.

Os resultados também mostram que todas as bandas apresentam a mesma tendência de variação dos níveis de cinza médios dos detectores escuros, independente do tipo de alvo selecionado, para uma mesma data. Isto é um bom resultado, pois mostra que existe uma estabilidade do sensor.

A média total de todos os detectores escuros, para todas as bandas, arranjos, e para os três tipos de alvos coletados da câmara CCD do CBERS-2, é de  $\pm 25NC$ . O mesmo resultado foi obtido no estudo realizado pela Nasa (2007), utilizando imagens de áreas homogêneas. O mesmo valor também foi obtido para as imagens de calibração utilizando todos os níveis de iluminação, com a exclusão dos níveis saturados.

Portanto, devido aos diferentes valores de níveis de cinza dos detectores escuros para cada arranjo e banda, os coeficientes de calibração relativa são calculados separadamente para cada arranjo e banda.

Como a variação ocorre ao longo do tempo, é importante que os coeficientes de calibração sejam atualizados periodicamente.

### 4.3 Detectores Pares e Ímpares

A conversão analógico-digital dos sinais dos detectores de cada arranjo da câmara CCD é realizada utilizando-se duas áreas de armazenamento, uma para os detectores de números pares e outra para os detectores de números ímpares. As respostas destes detectores são combinadas para gerar os dados de saída. Neste caso, podem ocorrer diferenças nos ganhos e nos *offsets* para cada detector, resultando em imagens não equalizadas. Este efeito é praticamente constante para todos os detectores, como mostram as Figuras 4.6 e 4.7.

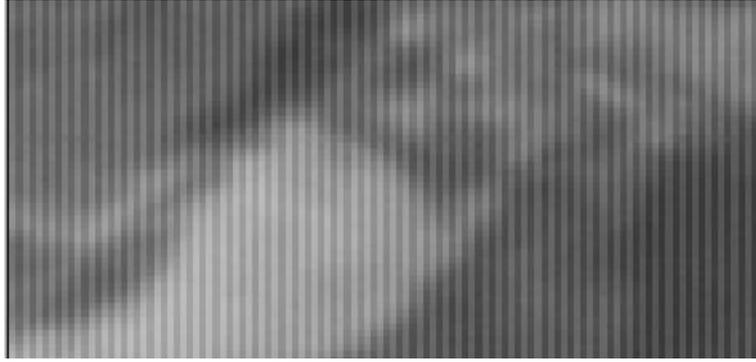


Figura 4.6 - Imagem com variação radiométrica nos detectores pares e ímpares.

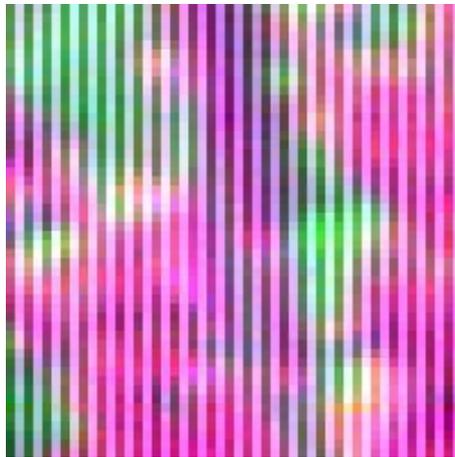


Figura 4.7 - Listras verticais causadas pela variação radiométrica dos detectores pares e ímpares na imagem com composição colorida (2B3G4R).

Este efeito é corrigido com a aplicação dos coeficientes de calibração. Se a correção não for feita adequadamente, a imagem apresentará uma aparência “quadriculada” após a correção geométrica (nível de processamento 2), devido à rotação da imagem, como mostra a Figura 4.8.

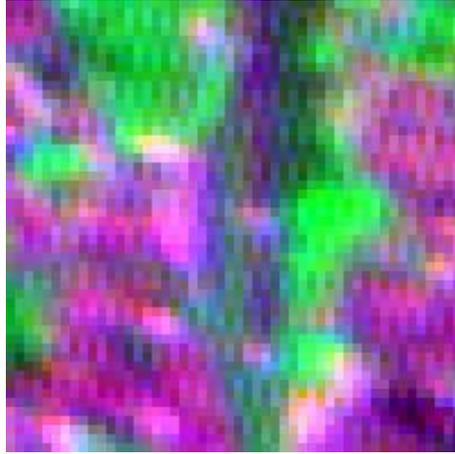


Figura 4.8 - Efeito da calibração radiométrica imperfeita após correção geométrica.

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam a variação dos valores médios dos níveis de cinza entre os detectores pares e ímpares (sem incluir os detectores escuros) para a banda 1 da imagem de calibração ( $L = 0, 1, 2, 3, 4 \dots 11$ ) da câmara CCD dos satélites CBERS-2 e CBERS-2B, respectivamente. Os detectores pares apresentam resposta mais alta.

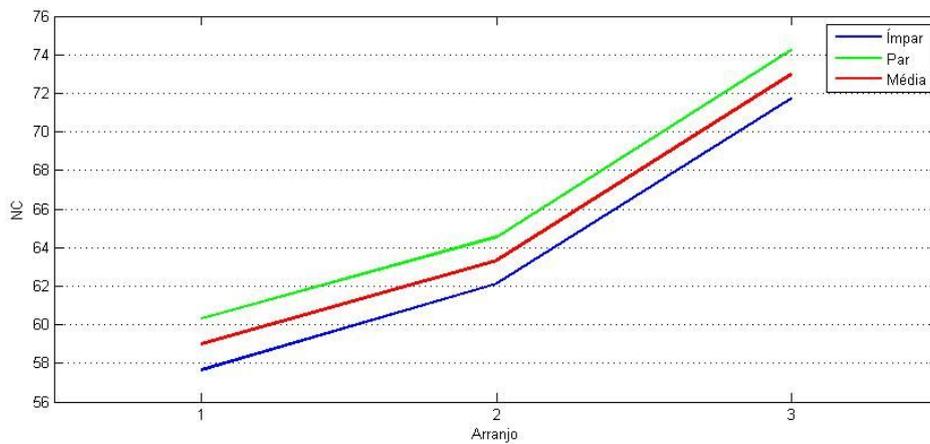


Figura 4.9 - Média dos detectores pares e ímpares da imagem de calibração - Banda1/CBERS-2.

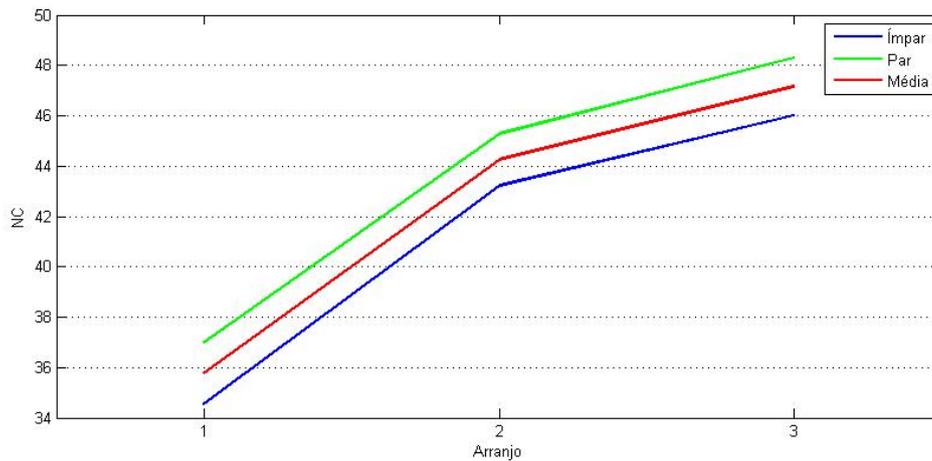


Figura 4.10 - Média dos detectores pares e ímpares da imagem de calibração - Banda1/CBERS-2B.

Para as outras bandas (2, 3, 4 e 5) das imagens de calibração ( $L = 0, 1, 2, 3, 4...11$ ), a variação dos valores médios dos níveis de cinza entre os detectores pares e ímpares também é significativa. Conforme mostram as Tabelas 4.15 e 4.16, a diferença dos valores médios dos níveis de cinza dos detectores pares e ímpares para os três arranjos da câmara CCD do satélite CBERS-2 é 3 NC. Para o satélite CBERS-2B, esta diferença é um pouco menor, aproximadamente 2 NC entre os detectores pares e ímpares.

Tabela 4.15 - Média dos valores de níveis de cinza dos detectores pares e ímpares para as imagens de calibração do CBERS-2.

CBERS-2		Banda 1	Banda2	Banda3	Banda4	Banda5
Arranjo 1	Ímpar	57,6621	101,9172	92,3117	94,3396	118,8063
	Par	60,3286	104,7069	95,5474	97,1960	121,4586
Arranjo 2	Ímpar	62,1160	97,2569	87,5455	87,4119	111,8020
	Par	64,5443	100,1391	90,4109	90,0710	114,3463
Arranjo 3	Ímpar	71,7127	95,6199	96,5736	89,7142	116,8345
	Par	74,2396	98,7190	99,5240	92,2593	119,4668

Tabela 4.16 - Média dos valores de níveis de cinza dos detectores pares e ímpares para as imagens de calibração do CBERS-2B.

CBERS-2B		Banda 1	Banda2	Banda3	Banda4	Banda5
Arranjo 1	Ímpar	34,5341	75,5371	107,5568	101,0257	71,3391
	Par	36,9820	77,3421	108,5892	102,6912	73,5514
Arranjo 2	Ímpar	43,2233	78,4399	107,7382	101,3056	68,3773
	Par	45,2832	80,6321	108,9723	103,3807	70,5745
Arranjo 3	Ímpar	46,0142	75,3392	102,6317	95,7925	69,6471
	Par	48,2936	77,3935	104,1939	97,2935	71,7517

A diferença entre os níveis de cinza, entre os detectores pares e ímpares, também ocorre nos detectores escuros. As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam a variação dos valores médios dos níveis de cinza entre os detectores escuros pares e ímpares para a banda 1 da imagem de calibração ( $L = 0, 1, 2, 3, 4 \dots 11$ ) da câmara CCD do CBERS-2 e CBERS-2B, respectivamente. Os detectores escuros pares também apresentam resposta mais alta.

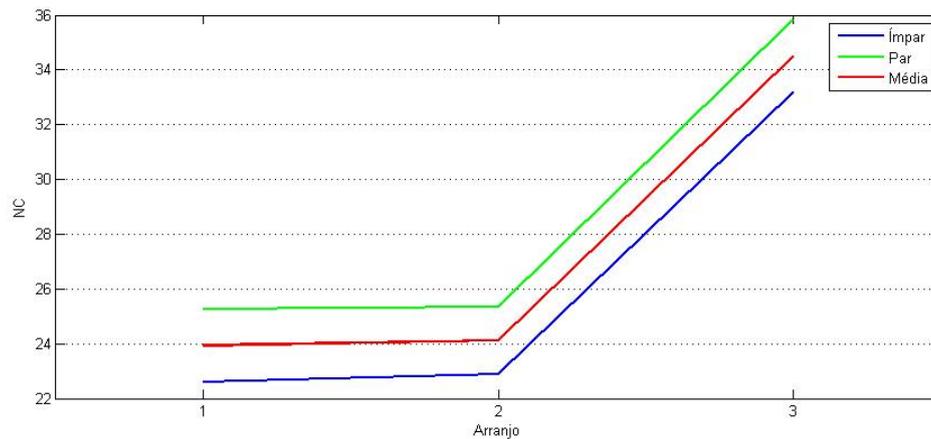


Figura 4.11 - Média dos detectores escuros pares e ímpares da imagem de calibração - Banda1/CBERS-2.

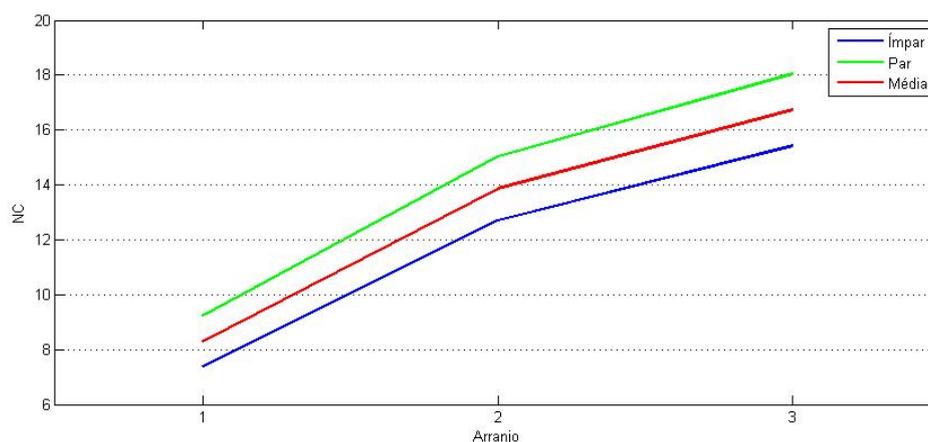


Figura 4.12 - Média dos detectores escuros pares e ímpares da imagem de calibração - Banda1/CBERS-2B.

A variação dos valores médios dos níveis de cinza entre os detectores escuros pares e ímpares também é significativa para as outras bandas (2, 3, 4 e 5) das imagens de calibração ( $L = 0, 1, 2, 3, 4 \dots 11$ ). Conforme mostram as Tabelas 4.17 e 4.18, a diferença dos valores médios dos níveis de cinza dos detectores escuros pares e ímpares para os três arranjos da câmara CCD/CBERS-2 é de 3 NC. O mesmo acontece para o satélite CBERS-2B, sendo esta diferença de aproximadamente 2 NC entre os detectores pares e ímpares.

Tabela 4.17 - Média dos valores de níveis de cinza dos detectores escuros pares e ímpares para as imagens de calibração do CBERS-2.

CBERS-2		Banda 1	Banda2	Banda3	Banda4	Banda5
Arranjo 1	Ímpar	22,6058	21,0718	26,0337	22,1181	42,1924
	Par	25,2654	24,1795	28,9223	24,5017	44,3195
Arranjo 2	Ímpar	22,8940	19,6123	24,0141	19,2206	30,9366
	Par	25,3486	21,6614	26,7147	22,0624	33,4395
Arranjo 3	Ímpar	33,1641	22,0945	24,7609	22,7975	30,0951
	Par	35,8100	24,6959	27,7384	25,4315	32,6527

Tabela 4.18 - Média dos valores de níveis de cinza dos detectores escuros pares e ímpares para as imagens de calibração do CBERS-2B.

CBERS-2B		Banda 1	Banda2	Banda3	Banda4	Banda5
Arranjo 1	Ímpar	7,3983	16,6987	21,6694	21,4231	10,4720
	Par	9,2135	18,2467	22,8457	22,7468	11,9327
Arranjo 2	Ímpar	12,6980	16,5439	22,5479	22,5666	8,0569
	Par	15,0327	18,4168	24,3467	24,8586	9,5450
Arranjo 3	Ímpar	15,4192	17,1471	16,5486	30,0624	13,3104
	Par	18,0416	19,2287	18,2145	32,7246	15,7649

Portanto, através da análise das imagens de calibração, podemos concluir que a variação de brilho entre os detectores escuros pares e ímpares, de todos os detectores, incluindo os 8 detectores escuros, é de aproximadamente 3 NC e 2 NC, para a câmara CCD dos satélites CBERS-2 e CBERS-2B, respectivamente.

#### 4.4 Região de Sobreposição entre os Arranjos

Os sensores de varredura eletrônica distribuem os milhares de detectores de cada banda espectral em arranjos. Estes arranjos, por sua vez, apresentam sobreposição, o que resulta em redundância (Figura 4.13).

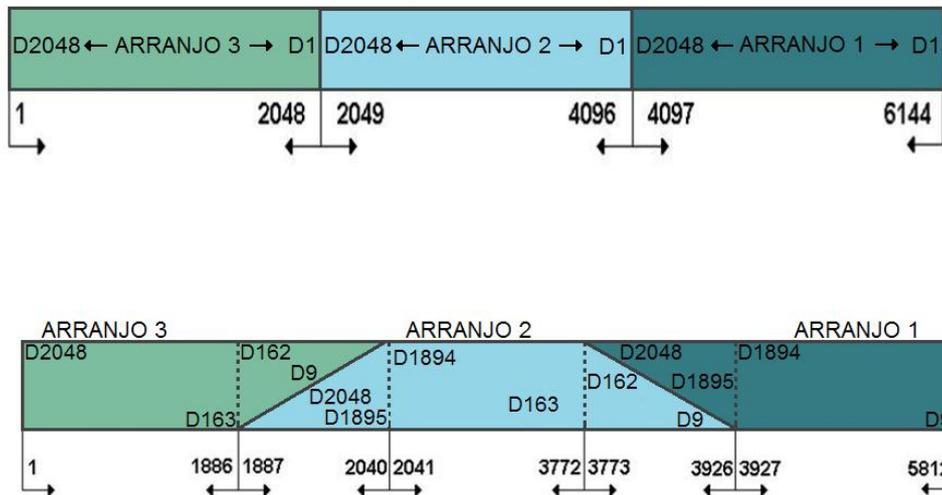


Figura 4.13 - Distribuição dos arranjos do sensor CCD-CBERS.

Fonte: Adaptado de [Silva e Fonseca \(2003\)](#).

A radiação que chega na intersecção entre dois arranjos é dividida entre eles. A medida

que os detectores se aproximam das bordas dos arranjos, estes tornam-se menos sensíveis à radiação. A [Figura 4.14](#) mostra o comportamento dos detectores na região de sobreposição dos arranjos 1 e 2 da câmara CCD do satélite CBERS-2, onde o eixo  $x$  representa os detectores do arranjo 1 e 2 da região de sobreposição e o eixo  $y$  representa os valores de níveis de cinza referentes a esta região.

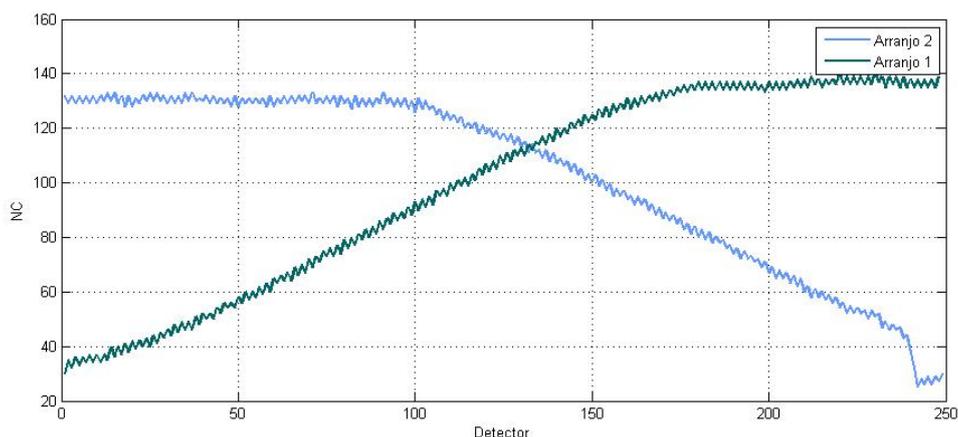


Figura 4.14 - Região de sobreposição entre os arranjos 1 e 2 da câmara CCD/CBERS-2.

Para eliminar esta redundância, a junção dos arranjos de detectores é realizada. A operação de junção dos arranjos pode ser realizada de várias formas: (1) somando os valores dos detectores na área de sobreposição; (2) somando, de forma ponderada, os valores dos detectores da área de sobreposição, onde os pesos de ponderação são proporcionais à distância do ponto em relação a borda da região de sobreposição e (3) desprezando os detectores com menor valor de nível de cinza e juntando os detectores restantes ([SILVA; FONSECA, 2003](#)).

A [Figura 4.15](#) mostra uma imagem sem sobreposição dos arranjos, onde as duas faixas escuras representam as áreas de sobreposições. Quando o processamento na área de sobreposição não é realizado adequadamente, distorções radiométricas aparecem nestas regiões. A [Figura 4.16](#) ilustra este problema. O ideal é que a transição nesta área de sobreposição seja suficientemente suave para que a emenda dos arranjos não seja observada.



Figura 4.15 - Região de Campo Grande (163/123) sem sobreposição dos arranjos - Banda 1/CBERS-2.

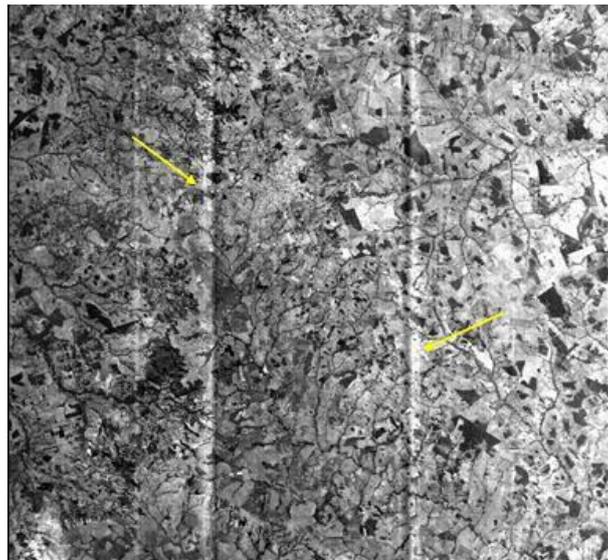


Figura 4.16 - Região de Campo Grande (163/123) com sobreposição inadequada entre os arranjos - Banda 1/CBERS-2.

O processo de junção dos arranjos de detectores realizado neste trabalho é descrito no capítulo 5.

#### **4.5 Diferentes Ganhos para cada Arranjo**

Os três arranjos de detectores apresentam respostas diferentes quando estão submetidos a um mesmo nível de iluminação. Assim, para cada detector de cada arranjo e de cada banda espectral é necessário calcular o fator de ganho que minimize a diferença nas respostas

dos detectores nos três arranjos.

A [Figura 4.17](#) apresenta os valores de níveis de cinza de cada detector para o nível de iluminação *L3*, de cada arranjo da banda 3 da imagem de calibração.

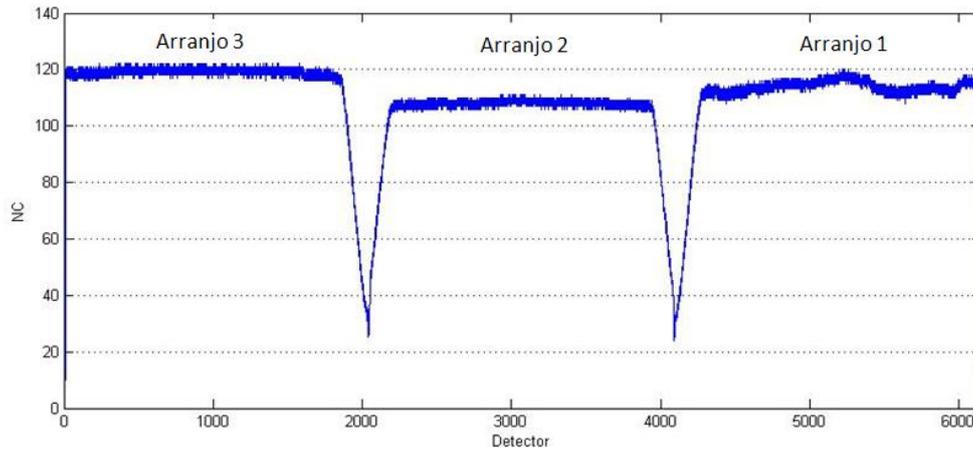


Figura 4.17 - Variação dos níveis de cinza entre os três arranjos da câmara CCD - Banda 3/CBERS-2.

A [Figura 4.18](#) ilustra a distorção radiométrica devido as diferenças dos níveis de cinza dos arranjos.

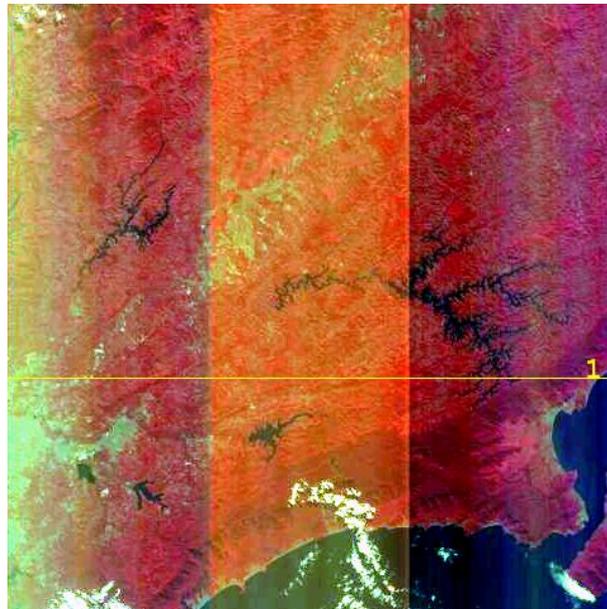


Figura 4.18 - Diferentes respostas entre os arranjos da câmara CCD.

Portanto, para minimizar as distorções radiométricas entre os arranjos de detectores, é necessário calcular o fator ganho para cada detector, cada arranjo e cada banda espectral da câmara CCD.

## 5 PROCESSO DE CALIBRAÇÃO RELATIVA IMPLEMENTADO

As imagens de calibração adquiridas pela semi-esfera integradora foram utilizadas para calcular os coeficientes de calibração relativa da câmara CCD dos satélites CBERS-2 e CBERS-2B. Os procedimentos para cada banda e para cada arranjo de detectores são realizados de acordo com o fluxograma apresentado na [Figura 5.1](#).

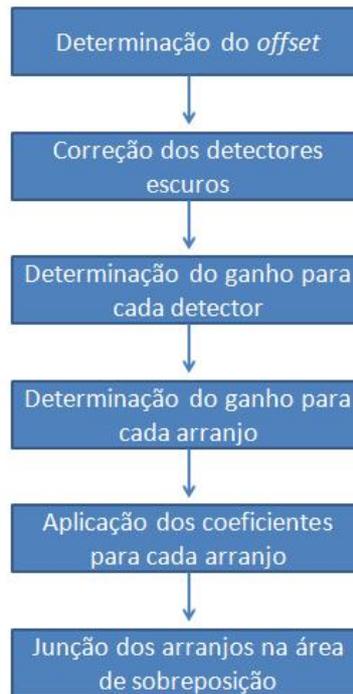


Figura 5.1 - Processo de calibração relativa.

Cada arranjo de cada banda espectral possui 12 imagens de calibração referentes a cada nível de iluminação ( $L_0, L_1, L_2 \dots L_{11}$ ). Para a determinação dos *offsets*, a imagem  $L_0$  é utilizada. Para determinar os ganhos, os outros níveis de iluminação ( $L_1, L_2, L_3 \dots L_{11}$ ) são utilizados. No final da calibração relativa será obtido um conjunto de coeficientes de calibração para cada banda, ganho e configuração do sensor.

O processo de calibração radiométrica relativa proposto foi implementado no ambiente Visual C++ 6.0 sobre plataforma Windows e na linguagem de programação PHP sobre plataforma Linux.

Inicialmente, todo procedimento foi realizado baseado em valores com ponto flutuante e em seguida transformados em valores inteiros, em forma de truncamento. A [Equação 5.1](#) exemplifica este detalhamento, onde  $p(j, i)$  é o *pixel* da imagem na linha  $j$  e coluna  $i$ .

$$p(j, i) = \begin{cases} p(j, i), & \text{se } 0 \leq p(j, i) \leq 255 \\ 255, & \text{se } p(j, i) > 255 \end{cases} \quad (5.1)$$

## 5.1 Coeficientes de Calibração Relativa

A seguir são descritos os procedimentos para a obtenção de cada coeficiente utilizado na calibração relativa da câmara CCD. Vale observar que os coeficientes de calibração são calculados para cada ganho do sensor, cada banda e cada arranjo.

### 5.1.1 Cálculo do *Offset*

O cálculo do coeficiente *offset*, para cada detector de cada arranjo e banda, utiliza a imagem de calibração no nível de iluminação zero ( $L0$ ), obtida em laboratório.

Conforme apresentado na seção 4.1, os valores do nível de cinza da câmara CCD, na ausência de sinal refletido, apresentam valores diferentes de zero. O valor de *offset* é dado pela média dos valores de níveis de cinza da imagem de calibração  $L0$  para cada detector, arranjo e banda, da seguinte forma:

$$D_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M D_{L0_{ji}} \quad (5.2)$$

onde,

$M$ : número de linhas da imagem de calibração do nível de iluminação  $L0$ ,

$D_{L0_{ji}}$ : valor do nível de cinza bruto do *pixel* na linha  $j$  e detector  $i$ ,

$D_i$ : *offset* para cada detector  $i$ .

Portanto, para cada ganho do sensor, banda e arranjo, é gerado um arquivo contendo a média das linhas para cada detector da imagem de calibração  $L0$ . Este parâmetro corrige a diferença de brilho entre os detectores.

### 5.1.2 Correção Dinâmica dos Detectores Escuros

Com relação aos valores de níveis de cinza dos detectores escuros foram observados que:

- a) Os detectores escuros apresentam valores de níveis de cinza diferentes de zero;
- b) Os valores de níveis de cinza dos detectores escuros variam de linha para linha. Portanto, esta variação deve ser levada em conta no modelo de calibração relativa.

O fato dos detectores escuros apresentarem valores de níveis de cinza diferentes de zero, sem ter recebido nenhum sinal, implica que os valores de níveis de cinza dos detectores escuros das imagens de calibração dos outros níveis de iluminação ( $L_1, L_2, L_3...L_{11}$ ), que receberam sinal, devem registrar valores maiores do que zero e superiores ao valor médio dos detectores escuros da imagem  $L_0$ .

As Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam os valores de NC médio dos detectores escuros das imagens de calibração  $L_k$  ( $k = 1, 2, 3...11$ ) e da imagem  $L_0$  para cada arranjo da câmara CCD dos satélite CBERS-2. No cálculo das médias, os níveis de iluminação saturados não foram considerados. A quarta coluna das Tabelas apresenta a diferença entre as médias. Esta diferença entre os valores de NC dos detectores escuros com iluminação e sem iluminação denomina-se brilho residual.

Tabela 5.1 - Arranjo 1: Valores médios dos níveis de cinza dos detectores escuros da imagem de calibração ( $L_0, L_1, L_2, L_3...L_{11}$ )/CBERS-2.

<b>Banda</b>	$L_k$	<b>L0</b>	<b>Brilho Residual</b>
B1	22,7032	21,5613	1,1419
B2	22,4620	21,4767	0,9853
B3	22,9031	19,2487	3,6544
B4	23,6075	20,4835	3,1240
B5	30,5358	28,4490	2,0868

Tabela 5.2 - Arranjo 2: Valores médios dos níveis de cinza dos detectores escuros da imagem de calibração ( $L_0, L_1, L_2, L_3...L_{11}$ )/CBERS-2.

<b>Banda</b>	$L_k$	<b>L0</b>	<b>Brilho Residual</b>
B1	22,7032	21,6820	1,0212
B2	20,7570	19,2844	1,4726
B3	23,5162	21,3420	2,1742
B4	21,1690	19,6075	1,5615
B5	29,8251	28,9899	0,8352

Tabela 5.3 - Arranjo 3: Valores médios dos níveis de cinza dos detectores escuros da imagem de calibração ( $L0, L1, L2, L3...L11$ )/CBERS-2.

Banda	$L_k$	L0	Brilho Residual
B1	31,1872	29,7740	1,4132
B2	23,6710	20,8039	2,8671
B3	24,6253	22,4414	2,1839
B4	24,2528	23,5475	0,7053
B5	29,8251	28,9768	0,8483

Desta forma, para levar em conta este brilho residual no procedimento de calibração relativa, a correção dos detectores é realizada para cada linha  $j$ , cada arranjo e cada banda, da seguinte forma:

$$DEcal_j = \overline{DEcal(Lk)_j} - \overline{DEcal(L0)_j} \quad (5.3)$$

onde,

$\overline{DEcal(Lk)_j}$ : média de todos os valores de NC registrados pelos detectores escuros das imagens de calibração  $L1, L2, L3...L11$  na linha  $j$ ,

$\overline{DEcal(L0)_j}$ : média dos valores de NC registrados pelos detectores escuros da imagem de calibração  $L0$  na linha  $j$ ,

$DEcal_j$ : variação entre os valores médios de NC dos detectores escuros das imagens de calibração, sem iluminação ( $L0$ ) e com iluminação ( $L_k, k = 1...11$ ) na linha  $j$ , denominado de brilho residual.

A idéia é usar este valor para corrigir a variação de brilho que possa ocorrer entre as linhas da imagem e o brilho residual presente no detector quando este recebe sinal.

A correção radiométrica é realizada separadamente para os detectores pares e ímpares.

Dados os parâmetros de *offset* ( $D$ ) e brilho residual ( $DEcal$ ), as imagens de calibração ( $L1, L2, L3...L11$ ) são corrigidas da seguinte forma:

$$X_{cor_{ji}} = X_{ji} - D_i + DEcal_j \quad (5.4)$$

onde  $X_{ji}$ : valor do *pixel* da imagem de calibração na linha  $j$  e detector  $i$ ,

$D_i$ : valor de *offset* para cada detector  $i$  definido na [Equação 5.2](#),

$DEcal_j$ : variação média dos detectores escuros na linha  $j$  ([Equação 5.3](#)),

$Xcor_{ji}$ : valor do *pixel* corrigido pelo *offset* da imagem de calibração na linha  $j$  e detector  $i$ .

A correção descrita acima é também realizada nas imagens brutas, de nível de processamento 0, a serem corrigidas. Neste caso, os valores  $DEcal_j$  ([Equação 5.3](#)) são calculados a partir das imagens a serem corrigidas.

### 5.1.3 Determinação do Ganho para cada Detector

Para determinar o parâmetro ganho dos detectores, as imagens de calibração corrigidas ([Equação 5.4](#)) são utilizadas.

Seja  $\overline{Xcor_i}$  a média das linhas corrigidas para cada detector  $i$  e seja  $\overline{\overline{Xarray}}$  o valor médio dos NCs dos *pixels* para cada arranjo da câmara CCD, excluindo os *pixels* da área de sobreposição. O ganho de cada detector  $i$ , para cada arranjo e banda, é calculado da seguinte forma:

$$G_i = \frac{\overline{Xcor_i}}{\overline{\overline{Xarray}}}. \quad (5.5)$$

### 5.1.4 Determinação do Ganho para cada Arranjo

Dado que os detectores de cada arranjo são corrigidos, deve-se proceder a correção das diferenças radiométricas entre os arranjos de detectores. Esta correção permite uniformizar as respostas dos arranjos. O ganho entre os arranjos é calculado como:

$$\gamma = \frac{\overline{\overline{Xarray}}}{\overline{\overline{Xbanda}}} \quad (5.6)$$

onde

$\overline{\overline{Xarray}}$  é o valor médio dos NCs dos *pixels* do arranjo, excluindo os *pixels* da área de sobreposição,

$\overline{\overline{Xbanda}}$ : valor médio dos NCs dos três arranjos para cada banda,

$\gamma$  é o ganho para cada arranjo.

## 5.2 Aplicação dos Coeficientes

O procedimento a seguir é aplicado nas imagens brutas, de nível de processamento 0. A saída é uma imagem calibrada.

Considerando os coeficientes calculados anteriormente, a imagem corrigida para cada arranjo de cada banda é obtida da seguinte forma:

$$I_{cal_{ji}} = \frac{I_{ji} - D_i + DE_j}{G_i \cdot \gamma} \quad (5.7)$$

onde,

$I_{ji}$  é o valor do *pixel* da imagem no nível de processamento 0,

$D_i$ : *offset* para cada detector  $i$  (Equação 5.2),

$DE_j$ : correção do brilho residual para cada linha  $j$  da imagem  $I_{ji}$ . Este parâmetro é calculado usando a Equação 5.3:

$$DE_j = \overline{DEI(Lk)_j} - \overline{DEcal(L0)_j} \quad (5.8)$$

onde  $DEI(Lk)$  é a média dos detectores escuros da imagem a ser corrigida ( $I$ ).

$G_i$ : ganho entre os detectores (Equação 5.5),

$\gamma$ : ganho entre os arranjos (Equação 5.6),

$I_{cal_{ji}}$  é o valor do *pixel* da imagem radiometricamente corrigida para cada arranjo de cada banda.

Vale lembrar que o processo de cálculo e aplicação dos coeficientes é realizado separadamente para os detectores pares e ímpares.

## 5.3 Região de Sobreposição

Neste estágio, os arranjos de cada banda já estão corrigidos. O passo seguinte é unir os arranjos para gerar uma banda completa. A junção dos arranjos de detectores é realizada pelo método da média ponderada do nível de cinza dos dois arranjos afetados. O objetivo principal é suavizar a área de transição (emenda) dos arranjos na imagem para tornar a emenda imperceptível. A Figura 5.2 ilustra a área de transição entre dois arranjos de

detectores.

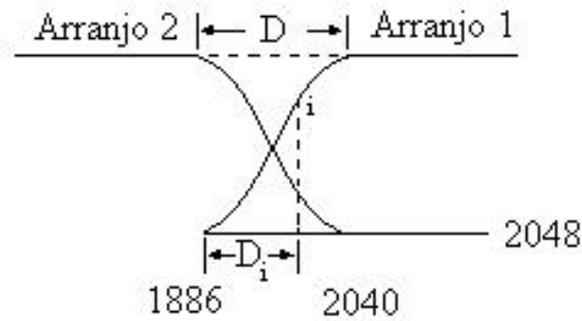


Figura 5.2 - Região de sobreposição.

Seja  $A1$  e  $A2$  os arranjos de detectores a serem emendados e seja  $XA1_i$  e  $XA2_i$  os valores de NC do detector  $i$  dos arranjos  $A1$  e  $A2$ , respectivamente.

Considerando-se que a região de sobreposição possui  $D$  pixels, o nível de cinza  $X$  do pixel  $i$  na região de sobreposição é calculado da seguinte forma:

$$X_i = (1 - P_i).XA1_i + P_i.XA2_i \quad (5.9)$$

onde

$$P_i = \frac{D - D_i}{D} \quad (5.10)$$

onde,  $D_i$  é a distância (em números de pixels) contado a partir do início da região de sobreposição e  $P_i$  é o peso para cada detector  $i$  da região de sobreposição.



## 6 RESULTADOS E AVALIAÇÃO

O método proposto é testado para algumas imagens da câmara CCD considerando três tipos de alvos (agricultura, urbano e vegetação). As imagens são as mesmas descritas nas Tabelas 4.1 e 4.2.

As correções foram realizadas para todas as imagens mencionadas, mas somente serão mostrados alguns resultados devido à restrição de espaço.

### 6.1 Correção Radiométrica de cada Arranjo

A aplicação dos coeficientes de calibração relativa é realizada para cada arranjo das imagens de nível de processamento 0. As Figuras 6.1, 6.2 e 6.3, apresentam as imagens originais de alvos agrícolas e as imagens calibradas pelo método proposto neste trabalho, para cada arranjo da banda 2, respectivamente.

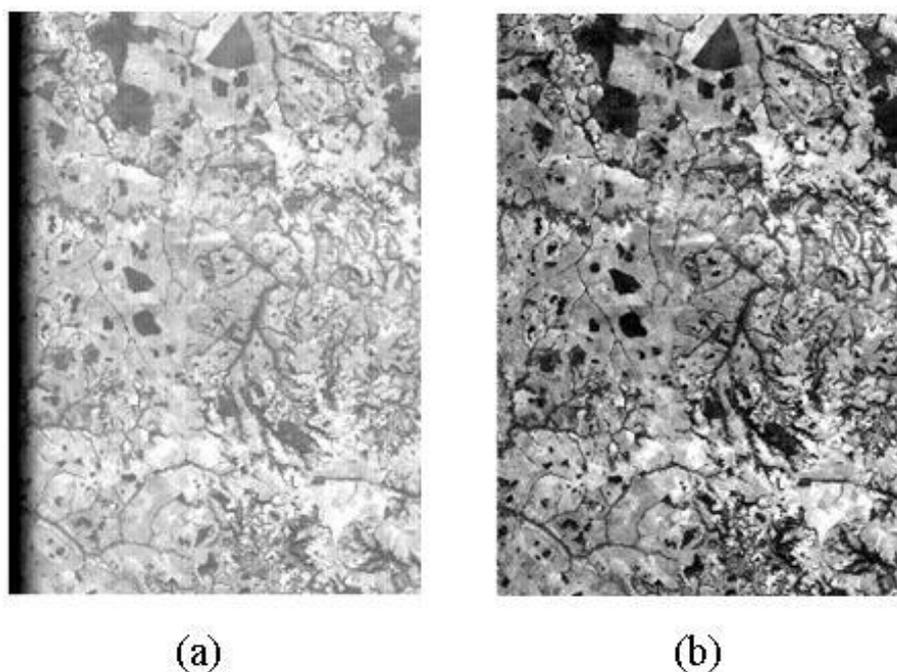
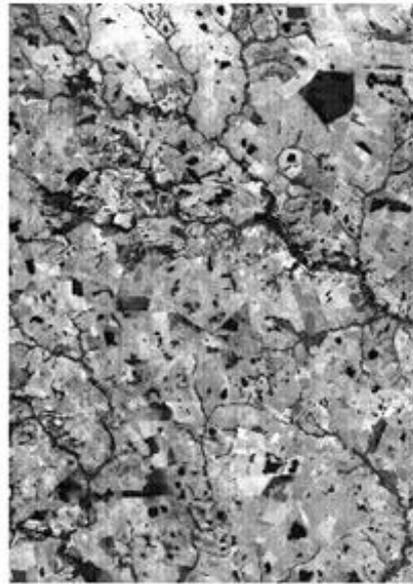


Figura 6.1 - Arranjo 1 - Região de Goiás (P161/R121)-04/07/2006 - Banda2/CBERS-2 (a)Imagem original e (b)Imagem calibrada.

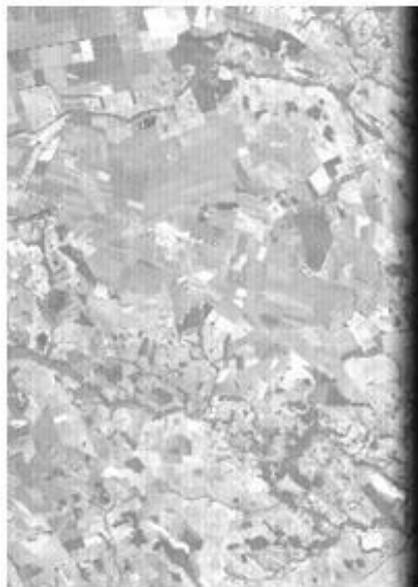


(a)

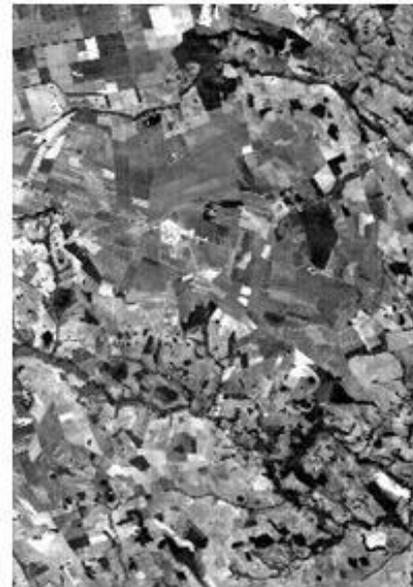


(b)

Figura 6.2 - Arranjo 2 - Região de Goiás (P161/R121)-04/07/2006 - Banda2/CBERS-2 (a)Imagem original e (b)Imagem calibrada.



(a)



(b)

Figura 6.3 - Arranjo 3 - Região de Goiás (P161/R121)-04/07/2006 - Banda2/CBERS-2 (a)Imagem original e (b)Imagem calibrada.

As imagens corrigidas apresentam uma melhora significativa na qualidade radiométrica, principalmente em relação às diferenças entre os níveis de cinza dos detectores pares e ímpares. As faixas mais escuras das imagens originais referem-se às regiões de sobreposição dos detectores entre os arranjos. Além disso, pode-se observar que as imagens calibradas ficaram com um aspecto mais escuro, devido a correção dos valores de *offset*.

Para facilitar a visualização, alguns detalhes das imagens originais e calibradas, para o alvo urbano, agricultura e vegetação, são mostrados nas Figuras 6.4, 6.5 e 6.6, respectivamente.

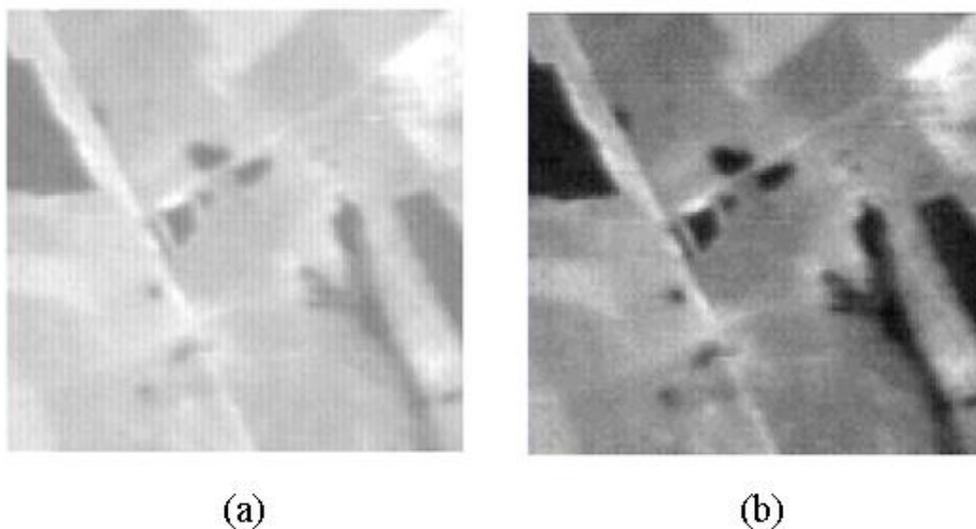


Figura 6.4 - Detalhe do arranjo 1 da banda 2 (a)Nível 0 (b)Nível 1 - Urbano: Região de Campo Grande (P163/R123) - 28/06/2006.

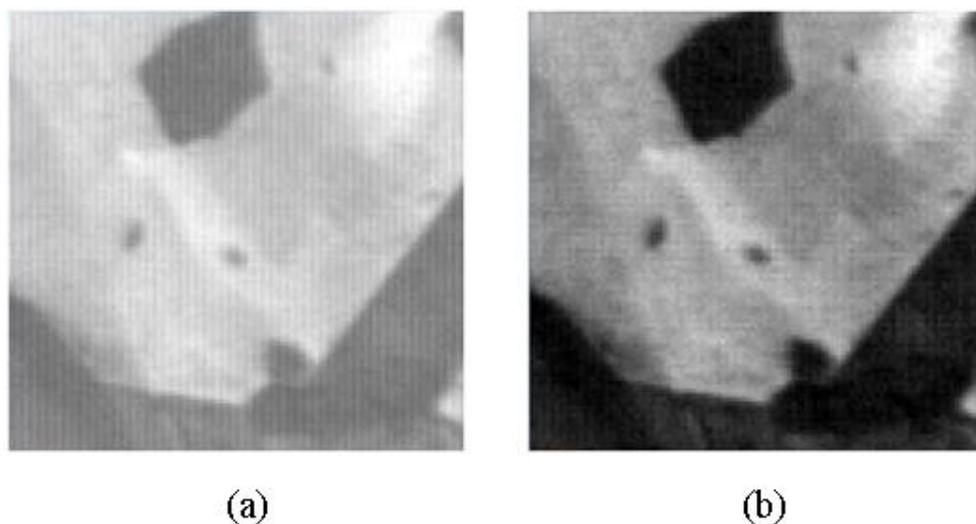


Figura 6.5 - Detalhe do arranjo 1 da banda 2 (a) Nível 0 (b)Nível 1 - Agricultura: Região de Goiás (P161/R121) - 04/07/2006.

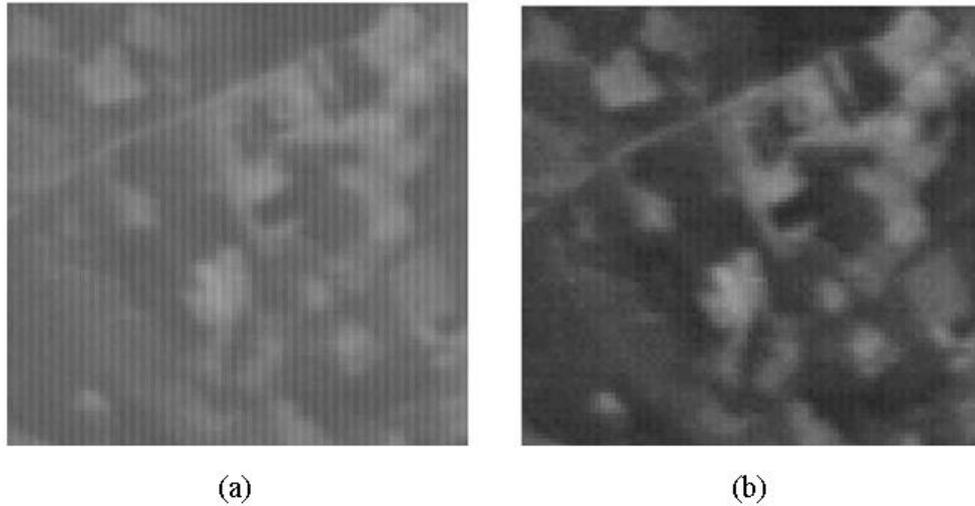


Figura 6.6 - Detalhe do arranjo 1 da banda 2 (a)Nível 0 (b)Nível 1 - Vegetação: Região de Rio Grande do Sul (P158/R133) - 31/03/2006.

## 6.2 Sobreposições entre os Arranjos

A área de sobreposição corresponde a 154 *pixels*. Considerando toda a área de sobreposição no cálculo dos pesos (Equação 5.10) várias imagens apresentaram ruídos nas proximidades das bordas dos arranjos. A Figura 6.7 mostra detalhes da área de sobreposição após a calibração relativa, considerando 154 *pixels* na área de sobreposição.

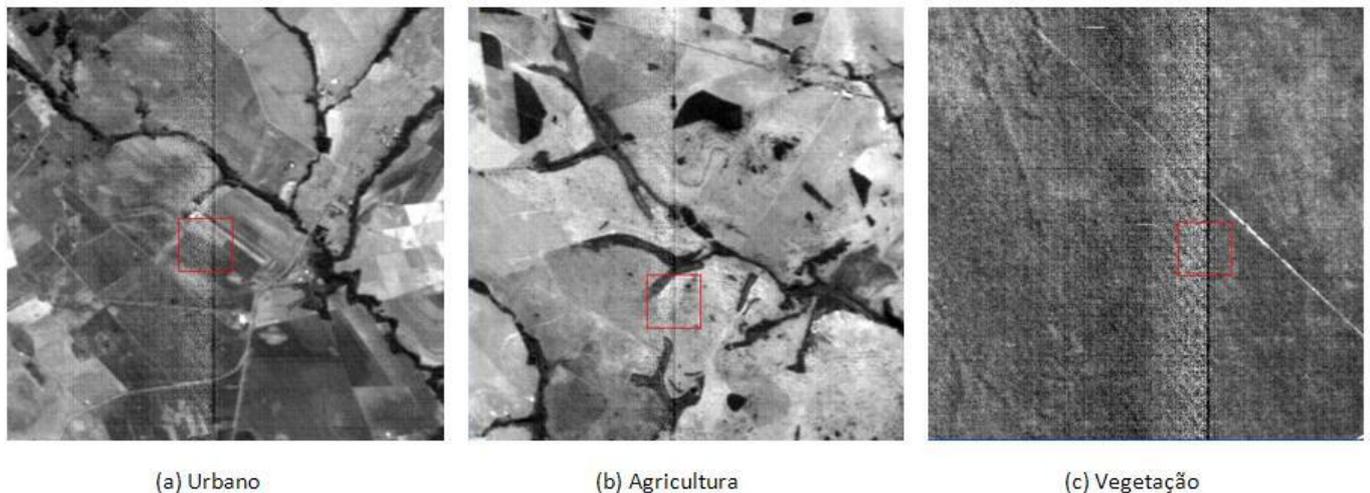


Figura 6.7 - Região de sobreposição da Banda 2 - (a)Campo Grande (P163/R123)-28/06/2006, (b)Goiás (P161/R121)-04/07/2006 e (c)Paraguai (P170/R123)-03/07/2006.

Como pode-se observar na Figura 6.7, a emenda na área de sobreposição ficou visível.

As Figuras 6.8 e 6.9 mostram os valores do desvio-padrão (DP) de uma janela móvel de cinco *pixels* nas regiões de sobreposição da banda 3. Pode-se verificar que os valores de DP nas bordas dos arranjos são maiores. Isto é um indício da existência de ruídos nesta região, que pode provocar distorções radiométricas na área de junção dos arranjos, como aquelas observadas na Figura 6.7.

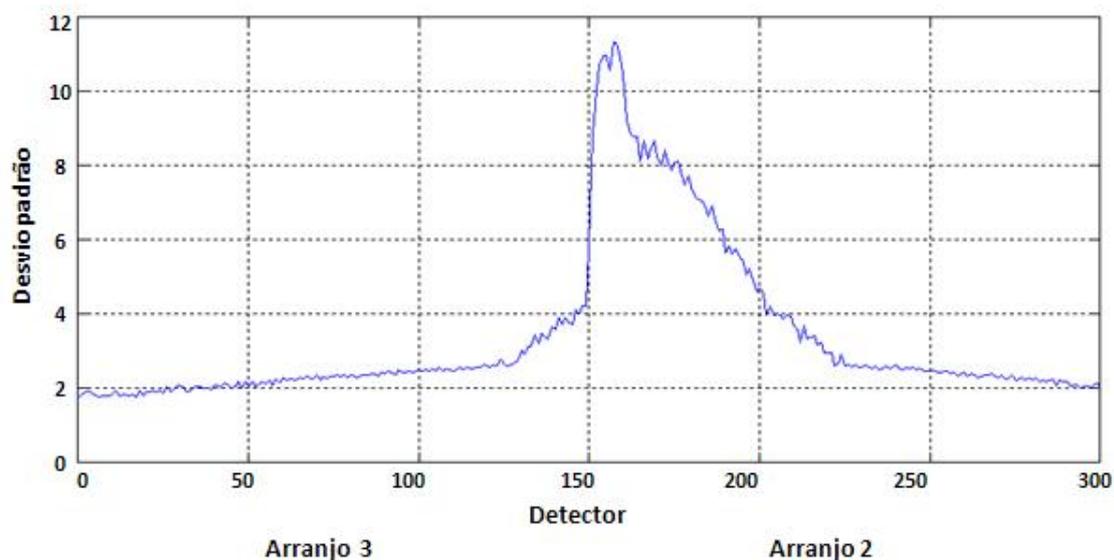


Figura 6.8 - Área de sobreposição do arranjo 3 com o arranjo 2 - Banda3/CBERS-2.

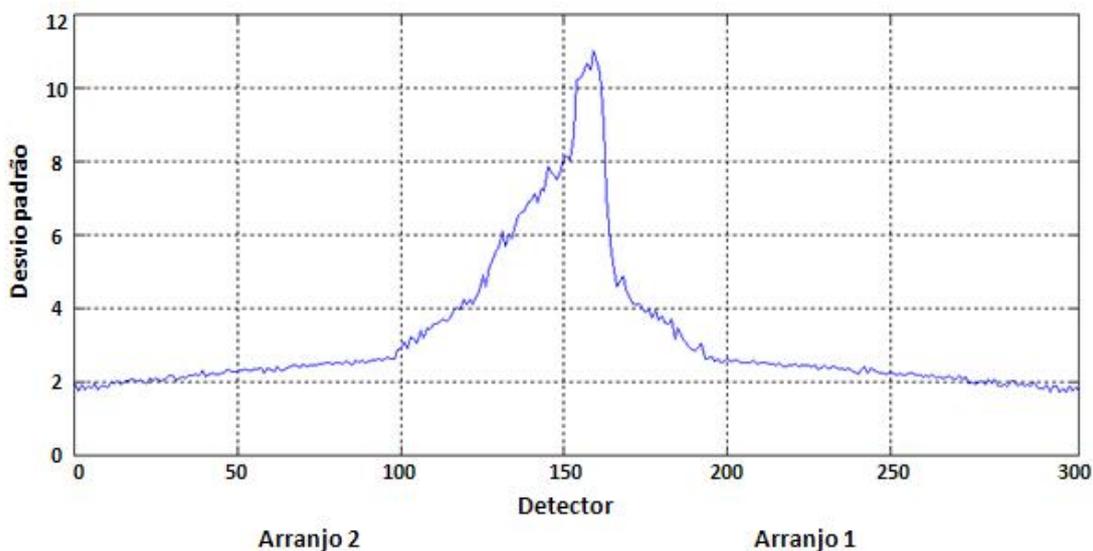


Figura 6.9 - Área de sobreposição do arranjo 2 com o arranjo 1 - Banda3/CBERS-2.

Uma análise detalhada das Figuras 6.8 e 6.9 mostra que, aproximadamente, 50 *pixels* nas bordas dos arranjos são ruidosos. Portanto, para tentar reduzir o efeito do ruído no processamento, 50 *pixels* das bordas dos arranjos são desprezados no cálculo da média ponderada no processo de junção dos arranjos, que correspondem aqueles com desvio-padrão maior do que 2.

Desta forma, a junção dos arranjos é realizada com apenas 54 *pixels*, para os quais o desvio-padrão é menor do que 2. Detalhes da área de sobreposição das imagens, após a correção, são mostrados na Figura 6.10.

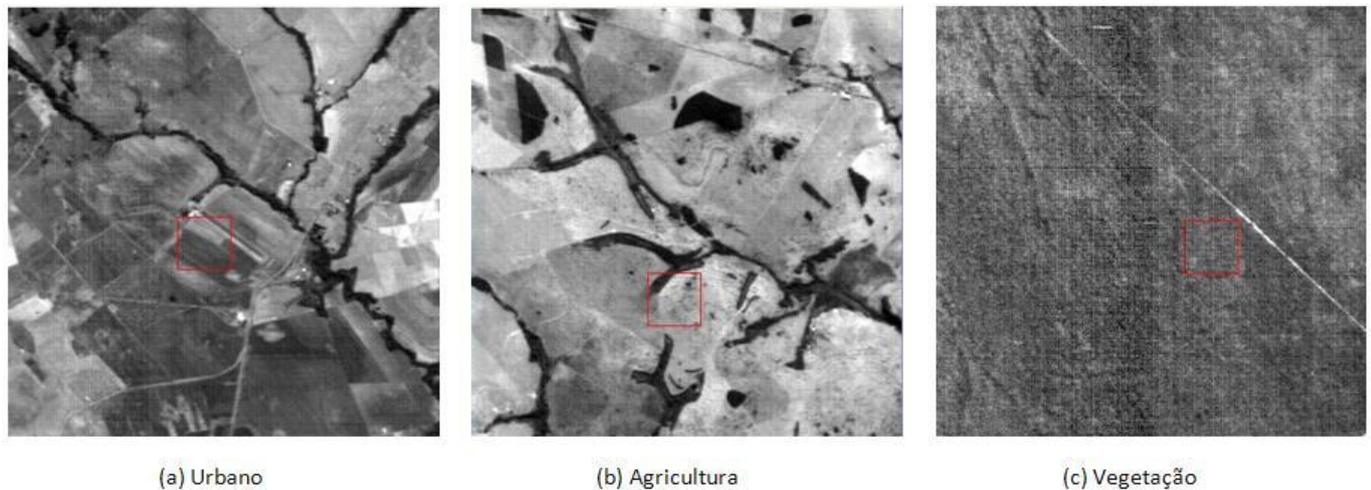
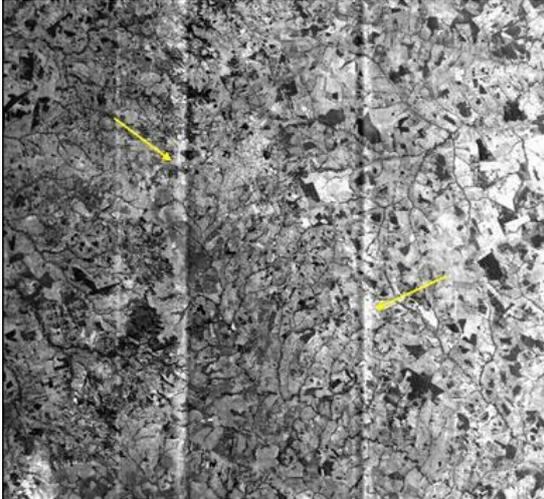
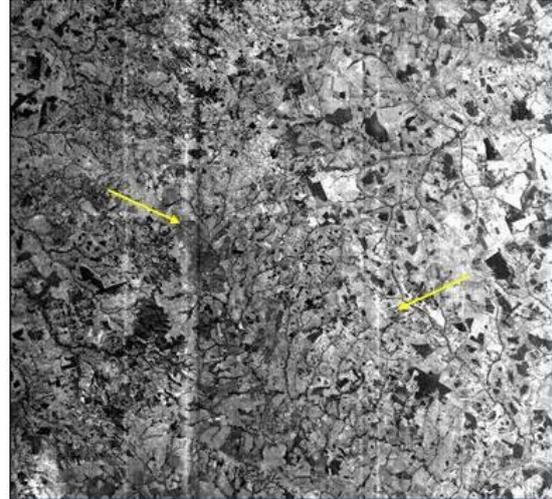


Figura 6.10 - Detalhe da banda 2 após a calibração - (a) Campo Grande (P163/R123)-28/06/2006, (b) Goiás (P161/R121)-04/07/2006 e (c) Paraguai (P170/R123)-03/07/2006.

Para mostrar a melhoria na qualidade visual das imagens corrigidas, algumas imagens são apresentadas a seguir. As Figuras 6.11, 6.12 e 6.13 mostram as imagens calibradas considerando 154 *pixels* (a) e 54 *pixels* (b) na área de transição, para as bandas 1, 3 e 5 da região de Campo Grande, contendo alvos urbanos. Para alvos agrícolas e de vegetação, as imagens calibradas são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 6.14 e 6.15, para as bandas 1 e 3.

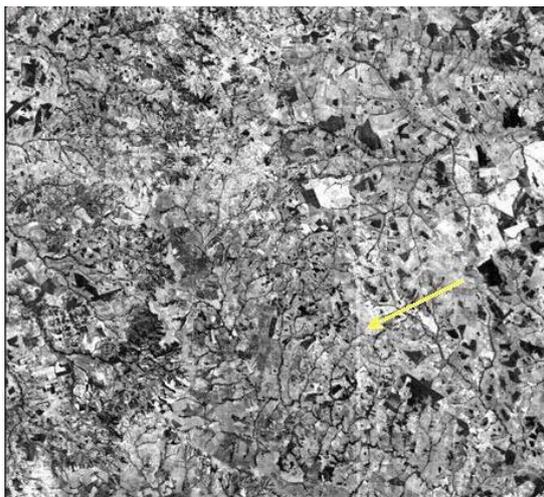


(a)



(b)

Figura 6.11 - Imagem de Campo Grande(163/123) Banda 1/CBERS-2 calibrada considerando (a)154 *pixels* e (b)54 *pixels* no processo de junção dos arranjos.



(a)



(b)

Figura 6.12 - Imagem de Campo Grande(163/123) Banda 3/CBERS-2 calibrada considerando (a)154 *pixels* e (b)54 *pixels* no processo de junção dos arranjos.

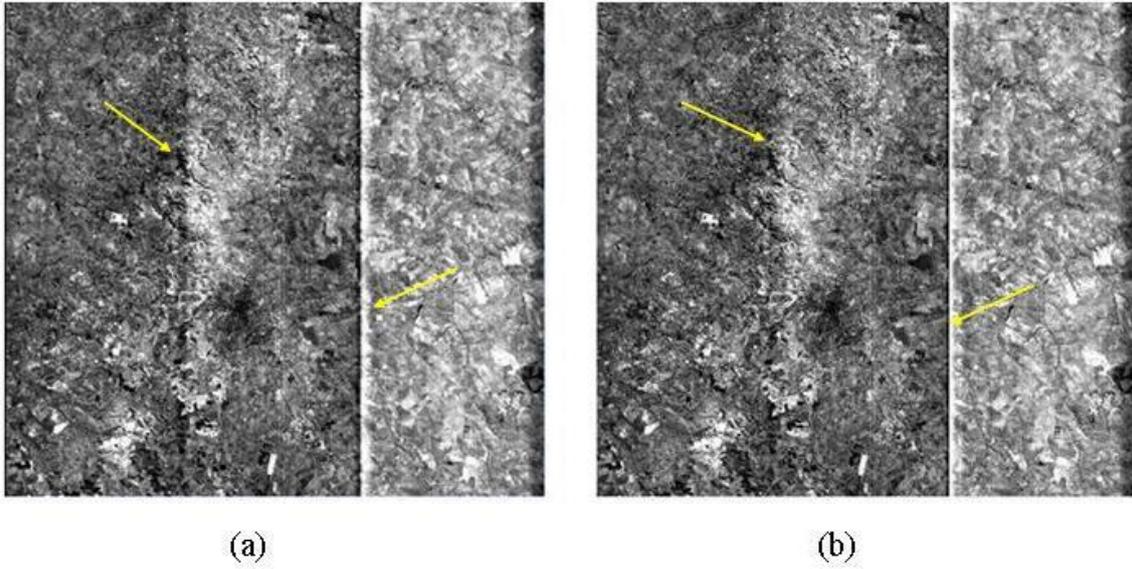


Figura 6.13 - Imagem de Campo Grande(163/123) Banda 5/CBERS-2 calibrada considerando (a)154 *pixels* e (b)54 *pixels* no processo de junção dos arranjos.

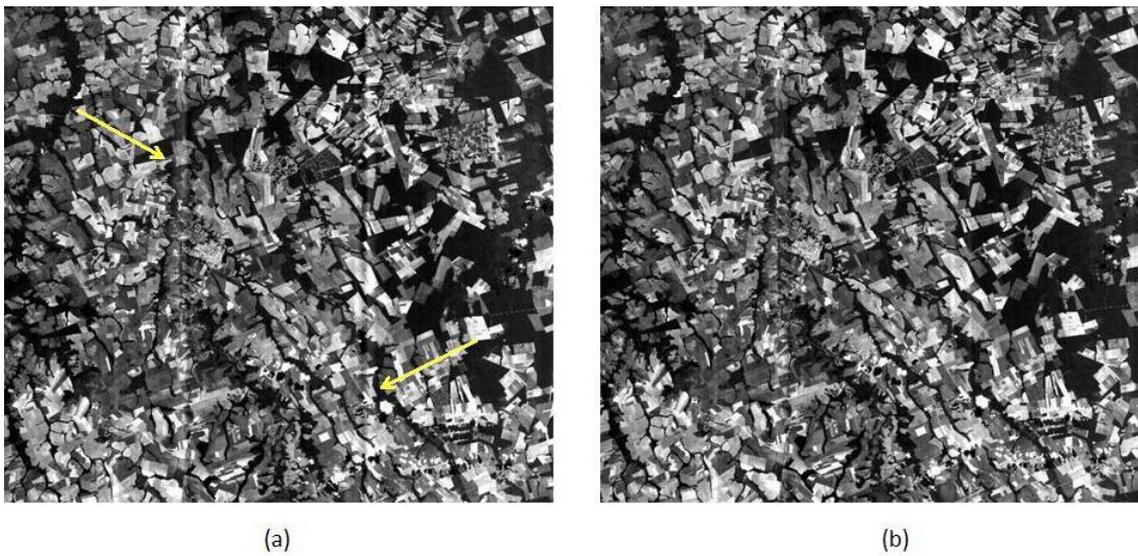


Figura 6.14 - Imagem de Mato Grosso(166/114) Banda 1/CBERS-2 calibrada considerando (a)154 *pixels* e (b)54 *pixels* no processo de junção dos arranjos.

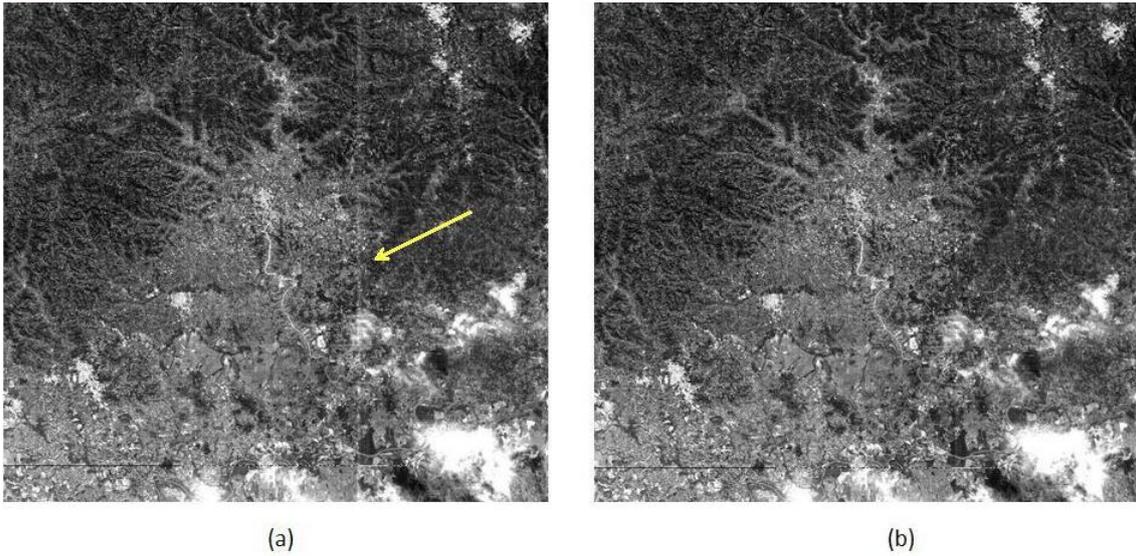


Figura 6.15 - Imagem de Rio Grande do Sul(158/133) Banda 3/CBERS-2 calibrada considerando (a)154 *pixels* e (b)54 *pixels* no processo de junção dos arranjos.

Para facilitar a visualização, as Figuras 6.16, 6.17 e 6.18, apresentam detalhes das imagens calibradas para a banda 2.

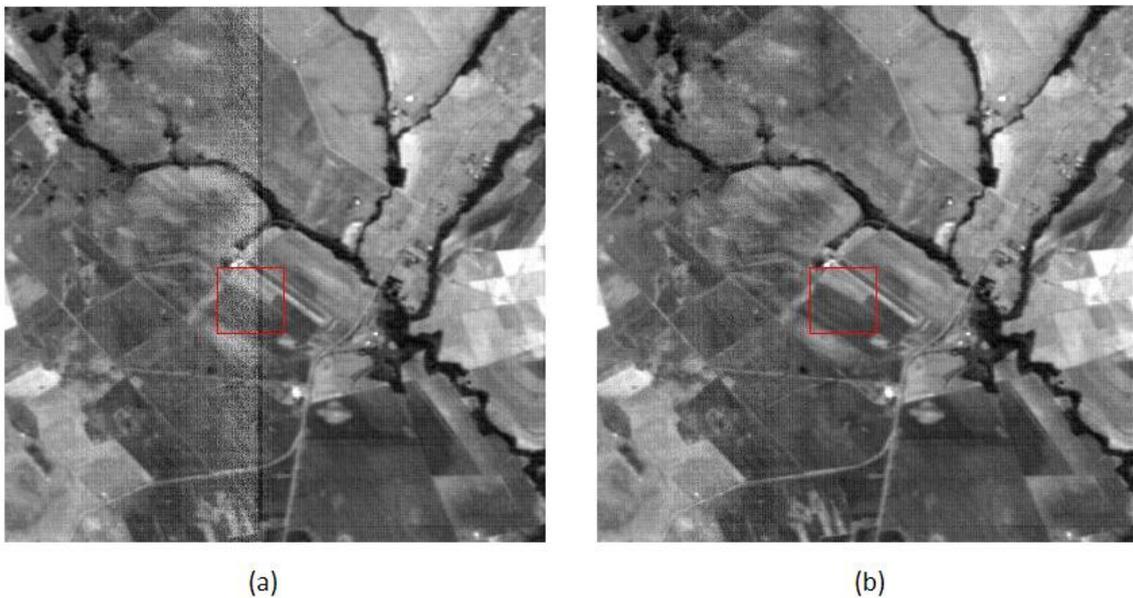


Figura 6.16 - Detalhe da imagem de Campo Grande(163/123) Banda 2/CBERS-2 calibrada considerando (a)154 *pixels* e (b)54 *pixels* no processo de junção dos arranjos.

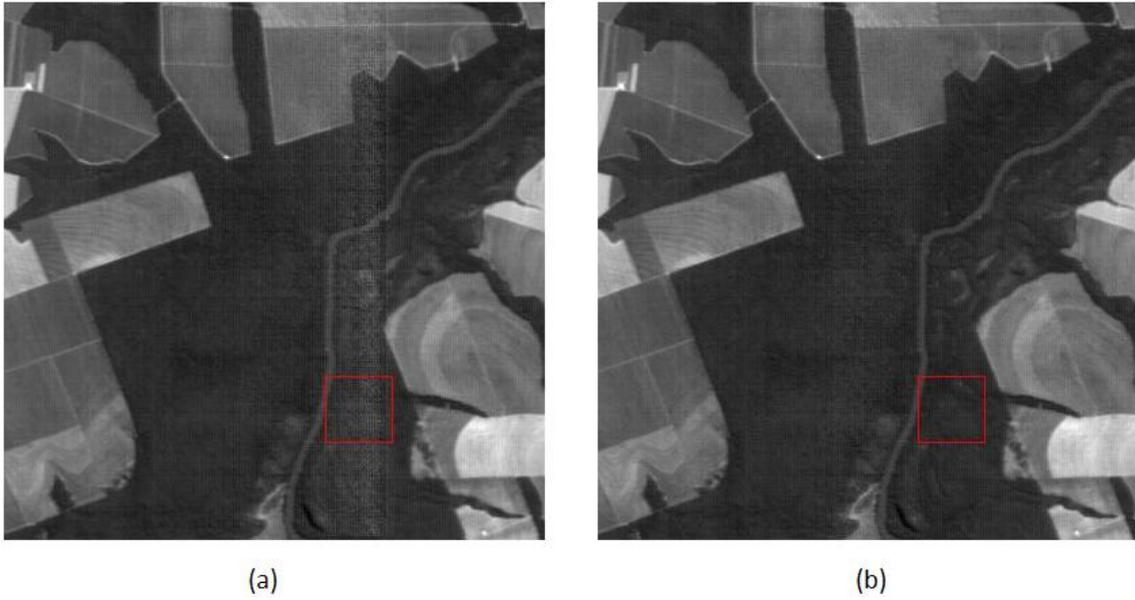


Figura 6.17 - Detalhe da imagem de Goiás(161/121) Banda 2/CBERS-2 calibrada considerando (a)154 *pixels* e (b)54 *pixels* no processo de junção dos arranjos.

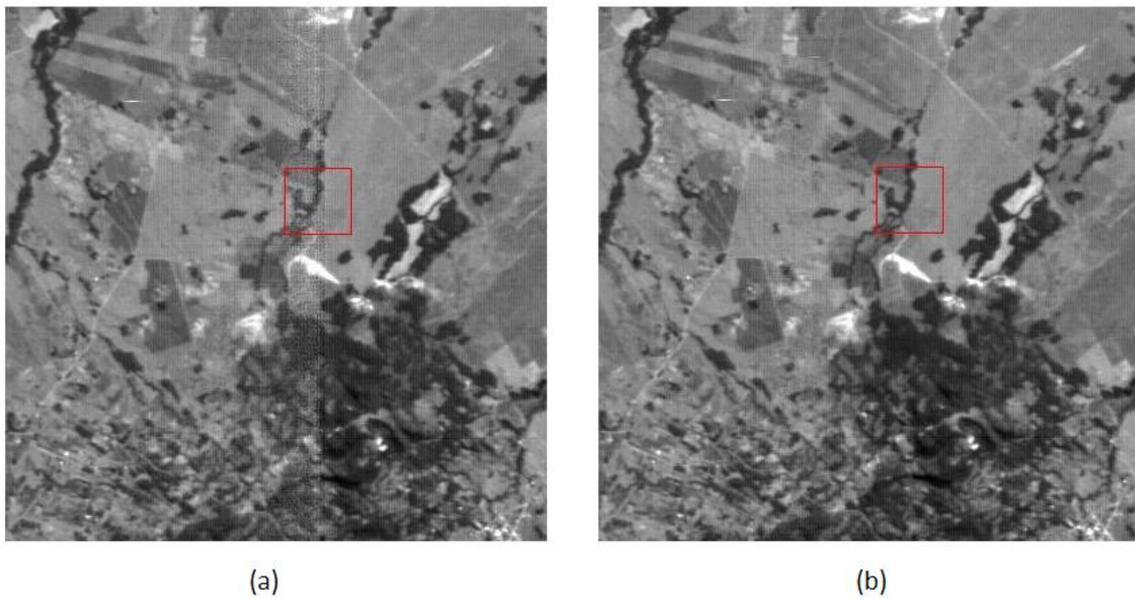


Figura 6.18 - Detalhe da imagem de Rio Grande do Sul(158/133) Banda 2/CBERS-2 calibrada considerando (a)154 *pixels* e (b)54 *pixels* no processo de junção dos arranjos.

As composições coloridas (R3G4B2) das imagens calibradas contendo alvos de agricultura, considerando 154 e 54 *pixels* na área de sobreposição, são apresentadas nas Figuras 6.19 e 6.20, respectivamente. As imagens foram contrastadas para uma melhor visualização dos detalhes.

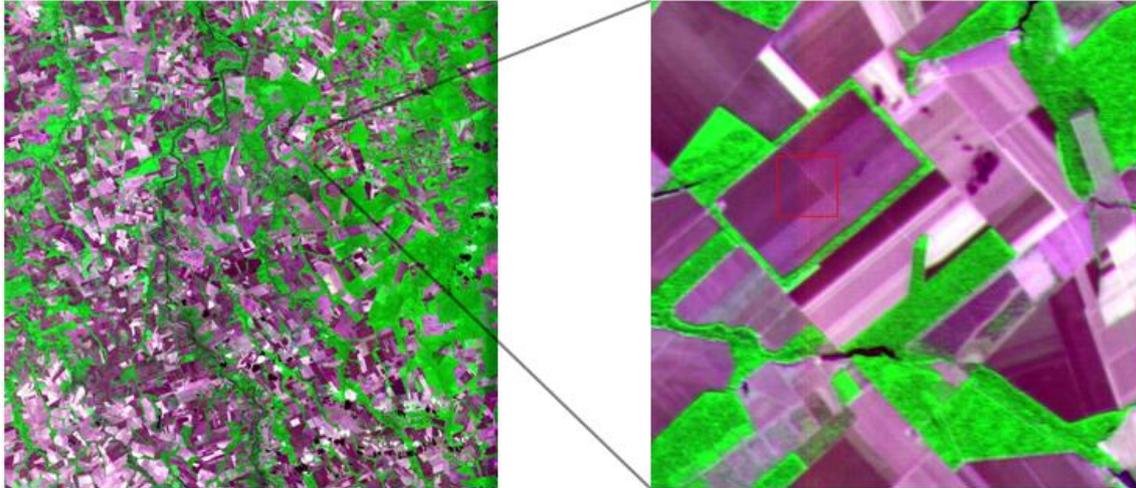


Figura 6.19 - Imagens calibradas R3G4B2 de Mato Grosso (166/114) - 15/07/2006 CBERS-2 considerando 154 *pixels* no processo de junção dos arranjos.

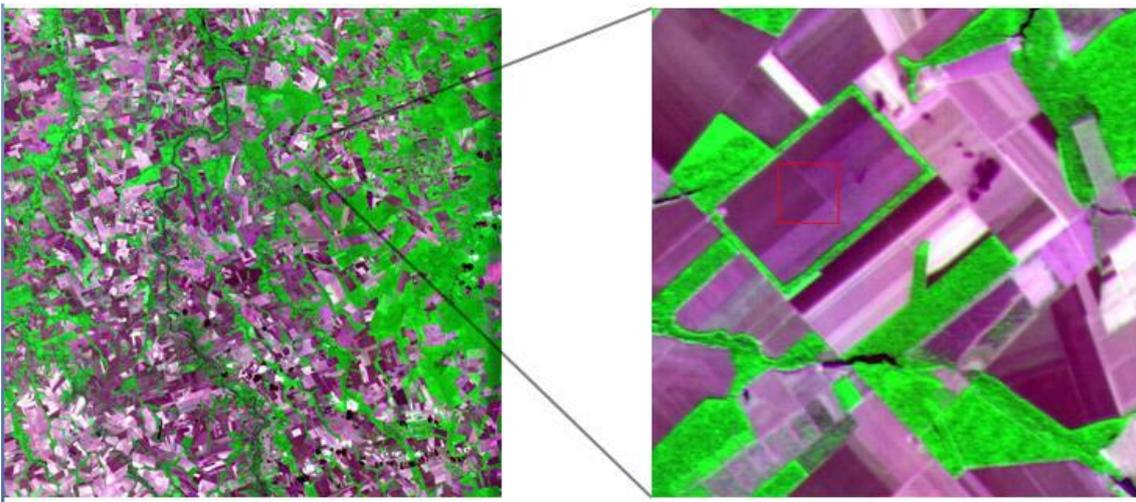
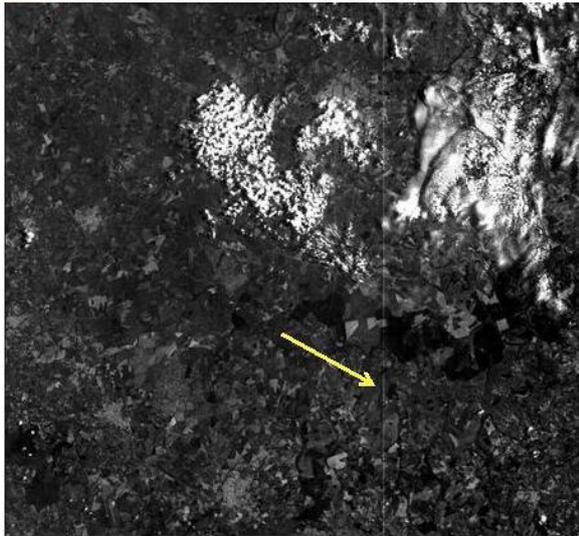


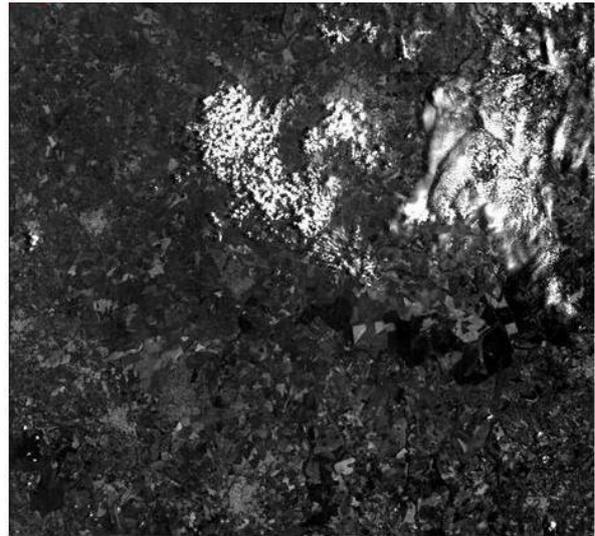
Figura 6.20 - Imagens calibradas R3G4B2 de Mato Grosso (166/114) - 15/07/2006 considerando 54 *pixels* no processo de junção dos arranjos.

Assim, tendo em vista os resultados obtidos, o algoritmo de calibração radiométrica relativa implementado neste trabalho mostrou-se eficiente, principalmente, para as bandas 2, 3 e 4 da câmara CCD/CBERS-2. Alguns resultados obtidos para as bandas 1 e 5 não foram satisfatórios, pois a emenda dos arranjos na área de sobreposição ainda são perceptíveis.

Em relação as imagens CCD do CBERS-2B, as Figuras 6.21 e 6.22 mostram as imagens calibradas considerando 154 e 54 *pixels* no processo de junção dos arranjos, para as bandas 3 e 4, respectivamente.

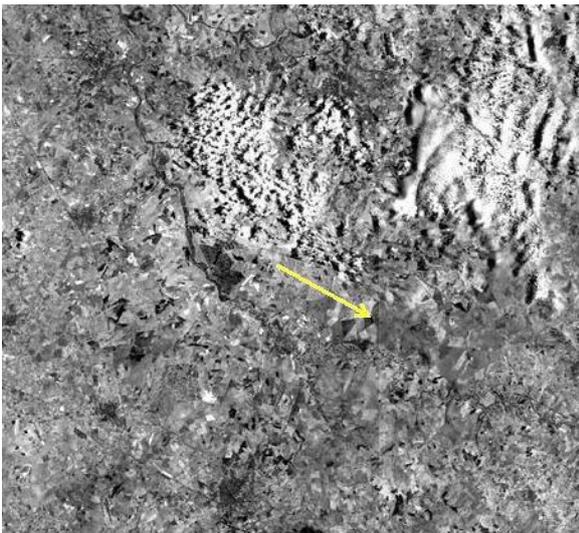


(a)

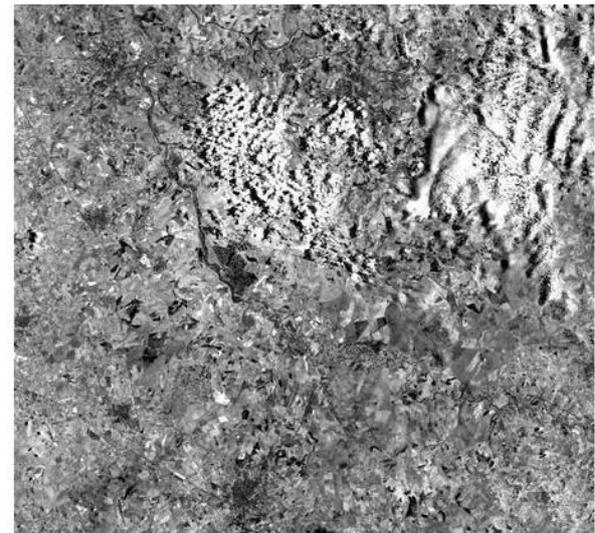


(b)

Figura 6.21 - Agricultura - Goiás(161/121)-29/10/2007 Banda 3/CBERS-2B calibrada considerando (a)154 pixels e (b)54 pixels no processo de junção dos arranjos.



(a)



(b)

Figura 6.22 - Agricultura - Goiás(161/121)-29/10/2007 Banda 4/CBERS-2B calibrada considerando (a)154 pixels e (b)54 pixels no processo de junção dos arranjos.

A composição colorida (R3G4B2) das imagens calibradas CCD/CBERS-2B para o alvo de agricultura, é apresentada na [Figura 6.23](#).

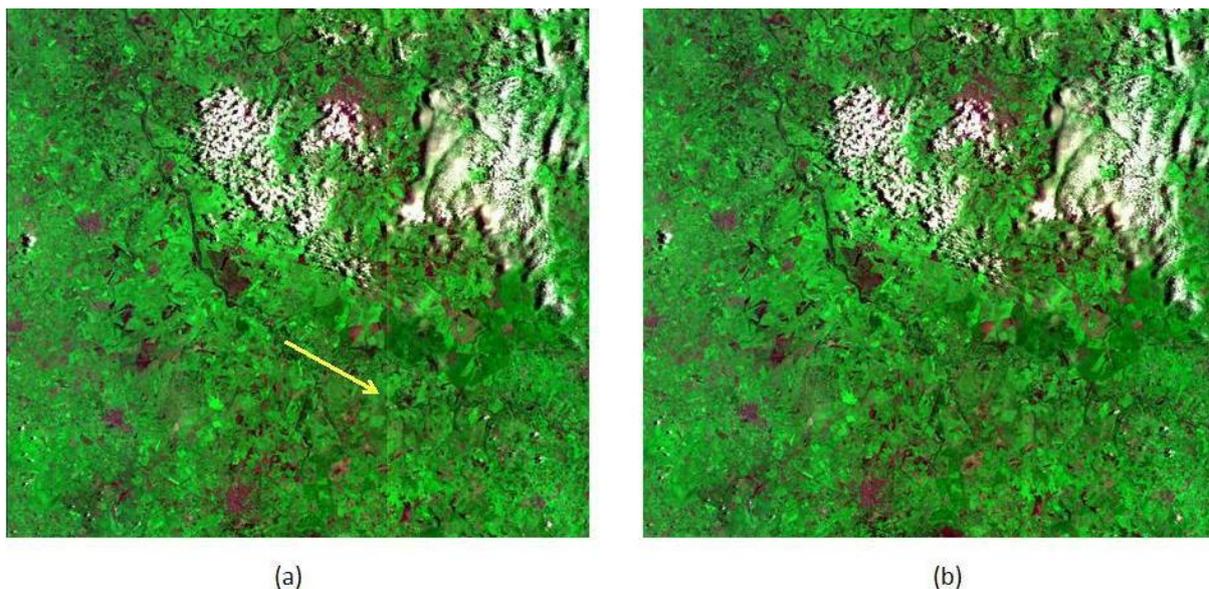


Figura 6.23 - Imagem calibrada R3G4B2 da região de Goiás(P161/R121) - 29/10/2007 CBERS-2B considerando (a)154 *pixels* e (b)54 *pixels* no processo de junção dos arranjos.

Assim como para o CBERS-2, em alguns casos, a emenda na região de sobreposição dos detectores ainda é visível, mesmo quando suavizada.

Diante dos resultados apresentados, observa-se que muitos dos problemas de radiometria das imagens da câmara CCD ainda são desconhecidos. Por exemplo, por que os valores de níveis de cinza dos detectores escuros variam de linha para linha? Discussões com técnicos têm apontado que uma das causas é a variação na temperatura dos sistema durante o imageamento. Por que o método de calibração relativa não funciona adequadamente para algumas imagens? Esta questão deve ser investigada através de uma análise de um conjunto de dados mais amplo. Para este tipo de análise é necessário desenvolver uma ferramenta que permita a análise de grandes quantidades de imagens de uma forma mais eficiente.

### 6.3 Avaliação da Qualidade Radiométrica

Avaliar quão eficiente são os coeficientes de calibração é uma tarefa difícil. A maneira mais fácil de avaliar a qualidade da imagem é através da inspeção visual que mostra os defeitos e problemas nas imagens após a calibração. Observa-se que os resultados da calibração dependem de alguns fatores, tais como, presença de nuvens e presença de ruído principalmente nas áreas homogêneas.

Neste trabalho, para avaliar a qualidade radiométrica da imagem, utilizamos imagens de áreas homogêneas, como as mostradas nas Figuras 6.24 e 6.25. Informações sobre estas

regiões são apresentadas na [Tabela 6.1](#). As áreas testes, nas imagens do deserto de Gobi e no lago de Lousiana, são indicadas com um quadrado nas Figuras [6.24](#) e [6.25](#).

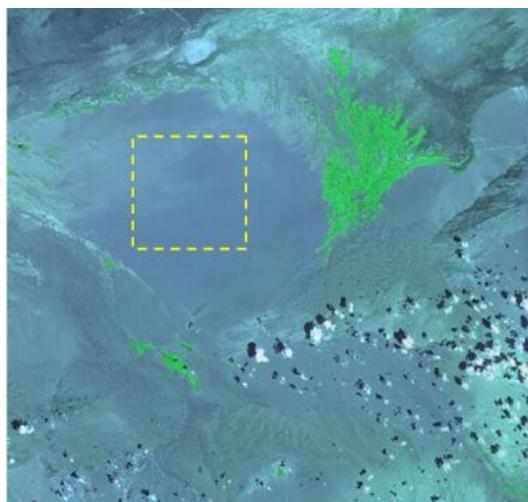


Figura 6.24 - Região do deserto de GOBI (25/55) - 19/08/2004 Composição 2(B)3(G)4(R).



Figura 6.25 - Região de Lousiana (212/66) - 23/12/2007 Composição 2(B)3(G)4(R).

Tabela 6.1 - Características das imagens homogêneas selecionadas.

Satélite	Cena	Órbita/Ponto	Datas
CBERS-2	GOBI	25/55	19/08/2004
CBERS-2B	Lousiana	212/66	23/12/2007

O objetivo da avaliação é verificar se nas regiões homogêneas, onde normalmente a relação sinal/ruído é baixa, a calibração foi realizada adequadamente. A correção adequada indica que a variação de níveis de cinza deve ser relativamente baixa, considerando que as regiões analisadas são homogêneas. O método de avaliação usado aqui é proposto por [Yong et al. \(2006\)](#).

O processo de avaliação descrito por [Yong et al. \(2006\)](#), é modelado pela diferença entre as médias dos valores de níveis de cinza de cada coluna da imagem e a média dos níveis de cinza dos *pixels* na área teste, dado por:

$$Erro = \frac{\sum_{i=1}^M \left| \left( \sum_{j=1}^N f(j, i) / N \right) - Media \right|}{M} \quad (6.1)$$

onde  $f(j, i)$  é a imagem teste usada no cálculo,

N é o número de linhas e M é o número de colunas.

$$Media = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(j, i)}{M.N} \quad (6.2)$$

Imagens de 400x400 *pixels* da região do deserto de Gobi e do lago de Lousiana, foram selecionadas como mostra a região limitada pelo quadrado pontilhado nas Figuras [6.24](#) e [6.25](#).

Os valores de erros medidos para cada banda das imagens antes e depois da calibração relativa da câmara CCD dos satélites CBERS-2 e CBERS-2B são apresentados nas Tabelas [6.2](#) e [6.3](#), respectivamente. Pode-se observar que para as imagens calibradas, o erro é menor, tanto para o satélite CBERS-2 quanto para o CBERS-2B, mostrando assim, uma melhoria na qualidade radiométrica das imagens.

Tabela 6.2 - Valores do erro calculado para cada banda/CBERS-2.

<b>Bandas</b>	<b>Original</b>	<b>Calibrada</b>
B1	2,893	0,465
B2	2,408	0,868
B3	2,033	0,400
B4	3,053	0,802
B5	2,678	0,530

Tabela 6.3 - Valores do erro calculado para cada banda/CBERS-2B.

<b>Bandas</b>	<b>Original</b>	<b>Calibrada</b>
B1	0,688	0,060
B2	0,688	0,128
B3	0,790	0,398
B4	0,662	0,198
B5	0,657	0,357

Embora as imagens usadas no experimento anterior contenham áreas que podem ser caracterizadas como homogêneas, apenas uma imagem de cada uma das duas regiões foi adquirida. Para ter uma amostra mais representativa, usamos quatro imagens CCD do satélite CBERS-2 da região do Rio de Janeiro (órbita/ponto - 151/126), em quatro datas distintas (10/07/2004, 13/06/2005, 08/07/2006, 11/06/2007). A [Figura 6.26](#) mostra a imagem do Rio de Janeiro usada na avaliação. A [Tabela 6.4](#) mostra os erros médios medidos para cada banda, para as imagens antes e depois da calibração relativa. Podemos observar uma melhoria na qualidade radiométrica das imagens, embora estas imagens estejam mais ruidosas do que as usadas nos experimentos anterior.

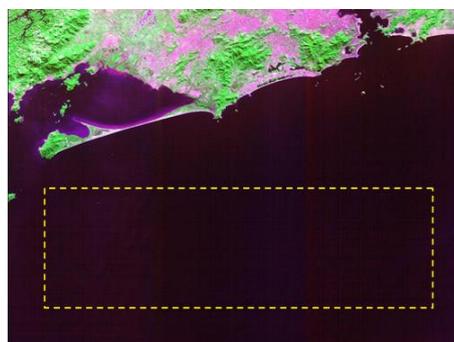


Figura 6.26 - Região do Rio de Janeiro (151/126) - 13/06/2005 Composição 2(B)3(G)4(R).

Tabela 6.4 - Valores médios dos erros para cada banda antes e depois da calibração relativa.

<b>Bandas</b>	<b>Média antes – depois</b>
B1	1,57 – 0,94
B2	2,40 – 1,28
B3	1,26 – 0,77
B4	2,30 – 1,40
B5	2,42 – 1,30

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foi enfatizada a importância de realizar correções radiométricas e geométricas para melhorar a qualidade das imagens dos satélites. Neste contexto, este trabalho apresentou uma técnica de calibração relativa das imagens da câmara CCD dos satélites CBERS-2 e CBERS-2B.

O método de calibração radiométrica relativa foi implementado utilizando-se imagens de calibração obtidas em laboratório, antes do lançamento. Uma análise das distorções radiométricas presentes nas respostas dos detectores da câmara CCD foi apresentada com o intuito de modelar e corrigir estas distorções. Para efeito de avaliação, o método proposto foi testado em imagens de três diferentes tipos de alvos (agricultura, urbano e vegetação).

Os resultados mostraram uma melhora significativa na calibração radiométrica dos detectores das imagens da câmara CCD, principalmente na região de transição entre os detectores dos arranjos. Entretanto, para algumas imagens, as bandas 1 e 5 apresentaram resultados não muito bons.

A realização de procedimentos periódicos para gerar novos coeficientes de calibração relativa e validar os existentes é fundamental para gerar imagens com boa qualidade radiométrica aos usuários. A questão em relação aos satélites CBERS-2 e CBERS-2B é a inexistência de um sistema de calibração interna eficiente que possa ser utilizada rotineiramente. Uma solução seria a utilização de imagens de áreas homogêneas para calcular os novos coeficientes de calibração. O problema é encontrar áreas suficientemente grandes que cubram os milhares de detectores da câmara CCD. Neste caso, teríamos que selecionar pedaços de imagens que cubram parte dos detectores, montar um banco de dados e usar este banco para o cálculo de novos coeficientes de calibração.

Além disso, deve-se aprofundar o estudo sobre a influência dos detectores escuros nas imagens e deste modo verificar se existe correlação entre eles. Em relação a região de sobreposição, outros métodos podem ser propostos e testados a fim de gerar o maior número possível de imagens com boa qualidade radiométrica.

Atualmente, as imagens CCD do CBERS-2 e CBERS-2B distribuídas, de forma gratuita, aos usuários são processadas na estação de processamento CBERS pelo mesmo método apresentado neste trabalho.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BADUE, G. S. **Estimação de erros de efemérides orbitais e de atitude por meio de pontos de controle**. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais / Mecânica e Controle) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Campinas, 2006. 31
- BENSEBAA, K. **Estimação da resolução espacial da câmera CCD dos satélites CBERS-1 e 2**. 91 p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005. 41
- BENSEBAA, K.; FONSECA, L. M. G.; BANON, G. J. F. On-orbit spatial resolution estimation of cbers-1 ccd imaging system using higher resolution images. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 827–834. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.19.28/doc/827.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2007. 41
- CÂMARA, G.; FONSECA, L.; CARTAXO, R.; MACHADO, A.; ESCADA, J. B.; PONZONI, F. **A preliminary assessment of geometric and radiometric quality for CBERS-1 CCD instrument**. São José dos Campos: INPE, 2002. 40p. (APPL-02-2002,1.0). 40
- CHAVEZ, P. S. J. Radiometric calibration of landsat thematic mapper multispectral images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 55, n. 9, p. 1285–1294, Sept. 1989. 26
- D'ALGE, J.; CARTAXO, R. **INPE's proposal for CBERS-2 products**. São José dos Campos, 2004. 6p. (APPL-10-2004,1.0). 36
- DINGUIRARD, M.; SLATER, P. N. Calibration of space-multispectral imaging sensors: a review. **Remote Sensing of Environment**, v. 68, n. 3, p. 194–205, 1999. 39, 42
- ELVIDGE, C. D.; YUAN, D.; WEERACKOON, D.; LUNETTA, R. S. Relative radiometric normalization of landsat multispectral scanner (mss) data using an automatic scattergram-controlled regression. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 61, n. 10, p. 1255–1260, Oct. 1995. 26
- EPIPHANIO, J. C. N. **Brasil na era espacial e o sucesso CBERS-2**. São José dos Campos: INPE, 2007. Disponível em: <<http://www.uol.com.br/jornaldecampos/637/foguete.htm>>. Acesso em: 10 jan. 2008. 32

- FONSECA, L. M. G.; PONZONI, F.; CARTAXO, R. **Radiometric quality assessment of CBERS-2**. São José dos Campos: INPE, 2004. 55p. (APPL-06-2004,1.1). 34, 36, 40, 48
- FONSECA, L. M. G.; PRASAD, G. S. S. D.; MASCARENHAS, N. D. A. Combined interpolation-restoration of landsat images through a fir filter design techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 13, p. 1247–2561, 1996. 37
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de imagens digitais**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2000. 509 p. 37
- HALL, F. G.; STREBEL, E. D.; NICKESON, E. J.; GOETZ, S. J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images. **Remote Sensing of Environment**, v. 35, p. 11–27, 1991. 26
- HELDER, D.; BONCYK, W.; MORFITT, R. Absolute calibration of the landsat thematic mapper using the internal calibrator. **IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, v. 31, n. 6, p. 2716–2718, 1998. 41
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Seminário de aplicações CBERS-2: 2º ano de sucesso**. São José dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/seminarioCBERS/index.htm>>. Acesso em: ago. 2006. 32
- \_\_\_\_\_. **Programa CBERS**. 2007. Disponível em: <<http://www.cbbers.inpe.br/>>. Acesso em: junho 2007. 25, 30, 31, 34
- ITTEN, I. K.; 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, 1993. 25
- MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. Wiley, Chichester: John Wiley and Sons, 1999. 292 p. 40
- MENESES, P. R. **Fundamentos da radiometria óptica espectral**. Brasília:UNB, 2001. 15–42 p. 39
- MORAN, M. S.; JACKSON, R. D.; CLARKE, T. R.; QI, J.; CABOT, F.; THOME, K. J.; MARKHAM, B. L. Reflectance factor retrieval from landsat tm and spot hrv data for bright and dark targets. **Remote Sensing of Environment**, v. 52, n. 3, p. 218–230, 1995. 42
- MOREIRA, J. C. A.; CORREA, N. F. M.; PONZONI, F. J. Avaliação de diferenças radiométricas dos produtos disponibilizados pela dgi/inpe. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO

DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2091–2098. Disponível em: <[mar.te.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.12.13.41/doc/15\\_074.pdf](http://mar.te.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.12.13.41/doc/15_074.pdf)>. Acesso em: 15 maio 2007. 40

NASA. **Dark reference characterization bias assessment**. Washington, D. C., 2007. 26p. 60

\_\_\_\_\_. **Landsat 7 Science data users handbook**. 2008. Disponível em: <[http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook\\_toc.html](http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_toc.html)>. Acesso em: 5 nov. 2007. 42

PONZONI, F. J.; ZULLO, J. J.; LAMPARELLI, R. A. C. Calibração absoluta da câmera ccd/cbers-2. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 16–21. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/producao/trabalhos-em-anais-de-eventos/2004/1067.pdf/download.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2007. 41

\_\_\_\_\_. Transformações radiométricas dos dados dos sensores do satélite cbers-2. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 2006, Campo Grande. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2006. p. 912–921. Disponível em: <[http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17/\\$%4080/2006/12.08.13.51.31/doc/p131.pdf](http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17/$%4080/2006/12.08.13.51.31/doc/p131.pdf)>. Acesso em: 2 jul 2007. 42

\_\_\_\_\_. **Calibração absoluta de sensores orbitais: conceituação, principais procedimentos e aplicação**. São José dos Campos: A, Silva Vieira Ed., 2007. 65 p. 41

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing: models and methods for image processing**. San Diego: Academic Press, 1997. 522 p. 39

SIELINGARDI, M. **Relatório sobre o desempenho do subsistema câmera CCD/CBERS**. São José dos Campos, 1999. CBH-ITRP-095. 33

SILVA, A. J. F. M. **Geometria de imagens: do projeto do satélite à geração dos produtos**. 256 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/08.14.18.19.44>>. Acesso em: 3 jul. 2006. 36

SILVA, A. J. F. M.; FONSECA, L. M. G. **Algoritmos de correção radiométrica**. São José dos Campos: INPE, 2003. 51p. (CB-ALG-10000-1-FP,1.0). 66, 67

SLATER, P. N.; BIGGAR, S. F.; PALMER, J. M.; THOME, K. J. Unified approach to absolute radiometric calibration of the landsat-7 etm+ and landsat-5 tm sensors based on tandem data sets. **Remote Sensing of Environment**, v. 78, p. 39–54, 2001. [42](#)

THOME, K.; MARKHAM, B.; SLATER, P.; BIGGAR, S. Radiometric calibration of landsat. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 63, n. 7, p. 853–858, 1997. [42](#)

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY(USGS). **Landsat 7 image assessment system (IAS) radiometric algorithm theoretical basis document (ATBD)**. Washington: NASA, 2003. [42](#)

VALORGE, C.; MEYGRET, A.; LEBÉGUE, L.; HENRY, P.; BOUILLON, A.; GACHET, R.; BRETON, E.; LÉGER, D.; VIALLEFONT, F. Pos-launch calibration of satellite sensors. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON RADIOMETRIC AND GEOMETRIC CALIBRATION, 2003, Mississippi. **Proceedings...** Mississippi, USA: Routledge, UK, 2004. p. 193. [26](#)

YONG, Z.; QIAOYAN, F.; JIANYAN, X.; WENYU, W.; FONSECA, L.; D'ALGE, J.; ERTHAL, G. J.; MATOS, J. D.; MARIA, S.; SELINGARDI, M. **Procedures for CBERS-2B radiometric and geometric quality assessment and validation**. São José dos Campos: INPE, 2006. APPL-06-2006,1.1. [41](#), [45](#), [46](#), [93](#)

YUAN, D.; ELVIDGE, C. D. Comparison of relative radiometric normalization techniques. **Photogrammetric and Remote Sensing**, v. 51, p. 117–126, 1996. [26](#)

ZHANG, Y.; CHEN, S.; ZHOU, S.; WO, Y. Preflight calibration of hy-1 satellite 4-band ccd camera. In: ASIAN CONFERENCE ON REMOTE SENSING, 22., 2001, Singapore. **Proceedings...** Singapore: CRISP, SISV, AARS, 2001. p. 1–6. [44](#)

## **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.