

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

ORTORRETIFICAÇÃO DE IMAGENS CCD CBERS 2 ATRAVÉS DA
TRANSFORMAÇÃO DLT

PAULA DEBIASI

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Florêncio de Souza

Co-orientador: Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós Graduação em Sensoriamento
Remoto da Universidade Federal do
Rio Grande do Sul para obtenção do
título de Mestre em Sensoriamento
Remoto.

Porto Alegre

2008

Agradecimentos

Ao apoio, dedicação, exemplo e enorme compreensão dos meus pais: Cleusa e João, pessoas especiais e essências em minha vida.

Ao Prof. Dr. Sérgio F. de Souza pela orientação neste trabalho, e pela importante colaboração durante a minha formação acadêmica.

Ao Prof. Dr. Édson A. Mitishita pela imprescindível co-orientação neste trabalho, e pela oportunidade ímpar de trabalhar na UFPR.

Ao CEPSRM, seus professores, funcionários e meus queridos colegas pelos poucos, mas importantes momentos vividos no centro. A CAPES pela bolsa de estudos concedida.

Ao pessoal da UFPR pela ótima acolhida durante a minha estada em Curitiba, principalmente ao Professor Álvaro M.L. Machado por todo o tempo disponibilizado para as adaptações do programa Registro.

Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive

Ricardo Reis

Sumário

Lista de Tabelas.....	vi
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Siglas.....	ix
Resumo.....	xi
Abstract.....	xii
1 Introdução.....	13
1.1 Objetivo Geral.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
1.3 Justificativas.....	15
1.4 Organização do Trabalho.....	16
2 Fundamentação Metodológica.....	17
2.1 Imagens Orbitais.....	17
2.2 Distorções Geométricas.....	20
2.3 Correções Geométricas.....	22
2.3.1 Ortorretificação.....	23
2.4 Modelos Matemáticos para Ortorretificação.....	24
2.4.1 Rigorosos	25
2.4.2 Generalizados	26
2.4.2.1 Transformação Linear Direta.....	27
2.5 Modelo Digital de Elevação.....	30
2.5.1 SRTM.....	31
2.6 Satélite CBERS.....	34

2.7 Avaliação de Produtos Cartográficos.....	35
3 Materiais e Métodos.....	37
3.1 Programa Registro.....	37
3.2 Área de Estudo.....	39
3.2.1 Pontos de Controle e de Checagem.....	43
3.2.2 Modelo Digital de Elevação Cartas.....	45
3.2.3 Modelo Digital de Elevação SRTM.....	46
3.2.4 Comparação entre MDE's.....	48
3.3 Geração de Ortoimagem através do Programa Registro.....	50
3.4 Geração de Imagem Corrigida por Polinômio de 2°.....	50
4- Resultados e Discussões.....	51
4.1 Ajustamento da Transformação DLT.....	51
4.2 Geração das Ortoimagens e Imagem Corrigida.....	54
4.2.1 Ortoimagem gerada a partir do MDE Cartas.....	54
4.2.2 Ortoimagem gerada a partir do MDE SRTM.....	55
4.2.3 Imagem Corrigida através do Polinômio de 2°.....	56
4.3 Avaliação das Ortoimagens e Imagem Corrigida.....	57
4.3.1 Análise Estatística.....	61
5 - Conclusões e Recomendações.....	66
6 – Referências.....	69

Lista de tabelas

Tabela 01: Relações para a transformação dos parâmetros implícitos da DLT em parâmetros físicos.....	29
Tabela 02: Classificação das Cartas segundo o PEC.....	36
Tabela 03: Parâmetros da Imagem CCD do CBERS 2.....	42
Tabela 04: Os 11 Parâmetros de Transformação DLT.....	53
Tabela 05: Diferença planimétrica entre as coordenadas dos pontos de verificação nas carta topográficas e nas Ortoimagens e Imagem Corrigida pelo Polinômio de 2°	58
Tabela 06: Teste de Student	62
Tabela 07: Distribuição de Qui-quadrado.....	63

Lista de figuras

Figura 01: Aquisição de Imagem por sensores de varredura linear (<i>Pushbroom Scanner</i>).....	18
Figura 02: Aquisição de Imagens por sensores de área ou quadro (<i>Frame</i>).....	19
Figura 03: Aquisição de Imagem por sensores de rotação (<i>Whiskbroom</i>).....	19
Figura 04: O efeito da rotação da Terra no imageamento.....	20
Figura 05: Erros relacionados à variação da posição, velocidade e atitude da plataforma.....	21
Figura 06: Geração da Ortoimagem através da associação do MDE e a matriz da Ortoimagem.....	24
Figura 07: Número de imagens coletadas na missão SRTM.....	32
Figura 08: Geometria do radar interferométrico.....	33
Figura 09: Nave espacial <i>Endeavour</i>	34
Figura 10: Fluxograma de processamento do Programa Registro.....	39
Figura 11: Deslocamento máximo devido ao relevo.....	40
Figura 12: Mapa de localização da área teste.....	41
Figura 13: Cena CCD CBERS 2 composição colorida 4-3-2 e recorte abrangendo um quadrante da cena.....	43
Figura 14: Localização dos pontos de controle.....	44
Figura 15: Localização dos pontos de checagem.....	44
Figura 16: Modelo Digital de Elevação gerado a partir das curvas de nível e pontos cotados das cartas topográficas.....	46
Figura 17: Modelo Digital de Elevação gerado a partir do MDE do SRTM.....	48
Figura 18: Subtração MDE Cartas - MDE SRTM.....	49
Figura 19: Resíduos em X e Y dos pontos de controle no ajustamento da transformação DLT.....	52
Figura 20: Ortoimagem utilizando o MDE das Cartas.....	55
Figura 21: Ortoimagem utilizando o MDE do SRTM.....	56

Figura 22: Imagem corrigida pelo polinômio de 2°	57
Figura 23: Erros Planimétricos dos pontos de verificação na ortoimagem gerada a partir do MDE das Cartas.....	59
Figura 24: Erros Planimétricos dos pontos de verificação na ortoimagem gerada a partir do MDE do SRTM.....	59
Figura 25: Erros Planimétricos dos pontos de verificação na imagem corrigida pelo polinômio de 2°	60

Lista de Siglas

APM - *Affine Projection Model*

ASI - *Agenzia Spaziale Italiana* (Agência Espacial Italiana)

CAST - *Chinese Academy of Space Technology* (Academia Chinesa de Tecnologia Espacial)

CBERS - *China-Brazil Earth Resources Satellite* (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres)

CCD - *Charge Couple Device* (Dispositivo de Carga Acoplada)

CGIAR-CSI - *Consultative Group for International Agriculture Research - Consortium for Spatial Information*

CONCAR - Comissão Nacional de Cartografia

COPEL - Companhia Paranaense de Energia

DLT - *Direct Linear Transformation* (Transformação Linear Direta)

DLR - *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (Agência Espacial Alemã)

EP - Erro Padrão

GPS - *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global)

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IC - Intervalo de Confiança

IFOV - *Instantaneous Field of View* (Campo de Visada Instantâneo)

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MDE - Modelo Digital de Elevação

MMQ - Método dos Mínimos Quadrados

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

NIMA - *National Imagery and Mapping Agency*

PEC - Padrão de Exatidão Cartográfica

PIXEL - *Picture Element*

RMS - *Root Square Error* (Erro Quadrático Médio)

RPC – *Rational Polynomial Coefficients*

SAD 69 – *South America Datum 69*

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

UTM - *Universal Transversa de Mercator*

WGS 84 – *World Geodetic System 84*

Resumo

Este trabalho avalia a potencialidade da geração de ortoimagens advindas do sensor CCD do CBERS 2 produzidas através de um modelo matemático generalizado, a Transformação Linear Direta (DLT). O modelo de transformação foi implementado na linguagem Delphi 4.0 por alunos de pós-graduação da Universidade Federal do Paraná (UFPR), sendo gerado um utilitário para adaptar a leitura do Modelo Digital de Elevação (MDE) do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) no programa. A área utilizada como teste é uma região de relevo variando de plano a acidentado com variação de até 700m de altura, localizada no Centro Oriental Paranaense e abrangendo o cânion do Guartelá. Para a geração das ortoimagens utilizou-se de duas fontes de informação altimétrica, um MDE gerado pela missão SRTM e outro MDE gerado por curvas de nível e pontos contados de cartas topográficas na escala 1:50.000. Foi realizado o processo de ortorretificação de um recorte da cena CBERS utilizando os diferentes MDE's, sendo as ortoimagens analisadas por testes estatísticos, e classificadas pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) com o uso de pontos de verificação. Para a avaliação da necessidade de ortorretificação da cena CCD CBERS 2 o mesmo recorte foi também corrigido geometricamente por um polinômio de 2°. Os resíduos planimétricos gerados pela simples correção através do polinômio de 2° demonstram que há necessidade do processo de ortorretificação, ou seja, correção de erros devido à topografia do relevo nesta cena. E a comparação entre as ortoimagens geradas pelos diferentes MDE's demonstra que é satisfatória a utilização do MDE do SRTM na ortorretificação de imagens advindas do sensor CCD do CBERS 2.

Palavras Chave: Ortorretificação, DLT, CBERS

Abstract

This work evaluates the orthoimages generation potentiality of the CCD sensor from the CBERS 2, by using a generalized mathematical model, say, the "Direct Linear Transformation (DLT)". The transformation model was implemented by the pos graduated students from the Federal University of Paraná using the Delphi 4.0 language, and in this task an utilitarian software to adapt the Digital Elevation Model (DEM) from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) function, on the program was produced. The land area surface used for trial is localized at the Paraná Oriental Centre and comprising the Guartelá canyon, varies in shape from an irregular to a plane embossment where variations up to 700m in height are found. Two DEM sources of altimetry information data for the orthoimages generations were used: The first generated from SRTM mission and the another one developed from contour lines and topographic points counted in a 1:50.000 scale. A orthorectification process, of a cutting out scene from the CBERS, was realized utilizing both MDE's. The images were analyzed by statistics inferences and classified according to the *Padrão de Exatidão Cartográfica* (PEC) using check points. To evaluate the CCD CBERS 2 scene orthorectifications necessity, the same cutting out was also object of geometric corrections having a second degree polynomial as a tool. The planimetrics residues generated by the second degree polynomial simplified corrections were just enough to demonstrate the necessity of the orthorectification process, it is, corrections of errors due to the embossment topography at the considered scene. The comparison of the images produced by the different DEM's demonstrate that the utilization of the DEM from the SRTM is a satisfactory tool for images orthorectifications of the CBERS 2.

Key words: Orthorectification, DLT, CBERS

1.0 INTRODUÇÃO

Com o nascimento do programa de satélites Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS – *China-Brazil Earth Resources Satellite*) em 1988, o Brasil tornou-se um dos poucos países desenvolvedores da tecnologia do Sensoriamento Remoto. A disponibilidade de imagens CBERS gratuitamente no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), possibilita o uso de uma importante ferramenta para trabalhos de monitoramento do território nacional. As imagens CBERS possuem aplicação em diferentes áreas do conhecimento, com trabalhos relacionados com o controle do desmatamento e queimadas na Amazônia, em áreas agrícolas, reconhecimento da ocupação do solo e crescimento urbano.

O uso de imagens orbitais requer, em algumas aplicações, um maior controle geométrico, sendo realizadas correções geométricas antes da extração de informações cartográficas. Constata-se a necessidade de uma avaliação da potencialidade de imagens advindas do sensor CCD do CBERS 2 na criação de ortoimagens, produtos cada vez mais utilizados como bases cartográficas em diversas áreas do conhecimento.

Para a ortorretificação de imagens orbitais existem modelos matemáticos rigorosos, baseados na colinearidade ou modelos generalizados. Para a utilização de modelos matemáticos rigorosos, devem-se obter os parâmetros de atitude, calibração e órbita do sensor, que nem sempre estão disponíveis. Os modelos matemáticos generalizados são independentes dos parâmetros do sensor e do tipo de plataforma (ELASHMAWY *et al*, 2005). Estes modelos são vastamente aplicados em imagens em que não se dispõe dos parâmetros do sensor (FERNANDES 2004, OKAMOTO *et al* 1998, PEDRO 2005).

Por ser uma tecnologia relativamente nova, as imagens do CBERS 2 não possuem modelos matemáticos específicos, nem estão disponibilizados os parâmetros para a aplicação

de modelos rigorosos. Esta problemática limita a aplicação de suas imagens em trabalhos que necessitam um maior controle geométrico das imagens.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar ortoimagens do sensor CCD do CBERS 2 geradas através de um modelo matemático generalizado, a Transformação Linear Direta (DLT - *Direct Linear Transformation*). Os modelos matemáticos generalizados não descrevem fisicamente o processo de imageamento, mas utilizam uma transformação generalizada para descrever a relação entre a imagem e as coordenadas de terreno. Tal metodologia permite a correção de imagens sem o conhecimento dos parâmetros de orientação interior e exterior do sensor, sendo no caso das imagens do sensor CBERS 2 estes parâmetros desconhecidos para o usuário.

O modelo de transformação DLT será utilizado para ortorretificar um recorte de uma cena do CBERS 2, utilizando-se duas fontes de informação altimétrica.

1.2 Objetivos Específicos

- possibilitar a ortorretificação de imagens sem a necessidade do par estereoscópico, utilizando uma cena CCD CBERS 2 e o Modelo Digital de Elevação (MDE);
- ortorretificar um recorte da imagem, situação que não pode ser realizada quando se utiliza modelos rigorosos para a correção;
- testar a transformação DLT na ortorretificação de imagens CCD CBERS 2 em áreas de relevo variando de plano a acidentado;

- testar o MDE do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) no processo de ortorretificação de imagens CCD CBERS 2;
- comparar a ortoimagem gerada utilizando o MDE do SRTM com outra ortoimagem gerada através de um MDE mais detalhado (advindo de cartas topográficas);

1.3 Justificativas

A ortorretificação de imagens orbitais pode ser realizada em diversos softwares comerciais. Podem estar implementados os modelos específicos do sensor, ou podem-se utilizar modelos rigorosos de correção sendo necessário o conhecimento dos parâmetros de órbita e atitude do sensor. As imagens CCD do CBERS 2 não podem ser ortorretificadas através de modelos rigorosos, devido o desconhecimento dos parâmetros do sensor, e não existem softwares comerciais com o seu modelo de correção específico implementado. Sendo necessária a busca de alternativas para o processo de ortorretificação.

A política de distribuição gratuita das imagens CBERS pelo INPE disseminou o uso do Sensoriamento Remoto no Brasil. Entretanto, apesar da significativa melhora verificada no CBERS 2, a qualidade geométrica das imagens distribuídas (imagens nível 2 de processamento) não alcançaram a qualidade geométrica que o usuário se acostumou com as imagens Landsat (SILVA *et al*, 2007). Segundo o mesmo autor a qualidade dos dados orbitais (atitude e efemérides) é a principal causa para que isso ocorra. Havendo ainda a necessidade do uso de modelos generalizados ou polinômios para a correção geométrica destas imagens.

Dentro deste contexto, a proposta deste trabalho é utilizar alternativas de baixo custo para ortorretificar imagens CCD do CBERS 2 utilizando o MDE do SRTM também disponibilizado gratuitamente. Destaca-se ainda a importância do estudo da potencialidade da ortorretificação de imagens CBERS 2 devido a sua similaridade geométrica com o satélite

CBERS 2B, que foi lançado recentemente. Podendo o presente trabalho servir futuramente como base para a avaliação geométrica deste novo sensor.

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos, sendo em cada capítulo abordada as seguintes temáticas:

- Capítulo 1: no presente capítulo é introduzido o assunto do trabalho, apresentando-se o objetivo geral, os objetivos específicos, a justificativa da escolha deste tema e a estruturação do trabalho.
- Capítulo 2: é apresentada a fundamentação teórica deste trabalho, abrangendo conteúdos importantes no processo de correção geométrica de imagens orbitais e a avaliação de sua qualidade.
- Capítulo 3: neste capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados para o teste da metodologia proposta.
- Capítulo 4: os resultados alcançados com a metodologia de correção geométrica do recorte da cena CCD CBERS 2 são apresentados, analisados e discutidos.
- Capítulo 5: são feitas as conclusões do trabalho com a metodologia utilizada e apresentadas algumas recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA

2.1 Imagens Orbitais

As imagens Orbitais são coletadas em formato raster, no qual é constituído por uma matriz de milhares de pixels (*picture element*) (FALKNER e MORGAN, 2002). A cada pixel é associado um número de radiância média (brilho) relativo à menor área da cena. O tamanho desta área afeta a reprodução de detalhes da cena (SHOWENGERDT, 1983). Ou seja, os pixels são distribuídos em forma de matriz (grade) e cada célula desta matriz é representada por linha e coluna (x,y) e possui a ela associado um valor de média da intensidade da energia eletromagnética refletida pelos diferentes materiais presentes no pixel. Esta representação numérica da imagem permite uma grande variedade de aplicações, processamentos computacionais e técnicas de análise dos dados (SHOWENGERDT, 1983).

Os dispositivos usados para detectar a energia eletromagnética refletida na produção de imagens orbitais são detectores de estado sólido. Um tipo comum de detector de estado sólido é o chamado CCD (*Charge Couple Device* – Dispositivo de Carga Acoplada) (WOLF e DEWITT, 2000). Os CCD's são compostos de elementos sensores pontuais de silício, nos quais a tensão de saída é proporcional à intensidade de luz incidente.

Os sensores orbitais podem ser classificados quanto à geometria de aquisição de imagens:

- Sensores de varredura linear (*pushbroom scanner*) – linha de detectores que produzem a imagem bidimensional (Figura 01). Possuem seis parâmetros de Orientação Exterior por linha (X_c , Y_c e Z_c , κ , φ , ω), sendo X_c , Y_c e Z_c as coordenadas do centro de perspectiva no espaço objeto, e κ , φ , ω os ângulos eulerianos que representam as

rotações necessárias para tornar os referenciais paralelos, ambos discutidos posteriormente.

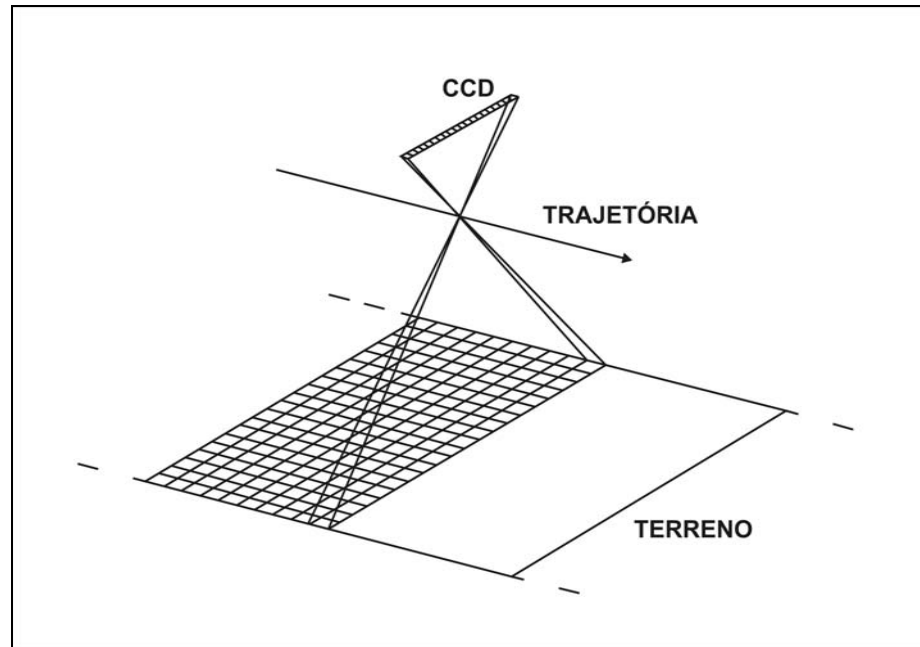


Figura 01: Aquisição de Imagem por sensores de varredura linear (*Pushbroom Scanner*)
Fonte: Adaptado de Wolf e Dewitt, 2000.

- Sensores de área (*frame*): chamados também de quadro ou matriciais, são compostos por uma matriz de detectores capaz de capturar a imagem bidimensional em um único instante (Figura 02), similar à aquisição imagens através de câmeras fotográficas analógicas.

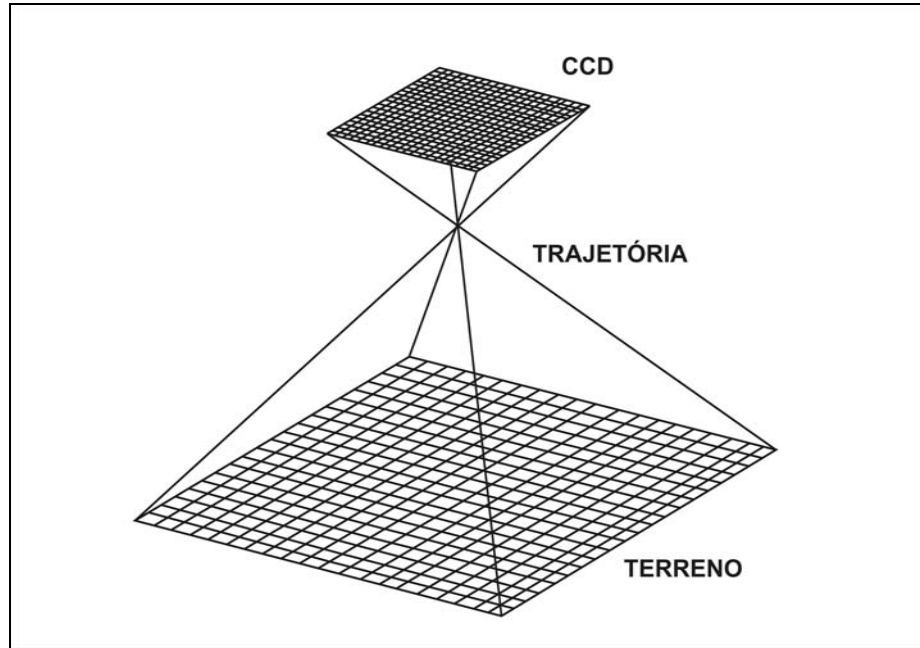


Figura 02: Aquisição de Imagens por sensores de área ou quadro (*Frame*)
 Fonte: Adaptado de Wolf e Dewitt, 2000.

- Sensores de rotação (*whiskbroom*): rotação de um prisma ou espelho (Figura 03).

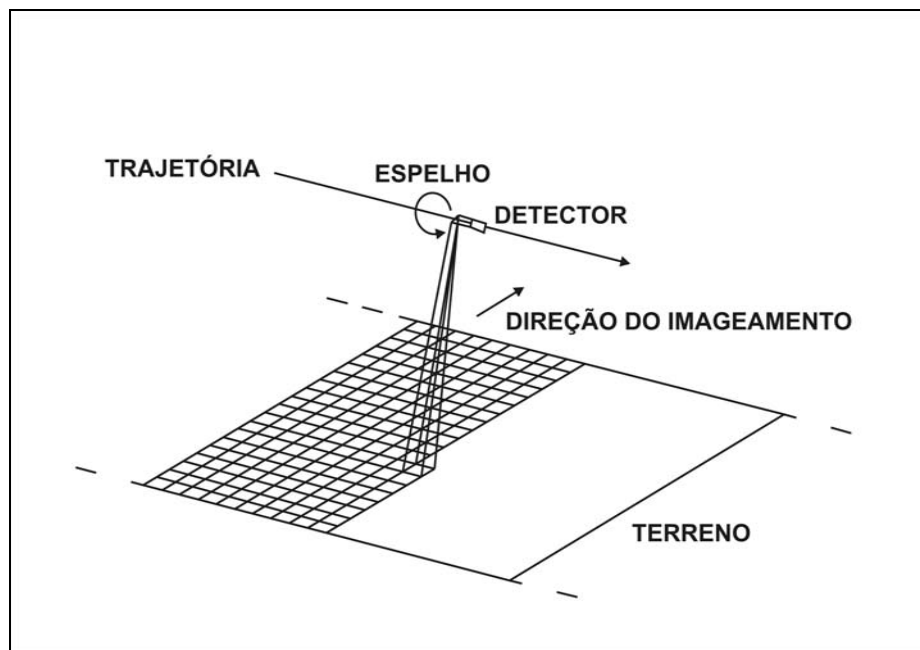


Figura 03: Aquisição de Imagem por sensores de rotação (*Whiskbroom*)
 Fonte: Adaptado de Wolf e Dewitt, 2000.

2.2 Distorções Geométricas

As imagens orbitais brutas advindas de sensores remotos possuem distorções sistemáticas que são introduzidas durante a aquisição da imagem, e relacionadas com diferentes fatores, incluindo:

- Rotação da Terra durante a aquisição da imagem (*skew*): Durante o tempo de aquisição da imagem (tanto por sensores de quadro quanto por sensores do tipo *pushbroom*) a Terra rotaciona de oeste para leste e o satélite também se desloca, sendo necessário compensar o posicionamento das varreduras (Figura 04).

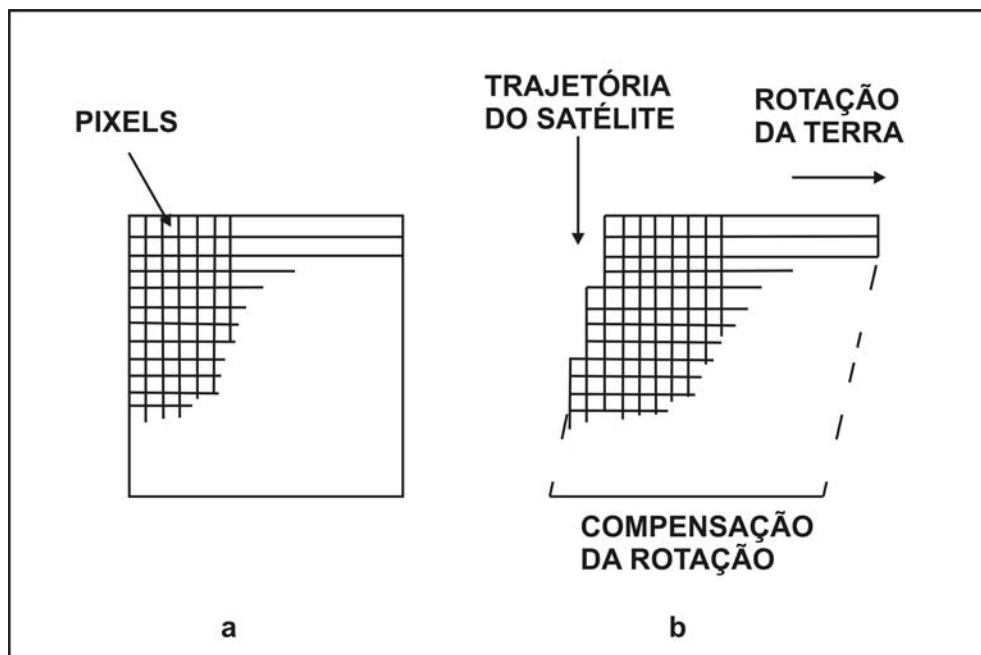


Figura 04: O efeito da rotação da Terra no imageamento
Fonte: Adaptado de Showengerdt, 1983.

- Distorções Panorâmicas: O IFOV (*instantaneous field of view* – campo de visada instantâneo) é um ângulo fixo e cobre diferentes dimensões do terreno, dependendo de sua inclinação. O pixel é a média das energias refletidas pelos alvos da superfície terrestre dentro de um IFOV. A distorção panorâmica resulta do tamanho efetivo do pixel no terreno ser maior nas extremidades do imageamento do que no nadir

(SHOWENGERDT, 1983).

- Curvatura da Terra: gera o mesmo efeito que a distorção panorâmica, aumentando a dimensão do terreno representada nos pixels da extremidade do imageamento.
- Variações na altitude, velocidade e atitude da plataforma: A variação da altitude da plataforma do sensor conduz a uma mudança de escala e campo de visada do IFOV (Figura 05a). Similarmente, a mudança de velocidade conduz à variação de escala ao longo da direção de imageamento (Figura 05b). As variações de atitude da plataforma são nomeadas de: *yaw* (guinada), *pitch* (arfagem) e *roll* (rolamento), e causam deslocamentos (Figura 05c-e). As variações de atitude da plataforma podem ser descritas matematicamente pelas efemérides do sensor (SHOWENGERDT, 1983).

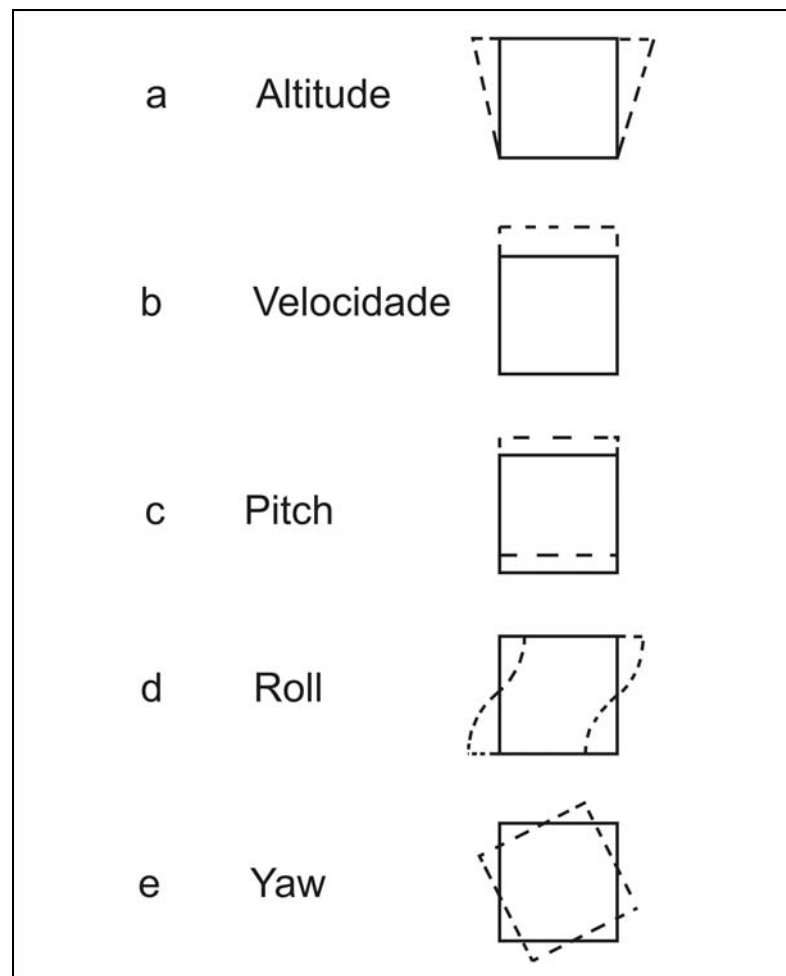


Figura 05: Erros relacionados à variação da posição, velocidade e atitude da plataforma
 Fonte: Adaptado de Showengerdt, 1983.

- Distorções devido ao relevo: o deslocamento na imagem é gerado devido a variações da superfície topográfica. Este efeito é corrigido utilizando-se informações relativas às elevações do relevo e o processo de correção geométrica, chamado de Ortoretificação é descrito no item 2.3.1.

2.3 Correções Geométricas

As correções geométricas removem os erros sistemáticos presentes nas imagens orbitais possibilitando a comparação da imagem corrigida a uma base cartográfica, sendo este processo constituído pelo mapeamento direto e inverso. No mapeamento direto é realizada a transformação geométrica relacionando o espaço imagem (coordenadas de linha e coluna) com o espaço objeto (coordenadas de terreno em um Sistema Geodésico de Referência), definindo-se assim a posição da imagem corrigida no espaço objeto. O mapeamento inverso utiliza a transformação geométrica inversa para retornar à imagem original e definir os valores de nível de cinza dos pixels da imagem corrigida, processo chamado de reamostragem. Conforme RICHARDS (1995) quando os centros dos pixels da imagem corrigida estão localizados exatamente na mesma posição dos centros dos pixels da imagem original o nível de cinza utilizado na grade da imagem corrigida é o mesmo. Quando isto não ocorre, é necessário um processo de interpolação para determinarem-se os valores de nível de cinza da imagem corrigida.

Existem diferentes tipos de correção geométrica, o enfoque principal deste trabalho é o processo de ortoretificação de imagens (item 2.3.1) sendo os diferentes modelos matemáticos de ortoretificação descritos no item 2.4.

Existem modelos de correção geométrica específicos para o sensor chamados de coeficientes polinomiais racionais (RPC – *Rational Polynomial Coefficients*). Um conjunto de

coeficientes polinomiais é computado acuradamente a partir dos modelos rigorosos do sensor e fornecido pelo vendedor das imagens de satélite (YAMAKAWA e FRASER, 2004). Os RPC's são distribuídos pelos operadores dos satélites de alta resolução como Ikonos e Quickbird.

Destaca-se também o uso de funções polinomiais quando não existem modelos matemáticos específicos para as imagens. O polinômio de segundo grau é descrito pela expressão matemática 1:

$$\begin{aligned} u &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \\ v &= b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \end{aligned} \quad (1)$$

Conforme SAVAPOL e ARMENAKIS (1998), a relação entre as coordenadas dos pontos na imagem (u,v) com as coordenadas dos pontos no terreno (x,y) é expressa por funções polinomiais assumindo a projeção da imagem na superfície terrestre como quase ortogonal devido à atitude do satélite e não considerando a elevação dos pontos na superfície terrestre.

2.3.1 Ortorretificação

O processo de ortoretificação utiliza uma imagem em perspectiva central para formar uma imagem retificada (imagem vertical corrigida de erros relativos à atitude do sensor durante a tomada da imagem) e corrigida dos deslocamentos devido ao relevo. A ortoimagem assim chamada combina a representação das feições representadas pela imagem com a geometria proporcionada pela carta. A maior diferença entre uma ortoimagem e um mapa é que a ortoimagem representa as feições através de imagens e os mapas utilizam linhas e

símbolos para a representação de feições (WOLF e DEWITT, 2000).

Para a correção dos deslocamentos devido ao relevo é necessário um MDE da área em estudo, sendo este, o item 2.5 do presente trabalho. Na figura 06 a geração da matriz da ortomagem com coordenadas de terreno é realizada pelo mapeamento direto, ou seja, utilizando o modelo de transformação matemático escolhido. A esta matriz em branco é associado o MDE para a correção de erros inerentes a elevação do relevo. Posteriormente é realizado o mapeamento inverso para o cálculo dos níveis de cinza dos pixels da matriz da ortomagem a partir da imagem original.

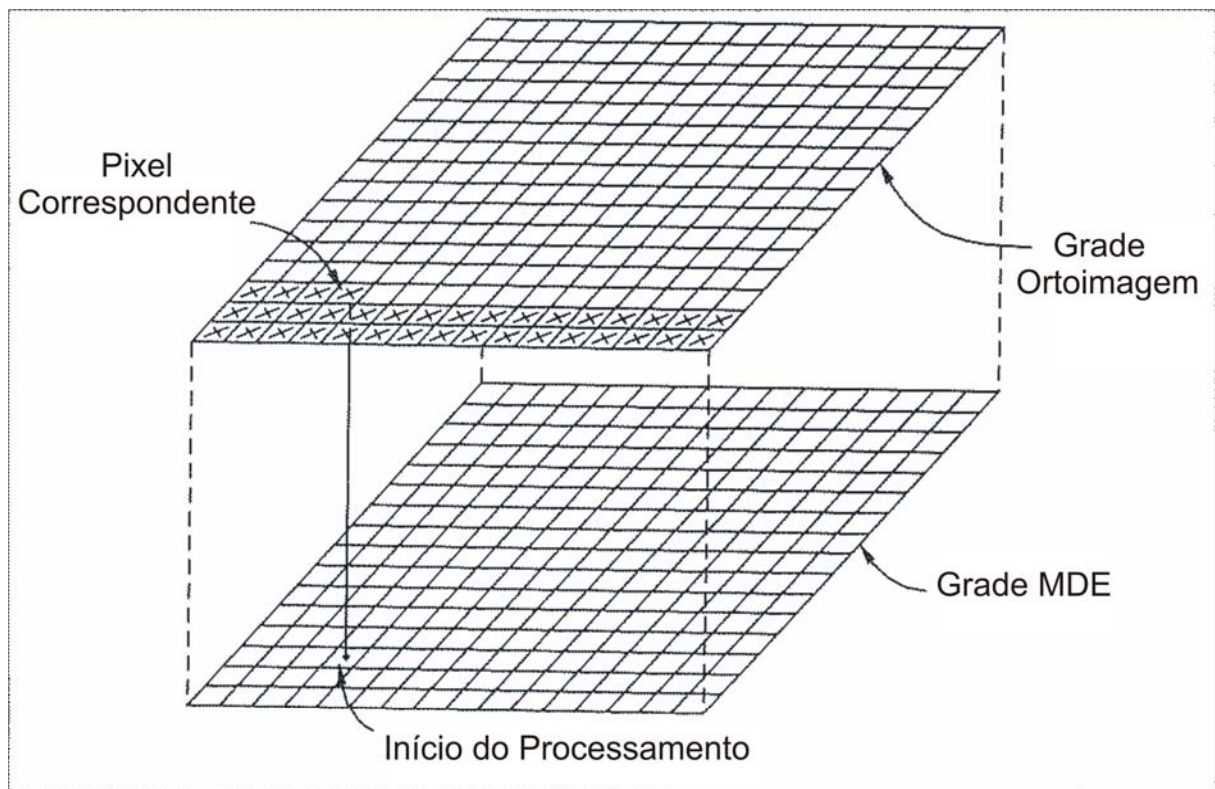


Figura 06: Geração da Ortomagem através da associação do MDE e a matriz da Ortomagem
Fonte: Adaptado de Wolf e Dewitt, 2000

2.4 Modelos Matemáticos para Ortorretificação

A transformação da imagem para a perspectiva ortogonal é obtida através de

transformações matemáticas. Existem modelos matemáticos rigorosos, baseados na condição de colinearidade, que descrevem rigorosamente a geometria do sensor no instante de tomada da imagem. Estes são mais rigorosos e fornecem resultados mais precisos (ELASHMAWY *et al*, 2005). Entretanto o desenvolvimento de modelos rigorosos requer informações como dados da trajetória do satélite e parâmetros de calibração do sensor nem sempre disponíveis. E existem modelos de correção generalizados que independem do tipo de plataforma e sensor. Segundo ELASHMAWY *et al* (2005), geralmente os modelos generalizados são menos precisos do que os modelos físicos, mas em alguns casos, a precisão dos resultados usando modelos generalizados pode ser próxima dos resultados obtidos com modelos rigorosos.

2.4.1 Modelos Rigorosos

Também designado pela bibliografia de modelo físico por descrever fisicamente a geometria do imageamento (ELASHMAWY *et al*, 2005; OKAMOTO, *et al*, 1998; YAMAKAWA e FRASER, 2004; SAVAPOL e ARMENAKIS, 1998). Estes modelos são baseados na equação de colinearidade e necessitam de parâmetros de atitude, calibração e órbita do sensor.

$$x - x_0 = -c \frac{m_{11}(X_P - X_C) + m_{12}(Y_P - Y_C) + m_{13}(Z_P - Z_C)}{m_{31}(X_P - X_C) + m_{32}(Y_P - Y_C) + m_{33}(Z_P - Z_C)}$$

$$y - y_0 = -c \frac{m_{21}(X_P - X_C) + m_{22}(Y_P - Y_C) + m_{23}(Z_P - Z_C)}{m_{31}(X_P - X_C) + m_{32}(Y_P - Y_C) + m_{33}(Z_P - Z_C)}$$
(2)

Onde:

- x e y são coordenadas do ponto na imagem
- x₀ e y₀ são coordenadas do ponto principal

- c é a distância focal
- X_p, Y_p e Z_p são as coordenadas do ponto no espaço objeto
- X_c, Y_c e Z_c são as coordenadas do centro de perspectiva no espaço objeto
- m_{ij} são elementos da matriz de rotação M com $1 \leq i \leq 3$ e $1 \leq j \leq 3$ determinada a seguir:

$$R_X(\omega) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \text{sen} \omega \\ 0 & -\text{sen} \omega & \cos \omega \end{pmatrix} R_Y(\phi) = \begin{pmatrix} \cos \omega & 0 & -\text{sen} \omega \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen} \omega & 0 & \cos \omega \end{pmatrix} R_Z(\kappa) = \begin{pmatrix} \cos \kappa & \text{sen} \kappa & 0 \\ -\text{sen} \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$M = R_Z(\kappa) \cdot R_Y(\phi) \cdot R_X(\omega) = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Onde:

$$m_{11} = \cos \phi \cdot \cos \kappa$$

$$m_{12} = \cos \omega \cdot \text{sen} \kappa + \text{sen} \omega \cdot \text{sen} \phi \cdot \cos \kappa$$

$$m_{13} = \text{sen} \omega \cdot \text{sen} \kappa - \cos \omega \cdot \text{sen} \phi \cdot \cos \kappa$$

$$m_{21} = -\cos \omega \cdot \text{sen} \kappa$$

$$m_{22} = \cos \omega \cdot \cos \kappa - \text{sen} \omega \cdot \text{sen} \phi \cdot \text{sen} \kappa$$

$$m_{23} = \text{sen} \omega \cdot \cos \phi + \cos \omega \cdot \text{sen} \phi \cdot \text{sen} \kappa$$

$$m_{31} = \text{sen} \phi$$

$$m_{32} = -\text{sen} \omega \cdot \cos \phi$$

$$m_{33} = \cos \omega \cdot \cos \phi$$

(κ, ϕ, ω) = ângulos eulerianos que representam as rotações necessárias para tornar os referenciais paralelos.

2.4.2 Modelos Generalizados

Os modelos matemáticos generalizados são independentes dos parâmetros do sensor e

do tipo de plataforma, estes modelos são vastamente aplicados em imagens em que não se dispõe dos parâmetros do sensor (FERNANDES 2004, OKAMOTO *et al* 1998, PEDRO 2005). São utilizados pontos de controle para a relação do sistema imagem com o sistema objeto.

2.4.2.1 Transformação Linear Direta

A transformação Linear Direta (DLT – *Direct Linear Transformation*) foi desenvolvida por ABDEL-AZIZ e KARARA (1971) para a calibração de câmaras não-métricas. Segundo MITISHITA *et al* (2003), na área de Sensoriamento Remoto, a DLT é considerada como sendo um caso particular da transformação matemática denominada Razão de Polinômios que é vastamente empregada na extração de informações 3D ou 2D a partir de imagens de satélite sem os parâmetros geométricos do sensor e órbita do satélite. Esta equação modela a transformação entre o sistema de coordenadas da imagem e o sistema de coordenadas do espaço objeto, sem a necessidade do conhecimento de parâmetros de orientação interior e exterior do sensor. Conforme MIKHAIL *et al* (2001) a DLT pode ser derivada da equação de colinearidade (expressão matemática 2), sendo que, neste caso adota-se uma escala diferente para as direções x e y da distância principal. Não é utilizada a origem das coordenadas da câmera, sendo a equação de colinearidade transformada na transformação DLT:

$$x = \frac{L_1 \cdot X_P + L_2 \cdot Y_P + L_3 \cdot Z_P + L_4}{L_9 \cdot X_P + L_{10} \cdot Y_P + L_{11} \cdot Z_P + 1}$$

(5)

$$y = \frac{L_5 \cdot X_P + L_6 \cdot Y_P + L_7 \cdot Z_P + L_8}{L_9 \cdot X_P + L_{10} \cdot Y_P + L_{11} \cdot Z_P + 1}$$

Onde:

$$L = \frac{1}{(m_{31} \cdot X_C + m_{32} \cdot Y_C + m_{33} \cdot Z_C)}$$

$$L_1 = L \cdot (x_0 \cdot m_{31} - c_x \cdot m_{11})$$

$$L_2 = L \cdot (x_0 \cdot m_{32} - c_x \cdot m_{12})$$

$$L_3 = L \cdot (x_0 \cdot m_{33} - c_x \cdot m_{13})$$

$$L_4 = x_0 + (L \cdot c_x \cdot (m_{11} \cdot X_C + m_{12} \cdot Y_C + m_{13} \cdot Z_C))$$

$$L_5 = L \cdot (y_0 \cdot m_{31} - c_y \cdot m_{21})$$

$$L_6 = L \cdot (y_0 \cdot m_{32} - c_y \cdot m_{22})$$

$$L_7 = L \cdot (y_0 \cdot m_{33} - c_y \cdot m_{23})$$

$$L_8 = y_0 + (L \cdot c_y \cdot (m_{21} \cdot X_C + m_{22} \cdot Y_C + m_{23} \cdot Z_C))$$

$$L_9 = L \cdot m_{31}$$

$$L_{10} = L \cdot m_{32}$$

$$L_{11} = L \cdot m_{33}$$

Nestas equações c_x , c_y , x_0 , y_0 , x e y estão em unidades do comparador, ou seja, no sistema de coordenadas da imagem, não sendo necessário a utilização das marcas fiduciais. Neste aspecto a transformação DLT é de grande importância para a utilização em câmeras não métricas e imagens orbitais. Outra particularidade da transformação DLT, é que por ser derivada da equação de colinearidade, os parâmetros físicos da câmera estão implícitos nas equações e podem ser derivados dos parâmetros da DLT através das relações constantes na Tabela 01:

Tabela 01: Relações para a transformação dos parâmetros implícitos da DLT em parâmetros físicos

$L^2 := (L_9)^2 + (L_{10})^2 + (L_{11})^2$		
$x_0 := \frac{L_1 \cdot L_9 + L_2 \cdot L_{10} + L_3 \cdot L_{11}}{L^2}$	$y_0 := \frac{L_5 \cdot L_9 + L_6 \cdot L_{10} + L_7 \cdot L_{11}}{L^2}$	
$(c_x)^2 := \left[\frac{(L_1)^2 + (L_2)^2 + (L_3)^2}{L^2} \right] - (x_0)^2$		$(c_y)^2 := \left[\frac{(L_5)^2 + (L_6)^2 + (L_7)^2}{L^2} \right] - (y_0)^2$
$m_{31} := \frac{L_9}{L}$	$m_{32} := \frac{L_{10}}{L}$	$m_{33} := \frac{L_{11}}{L}$
$m_{11} := \frac{\left(x_0 \cdot m_{31} - \frac{L_1}{L} \right)}{c_x}$	$m_{12} := \frac{\left(x_0 \cdot m_{32} - \frac{L_2}{L} \right)}{c_x}$	$m_{13} := \frac{\left(x_0 \cdot m_{33} - \frac{L_3}{L} \right)}{c_x}$
$m_{21} := \frac{\left(y_0 \cdot m_{31} - \frac{L_5}{L} \right)}{c_y}$	$m_{22} := \frac{\left(y_0 \cdot m_{32} - \frac{L_6}{L} \right)}{c_y}$	$m_{23} := \frac{\left(y_0 \cdot m_{33} - \frac{L_7}{L} \right)}{c_y}$

Os ângulos de orientação são derivados da matriz de rotação M (expressão matemática 3) e das expressões constantes na Tabela 01. Através do termo m_{31} da expressão 4 calcula-se o ângulo ϕ :

$$\phi = \text{sen}^{-1}(m_{31}) \quad (6)$$

Dividindo-se o termo m_{32} pelo termo m_{33} da expressão 4 e substituindo pelos respectivos termos constantes na tabela 01, obtém-se o ângulo ω :

$$\omega = \tan^{-1}\left(\frac{-L_{10}}{L_{11}}\right) \quad (7)$$

Substituindo o termo m_{31} na expressão de m_{11} ambos constantes na tabela 01, e igualando-se a m_{11} da expressão matemática 4 obtém-se o ângulo κ :

$$\kappa = \cos^{-1}\left(\frac{m_{11}}{\cos \phi}\right) \quad (8)$$

A posição da câmera é calculada por:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} L_4 \\ L_8 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

2.5 Modelo Digital de Elevação

O MDE é uma representação discreta da superfície terrestre (WOLF e DEWITT, 2000). A superfície terrestre pode ser definida através de um conjunto de pontos amostrais que possibilitam a construção de um modelo matemático representativo da superfície topográfica real. A obtenção dos pontos amostrais para a elaboração de um MDE pode ser realizada a partir de diferentes técnicas: levantamentos topográficos e geodésicos, fotogrametria, digitalização de mapeamentos analógicos, dados Laser scanner, dados Radar, dentre outras.

Os dois formatos mais comuns de elaboração de MDE são através de grades regulares ou de grades triangular irregular. A grade triangular irregular utiliza os pontos amostrais originais ligados três a três, formando triângulos irregulares. A grade regular utiliza

poliedros de faces regulares para aproximar a superfície topográfica, os vértices dos poliedros são os pontos amostrados, caso encontrem-se na mesma localização que a grade, ou obtidos por um processo de interpolação. Neste trabalho o interpolador utilizado para a geração dos MDE's com grades regulares foi a krigagem, um interpolador geoestatístico, que considera os valores amostrados e a sua localização espacial.

Conforme BEHDINIAN (2002) MDE's tornaram-se uma valiosa ferramenta não só para a geração de ortoimagens, mas para a indústria de telecomunicações, planejamentos de telefonia móvel, indústria de petróleo nas explorações e mapeamentos sísmicos, e em análises ambientais. A precisão do MDE adotado para a ortorretificação da imagem, está diretamente relacionada com a precisão do produto gerado. Se a precisão do MDE é de boa qualidade e o modelo é compatível com a realidade do terreno, o processo de interpolação de pontos altimétricos será mais preciso, proporcionando uma melhor precisão no cálculo da planimetria da ortoimagem.

2.5.1 SRTM

Como mencionado anteriormente existem diferentes técnicas de aquisição de pontos amostrais para a elaboração de MDE, dentre elas esta a coleta de informações de altimetria utilizando radares, sensores ativos que trabalham com comprimentos de onda na região das microondas. A missão SRTM foi um projeto internacional realizado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) em conjunto com a NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), DLR (Agência Espacial Alemã) e ASI (Agência Espacial Italiana) com o objetivo de gerar um MDE de quase toda a Terra.

A nave espacial *Endeavour* sobrevoou aproximadamente 80% da superfície terrestre (região contida entre as latitudes 56°S e 60°N) durante 11 dias do mês de fevereiro de 2000.

Na figura 07 o número de imagens coletadas é representado por cores, sendo em verde o maior número de imagens nos continentes e em vermelho a ausência de imagens. Nos oceanos as cores variam de preto (ausência de imagens) ao branco (maior número de imagens coletadas). As imagens oceânicas foram coletadas para o processo de calibração.

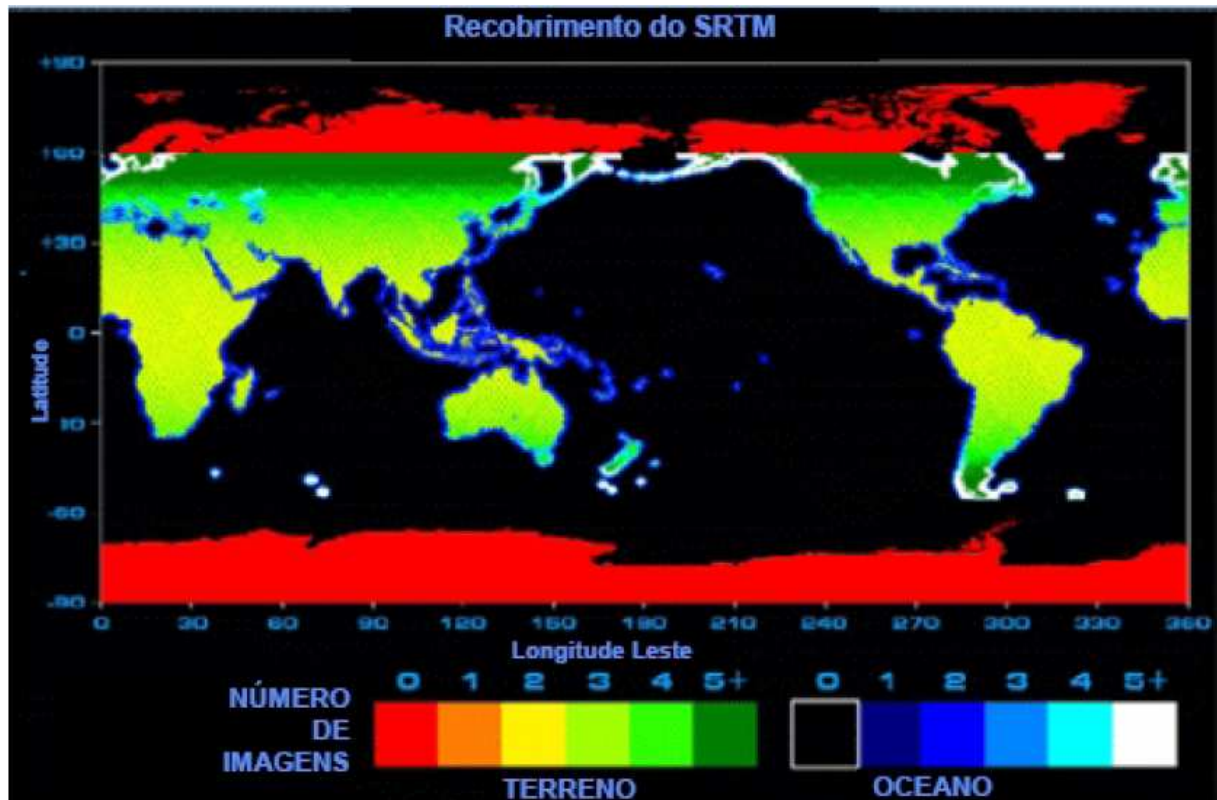


Figura 07: Número de imagens coletadas na missão SRTM
Fonte: Site da NASA

O processamento dos MDE's da missão SRTM foi realizado através da técnica de interferometria. A interferometria é baseada na análise da fase do sinal do radar recebida por duas antenas localizadas em diferentes posições do espaço (LILLESAND *et al*, 2004). A figura 08 representa o retorno dos sinais de radar de um único ponto P da superfície terrestre nas antenas A1 e A2 respectivamente. A diferença entre r_1 , r_2 resulta na diferença de fase entre os sinais que varia de 0 a 2π radianos. Se a geometria da base interferométrica B é conhecida com alto grau de acurácia, esta diferença de fase pode ser utilizada para o cálculo

da elevação do terreno no ponto P.

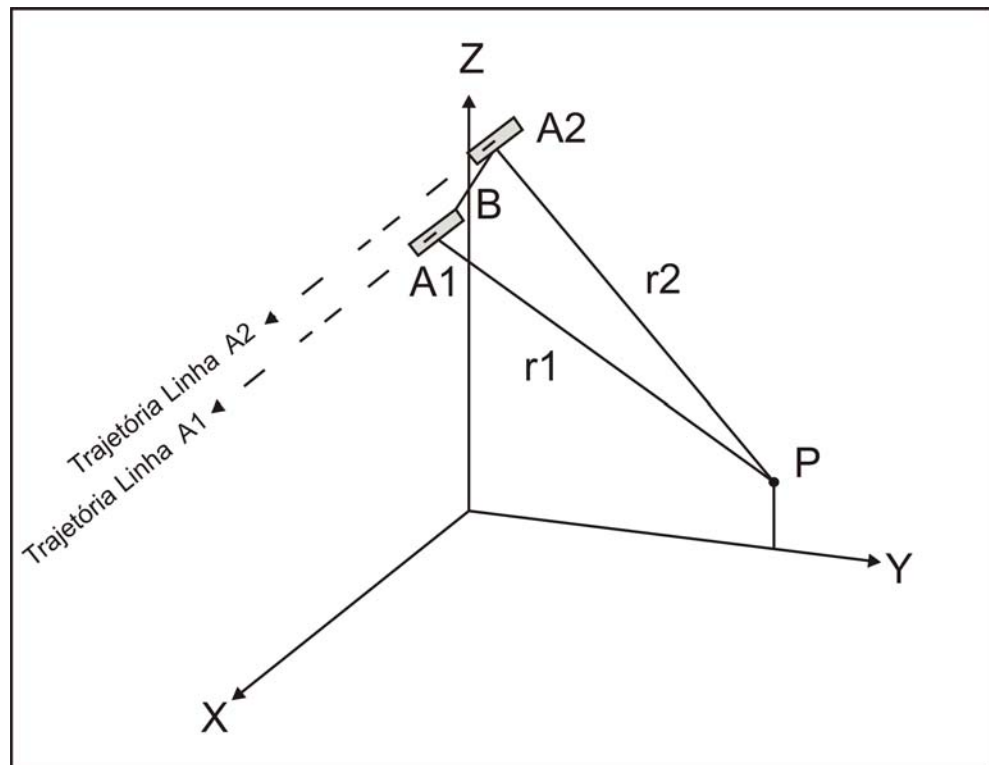


Figura 08: Geometria do radar interferométrico
Fonte: Adaptado de Lillesand, 2004.

A coleta de dados da missão SRTM pela nave *Endeavour* utilizou um mastro de 60 metros de comprimento contendo antenas de radar em suas extremidades, sendo a antena principal emitindo e recebendo sinal e a antena auxiliar somente recebendo sinal (Figura 09). As antenas captaram imagens nas bandas X ($\lambda = 3,1\text{cm}$) e C ($\lambda = 5,8\text{cm}$).

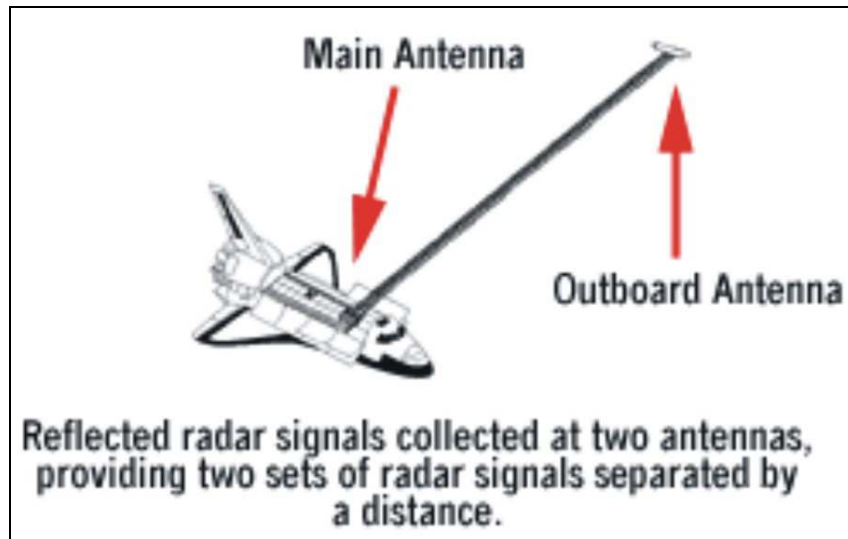


Figura 09: Nave espacial *Endeavour*
 Fonte: site da NASA

Os modelos da banda C são disponibilizados para a América do Sul em formato de uma malha regular de espaçamento de 3 arcos de segundo, que proporciona uma resolução espacial de aproximadamente 90 metros.

2.6 Satélite CBERS

O programa CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite* - Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres), nasceu da parceria do governo Brasileiro com o Chinês em um acordo assinado em 1988. O INPE e a CAST (*Chinese Academy of Space Technology* - Academia Chinesa de Tecnologia Espacial), instituições brasileira e chinesa respectivamente, desenvolveram em conjunto três satélites: CBERS 1, CBERS 2 e o recentemente lançado o CBERS 2B. Sendo os dois primeiros com configurações idênticas e projetadas para atender às necessidades dos dois países, proporcionando um meio de aquisição próprio de imagens de satélite, para por um fim à dependência de outras nações no fornecimento de imagens orbitais.

O segundo satélite do programa, o CBERS 2, alvo deste estudo, foi lançado em 21 de outubro de 2003, no Centro de Lançamento de Taiyuan, na China. O CBERS 2 possui órbita

hélio-síncrona a uma altitude de 778 km, perfazendo aproximadamente 14 revoluções por dia e adquirindo imagens através de sensores de varredura linear (*pushbroom scanner*). A câmera CCD possui cinco faixas espectrais (5 bandas) e fornece imagens de uma faixa de 113 quilômetros de largura a uma resolução espacial de 20 metros e resolução temporal de 26 dias. Maiores informações sobre o programa CBERS podem ser adquiridas no site do INPE.

2.7 Avaliação de produtos cartográficos

A precisão é o grau de dispersão de um grupo de valores em relação à média, sendo então uma medida de espalhamento; e a exatidão indica se os valores estão próximos ao valor real, exato (ANDRADE, 1988). Na avaliação de produtos cartográficos a média dos erros dos pontos de checagem representa a exatidão e o desvio padrão representa a precisão.

Devido à inexistência de normas brasileiras para a avaliação de produtos cartográficos em meio digital será utilizado neste trabalho o decreto 89.817 de 20 de junho de 1984 para a avaliação dos produtos cartográficos digitais gerados. Este decreto contido no site da Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR) que estabelece as instruções reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional, e neste está contido o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), para a avaliação e classificação de produtos cartográficos em meio analógico. O PEC é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos.

As cartas devem obedecer ao PEC quanto à exatidão, sendo 90% dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC planimétrico estabelecido. E 90% dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas de nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC altimétrico estabelecido. A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes

o Erro Padrão (EP). O EP, também designado no decreto como desvio padrão e erro médio quadrático, isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do PEC. As cartas, segundo sua exatidão, são classificadas nas Classes A, B e C, segundo os seguintes critérios:

Tabela 02: Classificação das Cartas segundo o PEC

	Classe A	Classe B	Classe C
PEC Planimétrico	0,5mm x EC	0,8mm x EC	1,0mm x EC
Erro Padrão	0,3mm x EC	0,5mm x EC	0,6mm x EC
PEC Altimétrico	1/2 equidistância das curvas	3/5 equidistância das curvas	3/4 equidistância das curvas
Erro Padrão	1/3 equidistância das curvas	2/5 equidistância das curvas	1/2 equidistância das curvas

A acurácia da ortoimagem está relacionada com uma adequada escolha dos dados a serem utilizados para a sua confecção. A escala das imagens, os pontos de controle e o MDE são a base para determinar a confiabilidade da ortoimagem final. A acurácia de distâncias e áreas é baseada no tamanho do pixel. A acurácia da precisão relativa de feições está ligada à precisão do MDE utilizado no processo (FALKNER e MORGAN, 2002).

Os erros das ortoimagens podem estar relacionados à imagem digital, devido à má amostragem dos níveis de cinza; e relacionados ao MDE, devido à incompatibilidade do MDE com a realidade do terreno ou ao uso de MDE que desconsideram acidentes artificiais. Para garantir a precisão da ortoimagem, o espaçamento de grade do MDE não pode ser maior que a resolução da ortoimagem digital.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho utilizou-se dos seguintes dados:

- Programa Registro
- 4 cartas topográficas na escala 1:50.000
- 1 cena CCD CBERS 2
- MDE do SRTM

A seguir os dados utilizados neste trabalho serão descritos e detalhados quanto a sua fonte e processamento para o emprego da metodologia abordada na produção das ortoimagens.

3.1 Programa Registro

O programa Registro foi desenvolvido em linguagem Delphi 4.0 por alunos da pós-graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Neste aplicativo é possível a correção geométrica de imagens orbitais através de diferentes modelos matemáticos, como a transformação Afim no Plano e a ortorretificação de imagens orbitais através da transformação DLT e do Modelo APM (*Affine Projection Model*). Para a correção geométrica é necessária a utilização de pontos de controle, e para o processo de ortorretificação é necessário além de um número mínimo de pontos de controle, um MDE da área.

O ajustamento é realizado através do método Paramétrico, em que as medidas não se processam sobre as grandezas procuradas, estas se vinculam matematicamente a outras que,

por sua vez, podem ser medidas diretamente (GEMAEL, 1994). Sendo o modelo matemático (10) e o modelo linearizado (11) do método paramétrico:

$$L_a = F(x_a) \quad (10)$$

$$V = Ax + L \quad (11)$$

Onde L_a é o vetor das observações ajustadas, X_a é o vetor dos parâmetros ajustados, F é uma função de relação entre L_a e X_a . Recorrendo-se ao Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) para a obtenção de solução única, resulta o sistema de equações normais (12):

$$A^T PAX + A^T PL = 0 \quad (12)$$

A avaliação da qualidade do ajustamento pode ser realizada através de um conjunto de pontos não utilizados para a correção geométrica (nomeados de pontos de verificação ou de checagem).

Foram criados novos aplicativos no programa Registro para a leitura e conversão dos dados advindos do SRTM, bem como aplicativos para o recorte do MDE nas áreas de interesse. Na figura 10 pode-se visualizar o fluxograma de processamento do programa:

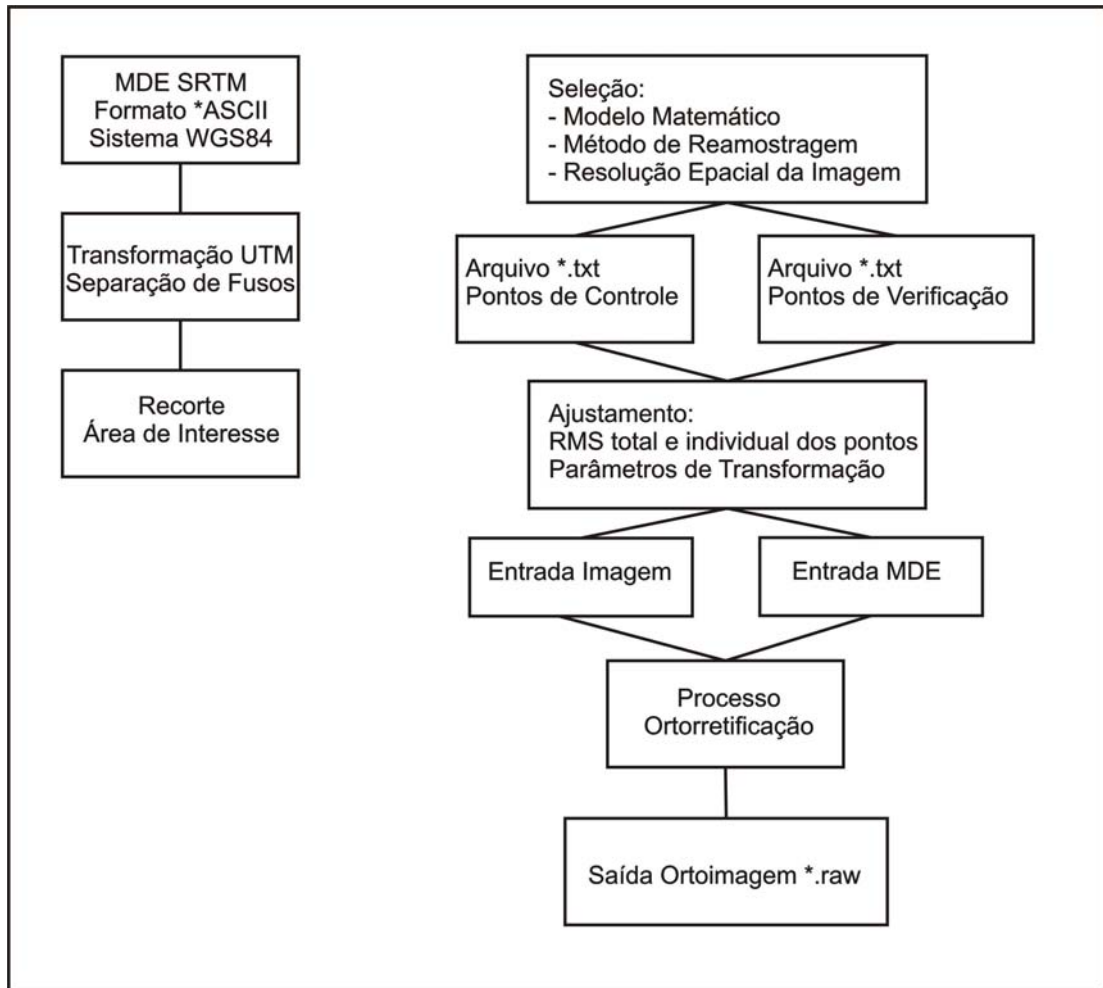


Figura 10: Fluxograma de processamento do Programa Registro

3.2 Área de Estudo

O processo de ortorretificação de imagens descrito no item 2.3 corrige a imagem de distorções relativas à aquisição da imagem e de distorções inerentes à elevação do relevo, projetando a imagem em uma perspectiva ortogonal. As distorções relativas à elevação do relevo são diretamente relacionadas com a magnitude destas elevações. A análise da significância das distorções referentes às elevações do terreno baseia-se no cálculo do deslocamento máximo devido ao relevo, representado na figura 11:

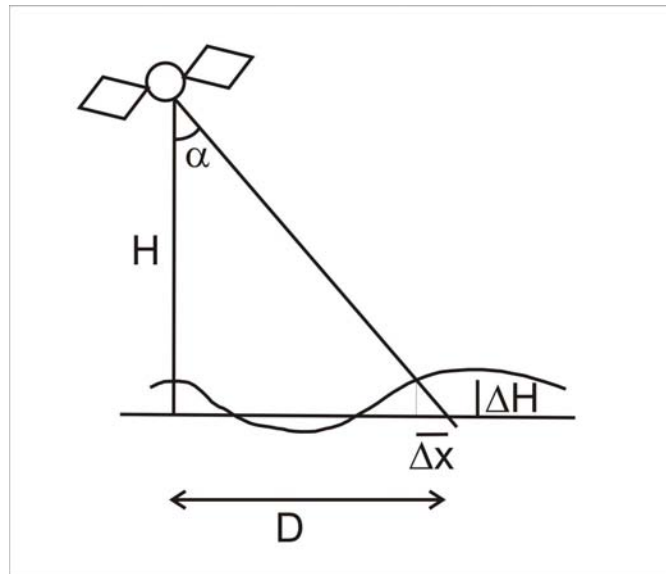


Figura 11: Deslocamento máximo devido ao relevo
 Fonte: Adaptada de Correia, *et al* 2005

Por semelhança de triângulos, encontra-se a seguinte relação:

$$\Delta h = \left(\frac{H}{D} \right) \cdot \Delta x \quad (13)$$

Sendo que Δh o deslocamento máximo devido ao relevo, Δx é o erro planimétrico máximo admissível, que para este trabalho será referenciado ao PEC A na escala 1:50.000, resultando em 25 metros. Os dados restantes estão relacionados às imagens CCD do CBERS 2:

$$H = 778 \text{ km}$$

$$D = 56,5 \text{ (113 km/2)}$$

$$\alpha = 4,15^\circ$$

O deslocamento máximo devido ao relevo calculado para a imagem CCD do CBERS2 no PEC A da escala 1:50.000 é de:

$$\Delta h = 344m$$

Ou seja, se a região de estudo apresentar diferença de nível máxima, relativa entre dois de quaisquer de seus pontos inferior a 344 metros poderá ser considerada plana, pois o erro devido ao relevo é inferior ao PEC A que é de 25 metros para a escala de 1:50.000. A região

sendo considerada plana, não existe a necessidade de ortorretificar a imagem, pois não haverá deslocamentos significativos devido aos efeitos do relevo.

A região teste escolhida para este trabalho concentra-se na Mesorregião do Centro Oriental Paranaense e possui relevo variando de plano a acidentado, abrangendo em sua área o Cânion do Guartelá (Figura 12). A escolha desta área deveu-se principalmente à natureza do relevo, que possui variação de altitude de até 700 metros e como demonstrado anteriormente é uma área propícia para testes de ortorretificação de imagens CCD do CBERS 2.

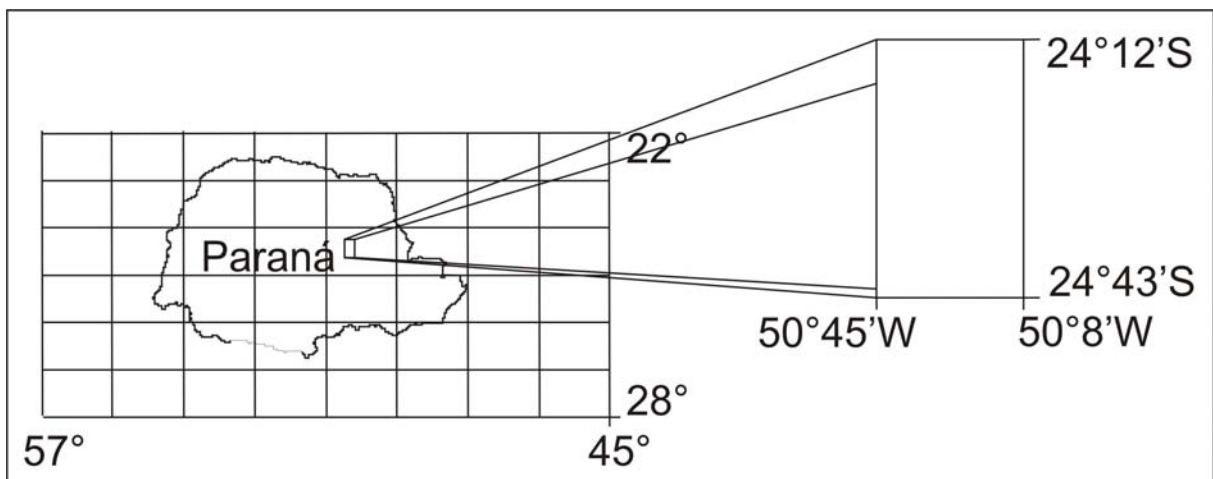


Figura 12: Mapa de localização da área teste

A imagem CCD do CBERS 2 da região teste foi adquirida gratuitamente no site do INPE, no Sistema Geodésico SAD-69, sendo utilizado como critério para seleção da cena a ausência de nuvens na região de interesse, bem como a atualidade da imagem. A imagem possui nível 2 de correção, ou seja, é uma imagem com correções radiométrica e geométrica, os parâmetros inerentes à imagem constam na Tabela 03:

Tabela 03: Parâmetros da Imagem CCD do CBERS 2

Órbita - Ponto	158 - 127
Data	03/09/2006
Ângulo de Inclinação com o Nadir	43.7796
Cobertura de Nuvens por quadrante	$Q_1 = 0, \quad Q_2 = 0, \quad Q_3 = 0, \quad Q_4 = 0$

Foram disponibilizadas para este trabalho quatro cartas topográficas na escala 1:50.000, com curvas de nível de equidistância de 20 metros, no Sistema Geodésico SAD-69 e Projeção UTM. As cartas topográficas em formato digital foram realizadas através de um convênio entre o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e a Companhia Paranaense de Energia (COPEL). A cobertura aérea foi executada pela Engefoto em 1997 e a reambulação, restituição, editoração e impressão foram executadas pelo IBGE em 2001. A qualidade das cartas topográficas, bem como a atualidade de suas informações possibilitou uma correspondência entre as feições visualizadas na cena e nas cartas topográficas.

A área teste deste trabalho foi delimitada pela área das cartas topográficas abrangendo o quadrante inferior direito da cena CCD CBERS 2. A composição colorida 4(R)3(G)2(B) da imagem CCD CBERS 2 foi recortada conforme este limite geográfico no software Envi 4.0 (figura 13), e o seu formato convertido para o formato *.raw, para a posterior leitura no programa Registro.

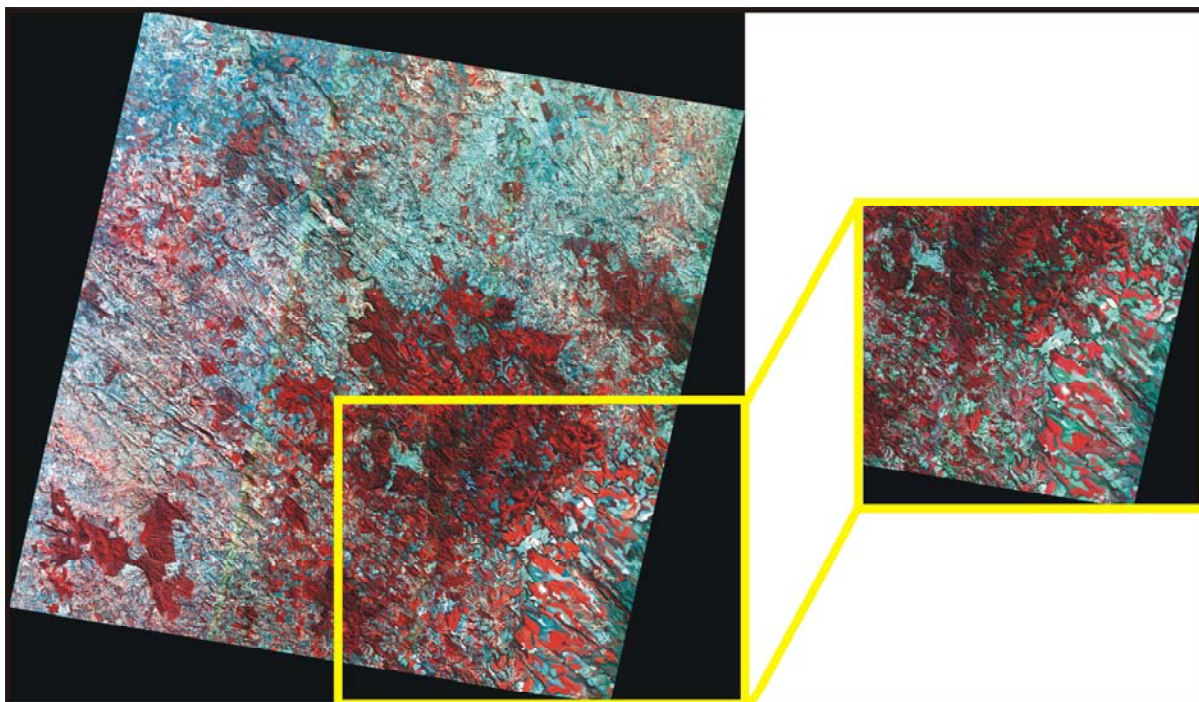


Figura 13: Cena CCD CBERS 2 composição colorida 4-3-2 e recorte abrangendo um quadrante da cena

3.2.1 Pontos de Controle e Checagem

No recorte da imagem e utilizando as cartas topográficas como referência, coletou-se as coordenadas de imagem com as respectivas coordenadas de terreno de 50 pontos. O critério de escolha destes pontos foi a utilização de feições artificiais (cruzamento de estradas e pontes) que fossem facilmente identificáveis nas cartas topográficas e no recorte da imagem, e que estivessem homogeneamente distribuídos na cena.

Os pontos foram divididos em pontos de controle (que participam do ajustamento do modelo matemático de correção geométrica) e pontos de verificação (pontos que não participam do ajustamento e servem para a checagem da qualidade da correção geométrica). Selecionaram-se os 20 pontos que possuíam melhor qualidade, ou seja, pontos em que se acreditava que as feições estavam mais bem relacionadas na imagem e na carta, e que possuísem uma distribuição uniforme na imagem para servir como verificação (Figura 15). O restante dos pontos serviram como pontos de controle (Figura 14).

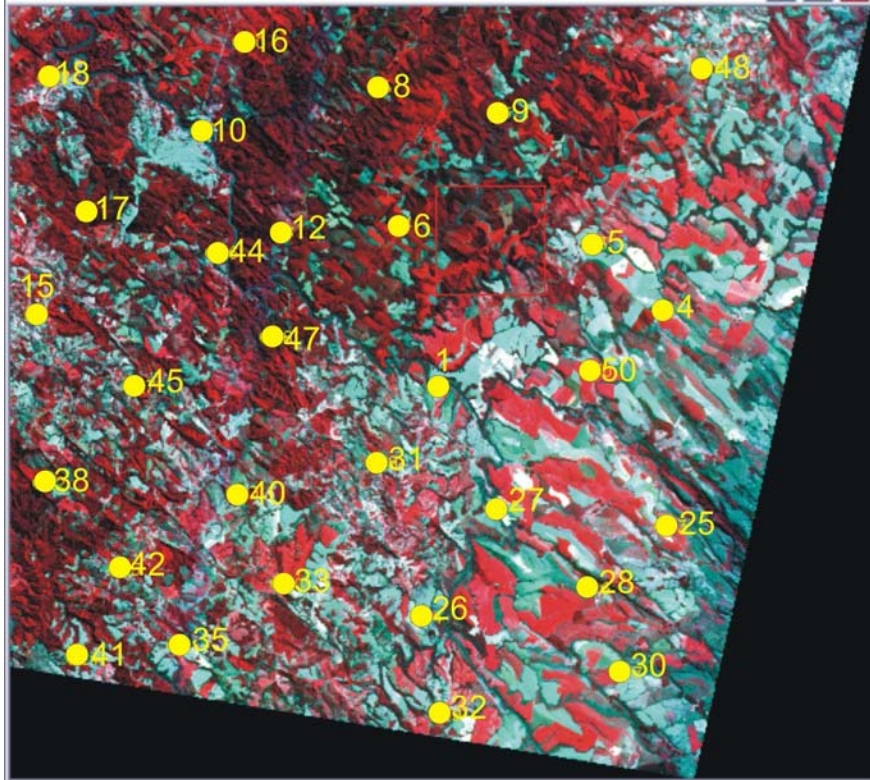


Figura 14: Ilustração da localização dos pontos de controle

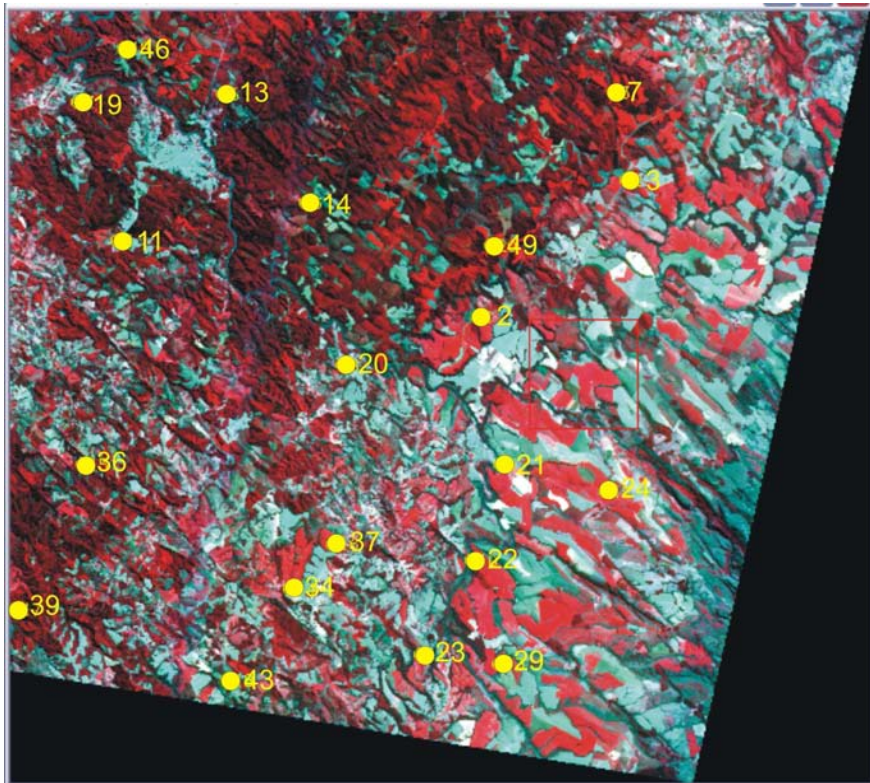


Figura 15: Ilustração da localização dos pontos de checagem

Para ajustar a transformação DLT no programa Registro, foi montado um arquivo de texto contendo as coordenadas de imagem e coordenadas de terreno dos pontos de controle selecionados. Nesta etapa do processo foi informado o tamanho do pixel da imagem, bem como o método de reamostragem escolhido, que neste caso foi a Interpolação Bilinear.

3.2.2 Modelo Digital de Elevação - Cartas

As curvas de nível e os pontos cotados das bases cartográficas digitais são informações altimétricas que serviram para a produção de um MDE derivado das cartas topográficas. Utilizando o software MicroStation v. 8 uniu-se as curvas de nível e os pontos cotados em um arquivo. O arquivo do MDE deve ter espaçamento de grade igual ou menor que o pixel da imagem a ser ortorretificada, sendo o arquivo interpolado no software Surfer 7.0 através do método de krigagem para a geração de um MDE em uma grade regular de 20 metros compatível com a imagem CCD CBERS2 conforme a Figura 16.

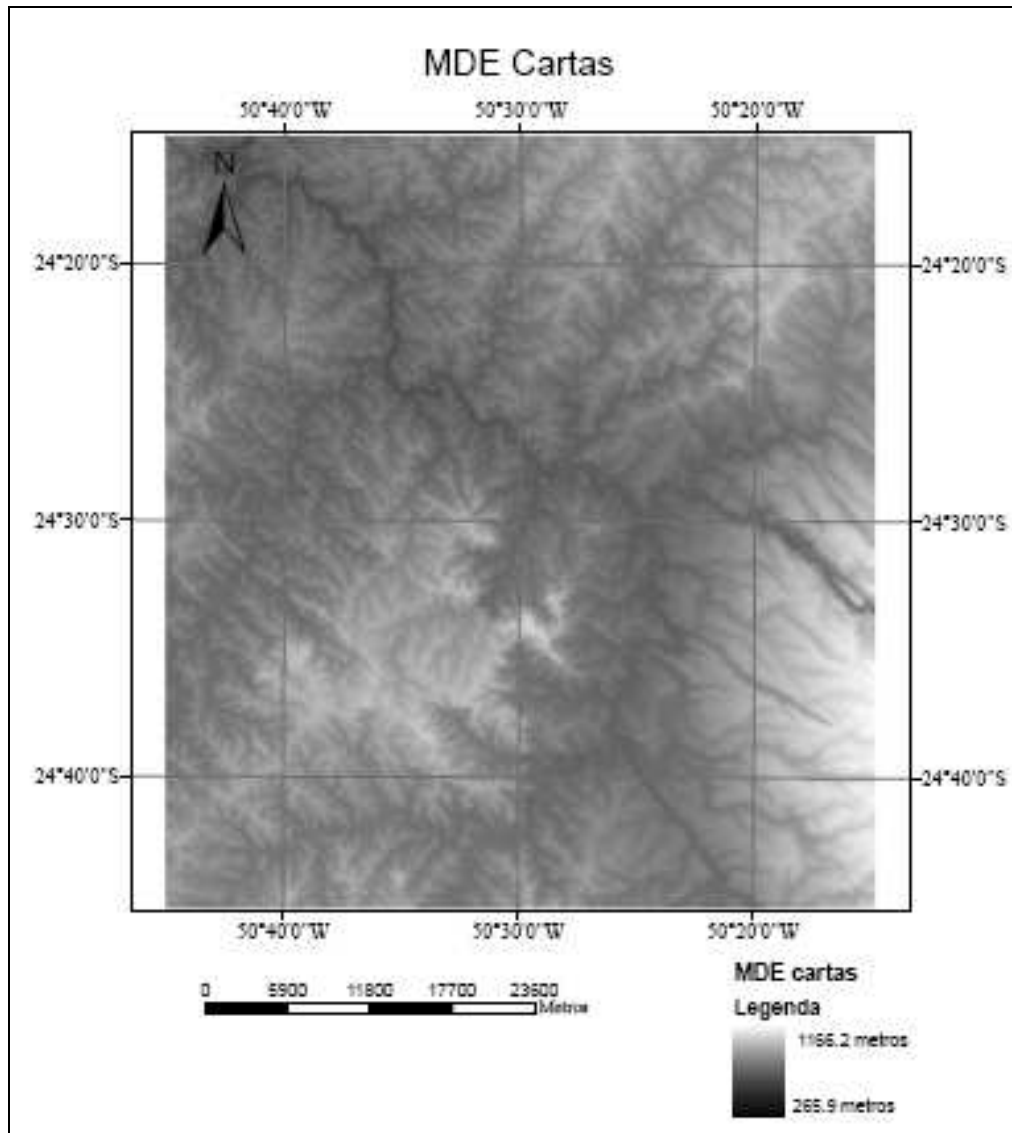


Figura 16: Modelo Digital de Elevação gerado a partir das curvas de nível e pontos cotados das cartas topográficas

3.2.3 Modelo Digital de Elevação - SRTM

O arquivo do MDE do SRTM foi adquirido no formato ASCII no site do CGIAR-CSI, utilizou-se desta fonte e não do original gerado pela NASA devido à facilidade de leitura deste formato pelo programa Registro. Este arquivo possui em seu nome as coordenadas geográficas no Sistema de Referência WGS 84 do canto inferior esquerdo da imagem e abrange uma região de 5° x 5°. O cabeçalho do arquivo é formado por informações como número de linhas e colunas do arquivo, coordenada do canto inferior esquerdo e tamanho da

célula da grade, que é 0.00083 radianos, aproximadamente 90 metros. A seguir o arquivo contém os valores de Z disponibilizados por linhas iniciando no canto superior esquerdo da área. As áreas com vazios de informações geradas pelo SRTM foram interpoladas com os valores vizinhos.

O MDE foi pré-processado no programa Registro através das adaptações realizadas especificamente para este tipo de MDE. Inicialmente foi feita a sua leitura, a transformação do seu cabeçalho para coordenadas UTM referidas ao SAD-69, a separação do arquivo nos diferentes fusos UTM e a delimitação da área de interesse conforme o fluxograma da figura 10.

Como mencionado anteriormente, o arquivo do MDE deve ter espaçamento de grade igual ou menor que o pixel da imagem a ser ortorretificada, como o SRTM possui resolução espacial de aproximadamente 90 metros, foi feita uma reamostragem para que a grade fosse compatível com a imagem CCD do CBERS 2. Com o MDE da área de interesse, foi feita uma interpolação pelo método de Krigagem no software Surfer 7.0 em uma grade regular de 20 metros conforme a figura 17.

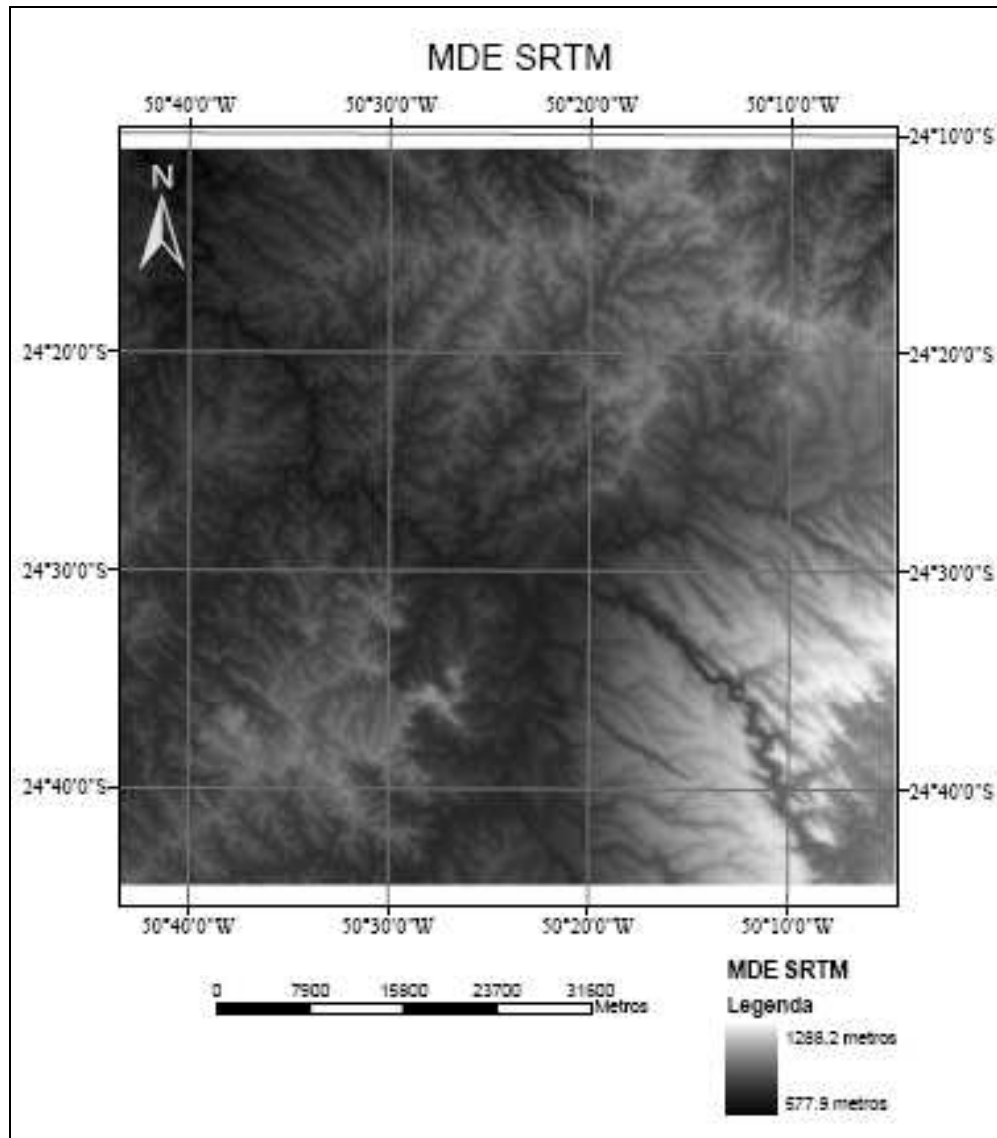


Figura 17: Modelo Digital de Elevação gerado a partir do MDE do SRTM

3.2.4 Comparação entre MDE's

O MDE interpolado através das cartas topográficas e o outro através do MDE do SRTM foram produzidos pelo mesmo método de interpolação (Krigagem) e com grades de mesmo tamanho (20 metros) sendo ambos referenciados ao mesmo sistema geodésico (SAD-69). Devido a estas particularidades foi possível a comparação entre os produtos. Esta

comparação foi realizada através de um comando de subtração existente no software Surfer 7.0, o MDE advindo da missão SRTM foi subtraído do MDE Cartas conforme a Figura 18:

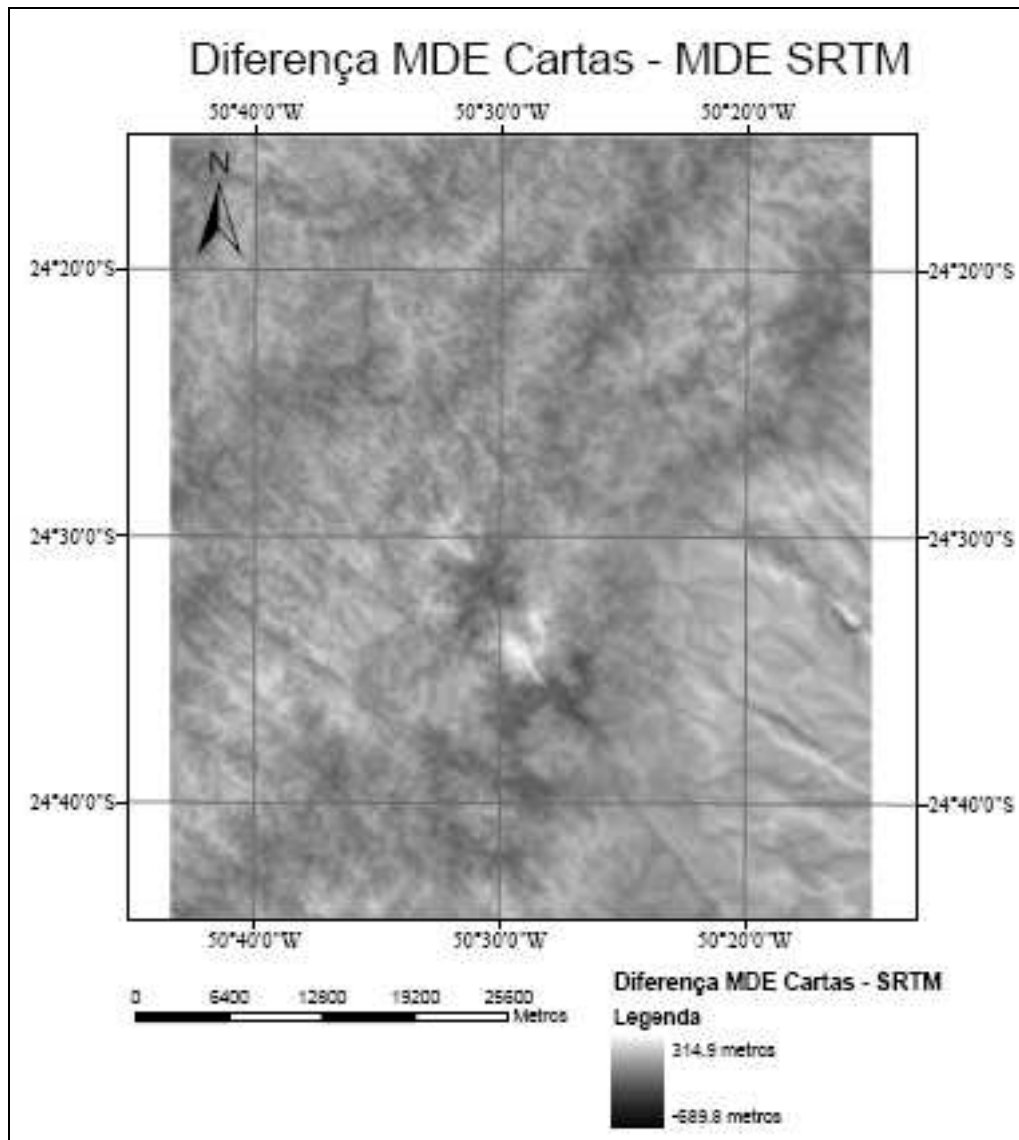


Figura 18: Subtração: MDE Cartas - MDE SRTM

Através desta comparação pode-se verificar que nas áreas de relevo acidentado, como no cânion do Guartelá (canto inferior direito) o MDE Cartas possui valores de altitude acima do MDE SRTM.

3.3 Geração de Ortoimagens através do Programa Registro

Conforme o fluxograma da Figura 10 para a geração de ortimagens através do programa Registro deve-se ajustar o modelo matemático através de pontos de controle e verificar a qualidade do ajustamento através de pontos que não participam do ajustamento. Após o ajustamento do modelo matemático entra-se com o MDE que será utilizado como informação altimétrica, a imagem a ser ortoretificada e seu número de bandas e dimensão, neste caso o recorte da cena CCD CBERS descrito no item 3.2. A saída é a ortomagem em formato *.raw com informações de coordenadas do canto superior esquerdo da imagem e tamanho do pixel da imagem de saída.

A metodologia proposta neste trabalho foi comparar a ortomagem gerada através do MDE do SRTM descrito no item 3.2.3 com a ortomagem gerada através do MDE interpolado das Cartas Topográficas descrito no item 3.2.2.

3.4 Geração de Imagem Corrigida por Polinômio de 2°

Conforme abordado anteriormente a necessidade de ortoretificação de uma imagem é gerada pelas distorções inerentes à elevação do relevo. Imagens de regiões planas não necessitam da correção devido ao relevo, e podem ser apenas retificadas conforme descrito no item 2.3 por modelos polinomiais, utilizando somente pontos de controle para a correção geométrica da imagem. Com a finalidade de verificar a necessidade de ortoretificação propõe-se a correção do recorte da cena CCD-CBERS 2 através de um polinômio de 2° e a comparação do resultado com a ortoretificação através da transformação DLT do recorte da cena CCD-CBERS 2 da área teste (região considerada de relevo não plano conforme o cálculo do item 3.2).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão relatados os resultados obtidos com a metodologia proposta no capítulo 3 para a área teste deste estudo. Este capítulo objetiva também a comparação dos resultados obtidos pelos diferentes modelos matemáticos de correção geométrica e o uso dos diferentes MDE's descritos no capítulo anterior.

4.1 Ajustamento da Transformação DLT

O ajuste de uma transformação geométrica fornece o erro total cometido na transformação, que é usualmente representado pelo Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square Error* – RMS), determinado pelo somatório dos erros de todos os pontos de controle dado pela expressão matemática 14:

$$RMS = \frac{\sum \sqrt{(\Delta E)^2 - (\Delta N)^2}}{n} \quad (14)$$

Sendo ΔE e ΔN , as diferenças entre as coordenadas dos pontos de controle e as suas respectivas coordenadas após a transformação, e n o número de pontos de controle utilizados na transformação.

O ajuste da transformação DLT através do programa Registro fornece os valores dos 11 parâmetros de transformação da DLT, o RMS total do ajustamento e os erros individuais para cada ponto. Através dos resíduos individuais puderam-se analisar os pontos com erros grosseiros (erros superior a 1 pixel) e realocá-los na imagem ou na carta, ou mesmo tirá-los do ajustamento, até que o valor do RMS total fosse próximo a 1 pixel. Realizado este

procedimento, chegou-se ao valor de RMS total para o ajustamento dos pontos de controle através da transformação DLT de 0,689 pixel e os resíduos individuais conforme a figura 19:

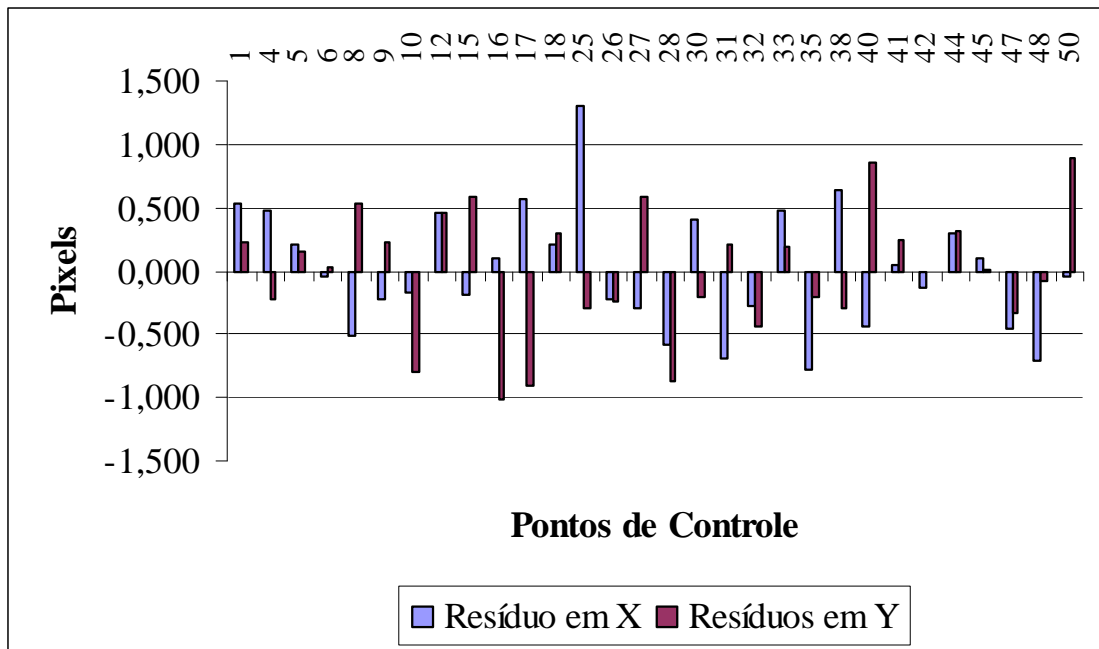


Figura 19: Resíduos em X e Y dos pontos de controle no ajustamento da transformação DLT

Analisando a Figura 19 verifica-se que os resíduos dos pontos de controle são em sua maioria menores que um pixel e possuem uma distribuição aleatória em X e Y, demonstrando que a média final dos resíduos é próxima de zero.

Para a análise completa do ajustamento utilizaram-se os 20 pontos que não participaram do ajustamento para servirem como verificação do ajustamento. Para detectar a existência de erros grosseiros nos pontos de verificação, primeiramente, ajustou-se a transformação DLT com os mesmos, analisando o RMS total e individual dos pontos no ajustamento. Não detectando maiores problemas, utilizaram-se estes pontos para verificação do ajustamento com os pontos de controle, gerando um RMS de 0,908.

Realizada esta etapa obtiveram-se os 11 parâmetros da transformação DLT descritos no item 2.4.2.1 conforme a tabela 04:

Tabela 04: Os 11 Parâmetros de Transformação DLT

Parâmetros da Transformação DLT	
L ₁	0,0454913705
L ₂	0,0000248581
L ₃	-0,0010949386
L ₄	-24080,6471445529
L ₅	0,0001370656
L ₆	-0,0457839795
L ₇	-0,0000783238
L ₈	335066,4407364550
L ₉	-0,0000000133
L ₁₀	-0,0000000107
L ₁₁	-0,0000003387

Conforme a revisão bibliográfica sabe-se que através dos 11 parâmetros da transformação DLT pode-se calcular os parâmetros de orientação da imagem. Segundo KWON, (1998) a desvantagem do uso da DLT é que os parâmetros físicos obtidos não são mutuamente independentes. Ou seja, como a DLT é uma simplificação da equação de colinearidade os parâmetros físicos são aglutinados nos parâmetros de transformação, deteriorando o cálculo de seus valores.

As imagens CBERS são adquiridas na forma de varredura linear, e como descrito na revisão bibliográfica, possuem seis parâmetros de orientação exterior para cada linha (X_c , Y_c e Z_c , κ , φ , ω). Através da DLT o cálculo destes parâmetros seria aproximado para o centro do recorte da imagem, e não de cada linha de imageamento, não tendo sentido físico recuperá-los.

4.2 Geração das Ortoimagens e Imagem Corrigida

Através dos MDE's descrito anteriormente foram geradas duas ortimagens, e utilizando os mesmos pontos de controle foi realizada a correção geométrica deste recorte através de um polinômio de 2°.

4.2.1 Ortoimagem gerada a partir do MDE-Cartas

Utilizando o MDE gerado a partir das informações altimétricas das Cartas, de acordo como a descrição do item 3.2.2, e seguindo a ordem descrita no fluxograma da figura 10, gerou-se uma ortorectificação através do programa Registro (Figura 20).

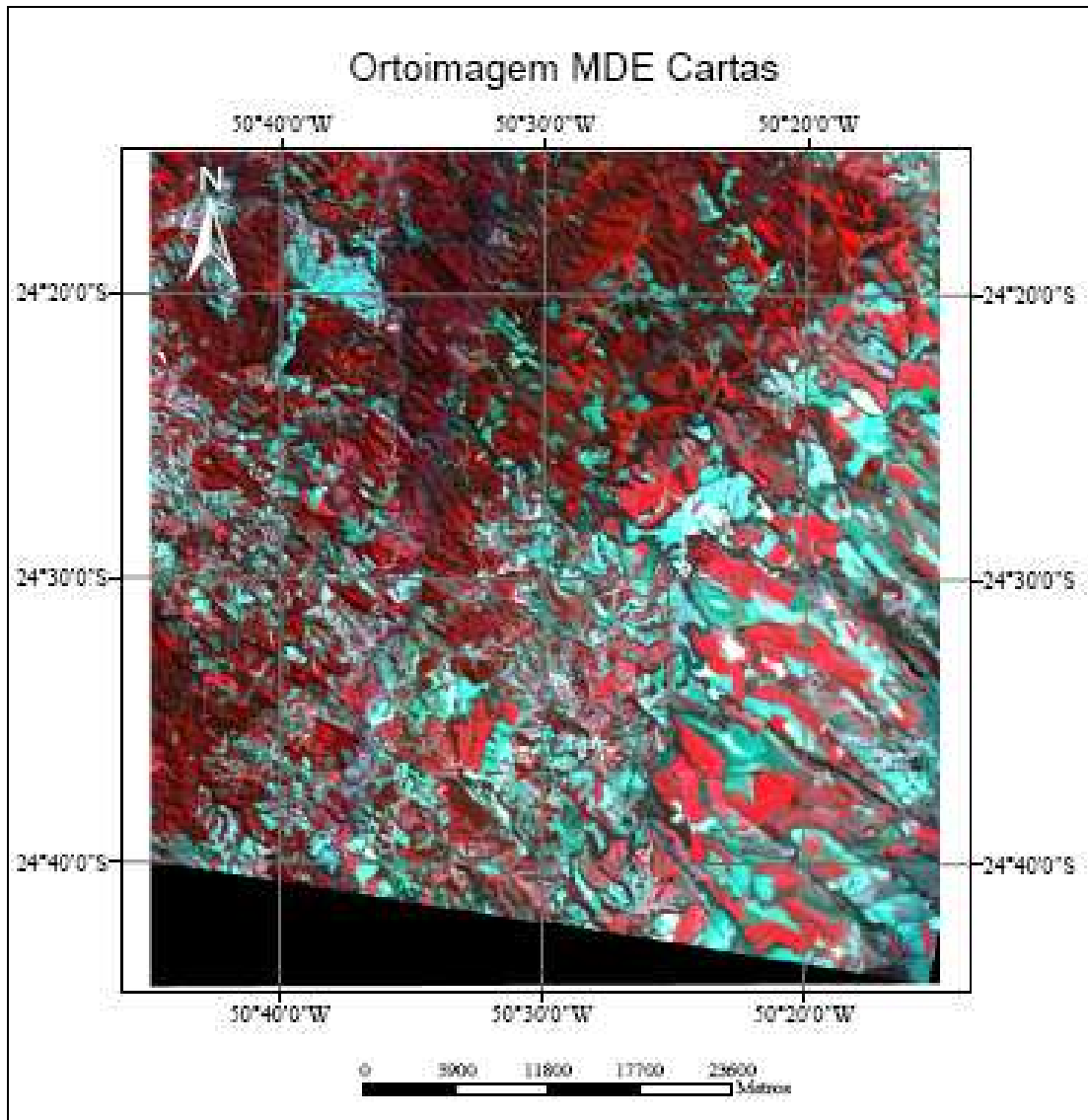


Figura 20: Ortoimagem utilizando o MDE das Cartas

4.2.2 Ortoimagem gerada a partir do MDE-SRTM

Utilizando o MDE gerado a partir de dados advindos do SRTM, de acordo como a descrição do item 3.2.3, e seguindo a ordem descrita no fluxograma da figura 10, gerou-se uma ortorectificação através do programa Registro (Figura 21).

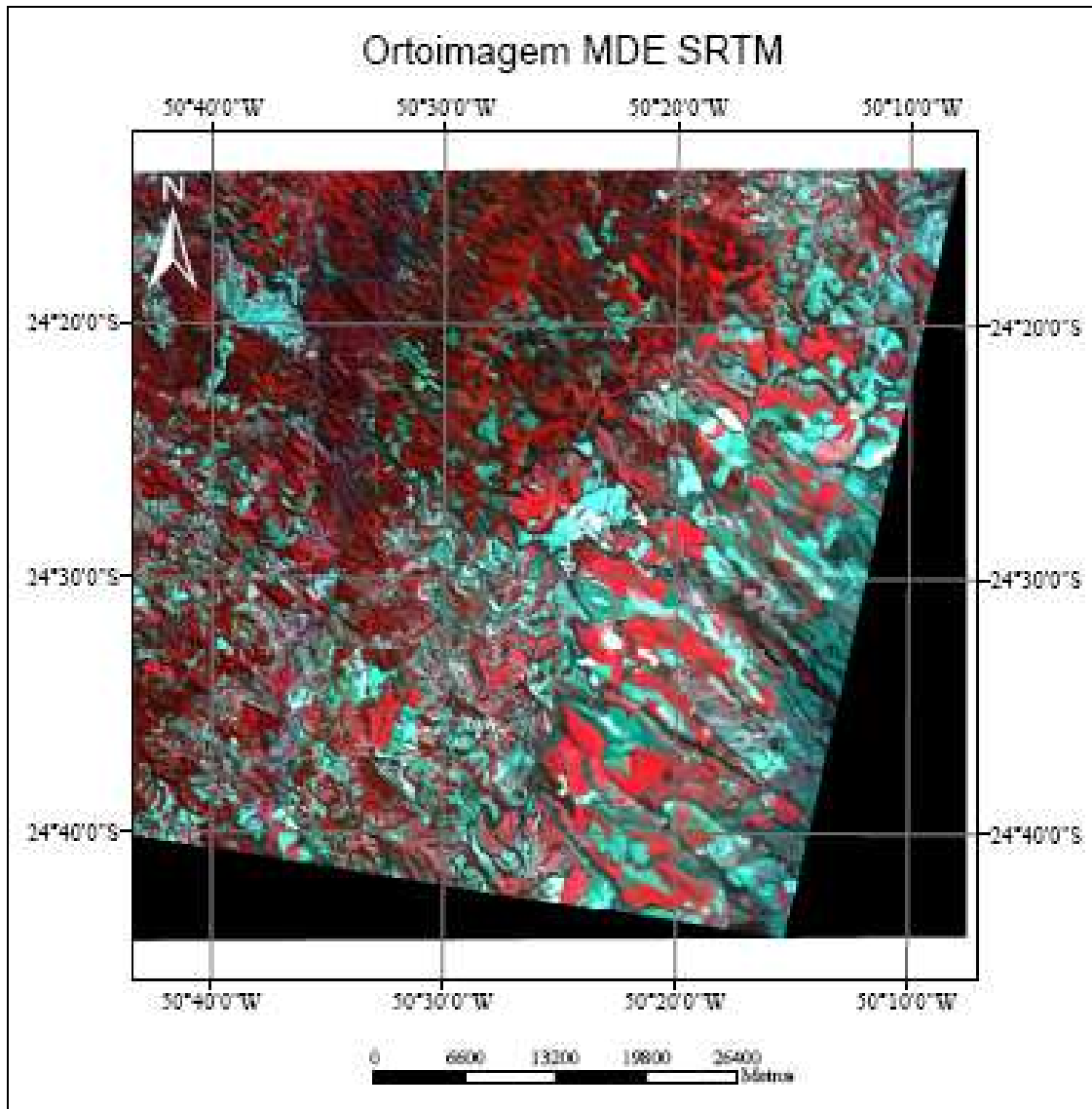


Figura 21: Ortoimagem utilizando o MDE do SRTM

4.2.3 Imagem Corrigida pelo Polinômio de 2°

Utilizando o software ENVI 4.0 e os pontos de controle descritos no item 3.2.1 corrigiu-se o recorte da cena CCD-CBERS 2 através de um polinômio, obtendo-se um RMS total de 0,616 pixels (Figura 22).

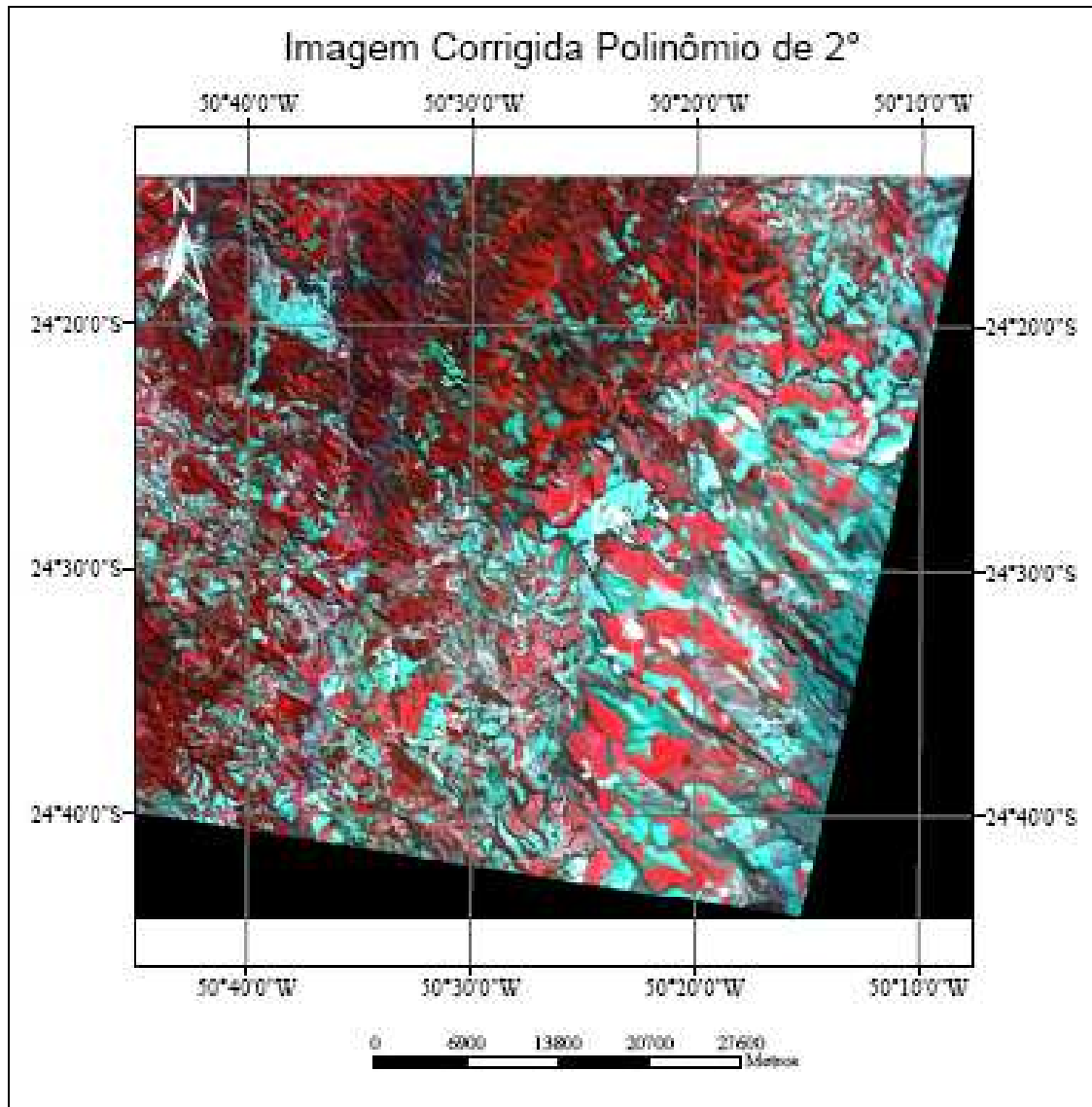


Figura 22: Imagem corrigida pelo polinômio de 2°

4.3 Avaliação das Ortoimagens e Imagem Corrigida

Os pontos coletados nas cartas e no recorte da cena e que não participaram do ajustamento da transformação DLT e da correção através do Polinômio de 2° chamados neste trabalho de pontos de verificação, serviram nesta etapa para a avaliação das imagens corrigidas. As coordenadas destes pontos em projeção UTM no sistema de referência SAD-69 foram determinadas nas ortofotomontagens e na imagem corrigida e comparadas com suas respectivas coordenadas retiradas das cartas topográficas conforme a tabela 05:

Tabela 05: Diferença planimétrica em metros entre as coordenadas dos pontos de verificação nas cartas topográficas e nas Ortoimagens e Imagem Corrigida pelo Polinômio de 2°

Ponto	Orto SRTM - Carta			Orto Carta - Carta			Polinômio 2° - Carta		
	ΔE	ΔN	Erro Plan	ΔE	ΔN	Erro Plan	ΔE	ΔN	Erro Plan
2	-8,75	12,88	15,57	-10,48	1,25	10,55	-9,55	36,21	37,45
3	14,51	19,22	24,08	11,07	7,54	13,39	32,56	21,53	39,03
7	13,57	12,37	18,36	10,29	0,65	10,31	11,73	14,03	18,29
11	5,16	-4,00	6,53	7,57	4,34	8,73	7,16	18,77	20,09
13	10,05	21,96	24,15	-8,74	10,24	13,46	11,24	23,64	26,18
14	19,72	16,52	25,73	-0,02	4,84	4,84	20,27	19,00	27,78
19	-10,14	15,55	18,56	-7,26	3,83	8,21	-7,82	17,29	18,98
20	6,99	9,65	11,92	6,83	-1,95	7,10	27,25	13,34	30,34
21	-18,90	0,82	18,91	-20,89	9,26	22,85	-19,87	5,23	20,54
22	14,73	24,43	28,53	13,07	12,91	18,38	13,98	29,55	32,69
23	0,19	11,74	11,74	-0,88	0,26	0,92	-40,16	17,55	43,83
24	11,42	-18,53	21,77	8,23	9,93	12,90	29,64	6,09	30,26
29	-9,47	13,23	16,27	-11,44	1,75	11,57	-30,43	19,11	35,93
34	11,33	5,62	12,65	11,77	-5,89	13,16	-8,00	30,95	31,96
36	5,02	10,26	11,42	-12,16	-1,30	12,23	7,30	-5,32	9,04
37	7,21	5,57	9,11	7,85	-5,96	9,86	-12,46	-9,43	15,63
43	5,39	-4,35	6,93	6,54	4,18	7,76	-13,46	21,67	25,51
46	-15,04	11,76	19,09	7,31	0,02	7,31	-13,08	13,10	18,51
49	5,65	13,68	14,80	3,78	2,03	4,29	-15,24	36,48	39,54
Média	3,61	9,39	16,64	1,18	3,05	10,41	-0,47	17,30	27,45
Desvio			6,36			4,99			9,45
Variância			40,41			24,94			89,24

Para uma avaliação visual dos erros planimétricos dos pontos de verificação em cada imagem corrigida e da sua distribuição espacial nas imagens produziu-se as figuras 23, 24 e 25. Estas figuras possuem os pontos de verificação distribuídos como na imagem, em cada ponto está representado o vetor do erro planimétrico e um círculo de raio de 20 metros representando a magnitude de 1 pixel. Para a melhor visualização os valores dos raios dos círculos e os vetores de erros foram multiplicados por 100:

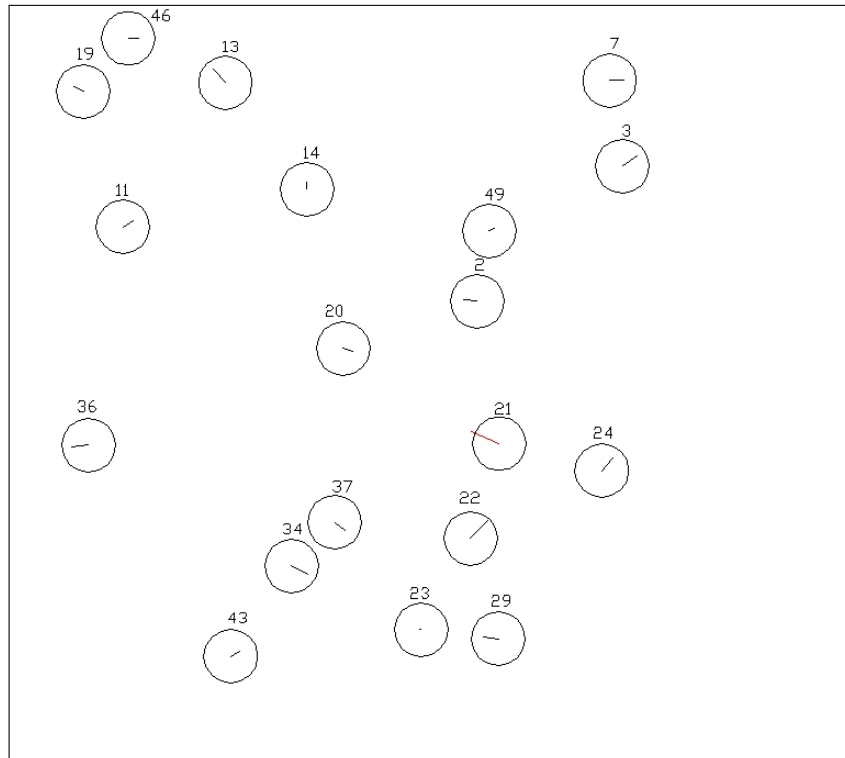


Figura 23: Erros Planimétricos dos pontos de verificação na ortomagem gerada a partir do MDE das Cartas

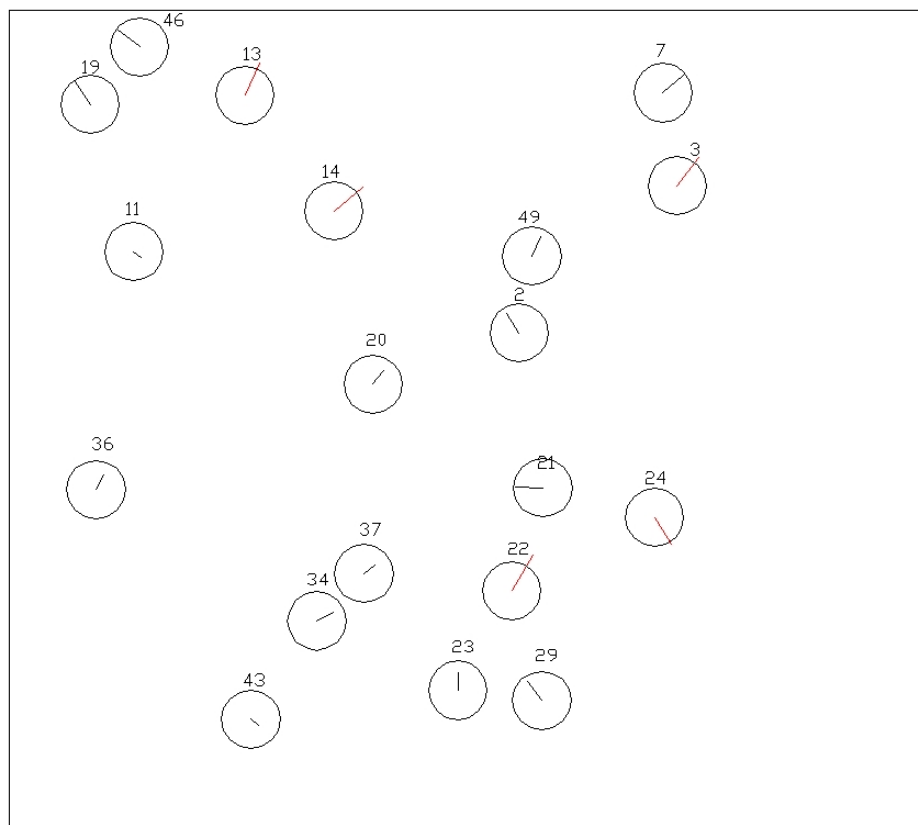


Figura 24: Erros Planimétricos dos pontos de verificação na ortomagem gerada a partir do MDE do SRTM

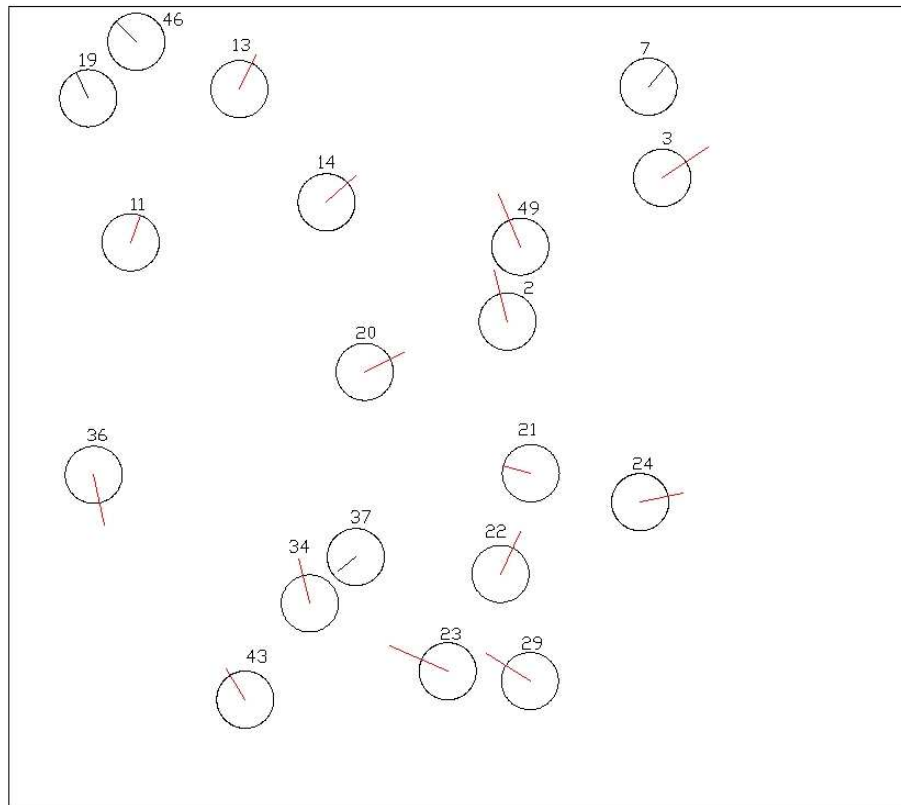


Figura 25: Erros Planimétricos dos pontos de verificação na imagem corrigida pelo polinômio de 2°

A análise visual destas figuras demonstra que os erros planimétricos em ambas as correções geométricas foram aleatórios, pois seus vetores não possuem uma direção preferencial, mostrando a inexistência de erros sistemáticos.

A figura 25 apresenta a correção da imagem por um polinômio de 2° e é caracterizada pela presença de erros planimétricos superior à magnitude de 1 pixel da imagem CCD CBERS 2 na maioria dos pontos de verificação. A ortorretificação através da transformação DLT utilizando os diferentes MDE's representada pelas figuras 23 e 24 produziram erros planimétricos na maioria dos pontos de verificação inferior a 20 metros (ou 1 pixel). A figura 23 demonstra que na ortorretificação utilizando o MDE das cartas os erros planimétricos foram todos inferiores a 1 pixel com exceção do ponto 21. A figura 24 demonstra que cinco pontos de verificação resultaram em erros planimétricos superiores a 1 pixel na ortorretificação utilizando o MDE do SRTM.

4.3.1 Análise estatística

A distribuição de probabilidade é descrita por seus parâmetros populacionais, a distribuição normal é descrita pelos valores de média (μ) e desvio padrão (σ). A estimativa dos parâmetros populacionais é feita a partir de uma amostra representativa da população (estatística inferencial), as estimativas podem ser pontuais ou através de um Intervalo de Confiança (IC). A estimativa de parâmetros populacionais através de um IC consiste em gerar um intervalo, centrado na estimativa pontual, no qual se admite que esteja o parâmetro populacional. Quanto maior a amplitude do intervalo maior a confiança (probabilidade) de estimar corretamente o verdadeiro parâmetro populacional.

Conforme a amplitude do IC existe uma probabilidade $(1-\alpha)$, que é o nível de confiança, de que os parâmetros estejam dentro do intervalo. Sendo α a probabilidade de erro, ou seja, a probabilidade do intervalo não conter o parâmetro.

$$IC = 100 \cdot (1 - \alpha)\% \quad (15)$$

Devido à inexistência de normas brasileiras para a avaliação de produtos cartográficos digitais, utilizou-se como método de avaliação e classificação das ortoimagens e da imagem corrigida através do polinômio de 2º o PEC determinado pelo decreto 89.817 e descrito no item 2.7. Como referido anteriormente, conforme o decreto 90% dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC planimétrico estabelecido. Porém como para este trabalho não foram realizados levantamentos de pontos no terreno, os pontos utilizados como “verdade” foram os 20 melhores pontos selecionados nas cartas.

Seja uma variável aleatória Normal com média e variância desconhecidas. Se uma amostra com n valores indica média X e desvio padrão S o IC é calculado a partir da distribuição de Student:

$$\mu = X + (t_{\alpha}) \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{n}} \right) \quad (16)$$

Para a análise da acurácia dos produtos gerados aplicou-se o teste estatístico da distribuição de Student. Através da expressão 16 e utilizando-se das médias amostrais e desvios padrão amostrais da tabela 06, com 19 pontos de verificação totalizando em 18 graus de liberdade determinou-se a média populacional esperada para cada conjunto de medidas (cada imagem corrigida) em um intervalo de confiança de 90% (conforme o PEC). O t_{cal} foi calculado a partir da expressão 17 e comparado com t_{α} :

$$t_{cal} = \frac{(X - \mu_o)}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad (17)$$

Tabela 06: Teste de Student

Orto SRTM	Orto Carta	Imagem Pol. 2°
$\mu_{SRTM} = 18,10$	$\mu_{CARTA} = 11,94$	$\mu_{POL} = 30,33$
$t_{\alpha} = 1,33$	$t_{\alpha} = 1,33$	$T_{\alpha} = 1,33$
$t_{calculado} = 1,00$	$t_{calculado} = 1,33$	$t_{calculado} = -1,33$

Seguindo o PEC A da escala 1:50.000, o erro planimétrico máximo admissível é de 25 metros. Fazendo-se o Teste de Hipótese com nível de 10% de significância:

$$H_0: \mu \leq 25$$

$$H_1: \mu > 25$$

$t_{\text{calculado}} < t_{\alpha, n-1}$ aceita H_0 , pode-se afirmar com 90% de confiança que a média populacional dos erros planimétricos é igual ou inferior à 25 metros.

Supondo ainda a variável aleatória Normal com média e variância desconhecidas. Seja a variância amostral S^2 calculada para uma amostra de n observações, o IC é obtido através da distribuição do Qui-Quadrado:

$$\sigma^2 = \frac{((n-1) \cdot S^2)}{(\chi^2)_{1-\alpha, n-1}} \quad (18)$$

Através da fórmula 18 e utilizando-se dos desvios padrão amostrais da tabela 07, com 19 pontos de verificação totalizando em 18 graus de liberdade determinou-se o padrão populacional esperado para cada conjunto de medidas (cada imagem corrigida) em um intervalo de confiança de 90% (conforme o PEC):

$$(\chi^2)_{\text{cal}} = \frac{((n-1) \cdot S^2)}{(\sigma_0)^2} \quad (19)$$

Tabela 07: Distribuição de Qui-quadrado

Orto SRTM	Orto Carta	Imagem Pol. 2°
$\chi^2_{1-\alpha} = 10,87$	$\chi^2_{1-\alpha} = 10,87$	$\chi^2_{1-\alpha} = 10,87$
$\chi^2_{\alpha} = 25,99$	$\chi^2_{\alpha} = 25,99$	$\chi^2_{\alpha} = 25,99$
$\sigma = 8,18$	$\sigma = 6,43$	$\Sigma = 12,16$
$\chi^2 = 10,87$	$\chi^2 = 10,87$	$\chi^2 = 10,87$

Como mencionado anteriormente para o PEC A da escala 1:50.000 o erro padrão máximo admissível é de 15 metros. Fazendo-se o Teste de Hipótese com nível de 10% de significância:

$$H_0: \sigma \leq x$$

$$H_1: \sigma > x$$

$\chi^2 < \chi^2_{\alpha}$ aceita H_0 , pode-se afirmar com 90% de confiança que o desvio padrão populacional dos erros planimétricos é igual ou inferior a 15 metros.

Partindo-se dos testes de hipóteses realizados pôde-se classificar as duas Ortoimagens geradas no PEC A para a escala 1:50.000. Este resultado demonstra que a utilização do MDE advindo do SRTM na ortorretificação de imagens CCD do CBERS 2 produz resultados similares à ortorretificação destas através de um MDE mais detalhado como o advindo de curvas de nível de cartas topográficas na escala 1:50.000. Este resultado satisfaz a hipótese de que através de um MDE disponibilizado gratuitamente na internet pode-se ortorretificar imagens CCD do CBERS 2 e obter-se resultados similares a uma ortorretificação com informações altimétricas nem sempre disponíveis para o usuário de imagens de Sensoriamento Remoto ou em alguns casos inexistentes.

Também se conclui através dos testes estatísticos realizados, que a correção geométrica deste recorte da cena através do polinômio de 2° é definida como Padrão A pelo PEC na escala 1:50.000. Mesmo possuindo média e desvio padrão amostral superior aos respectivos valores das ortoimagens a avaliação pelo PEC demonstra que a correção polinomial é similar à ortorretificação da imagem da área teste. Mas através do item 3.2 demonstrou-se que a imagem da área em questão necessita do processo de ortorretificação devido às distorções inerentes ao seu relevo acidentado. Na Figura 25 pode-se realizar uma análise visual dos erros planimétricos e detectar que os erros através da correção pelo polinômio são na sua maioria superiores ao tamanho do pixel da imagem.

A classificação pelo PEC da imagem corrigida pelo polinômio na mesma classe que uma imagem ortorretificada pode ser atribuída à ineficácia do PEC na avaliação de produtos em meio digital. O PEC como descrito anteriormente tem como finalidade a avaliação de

produtos gerados em meio analógico. Sabe-se que com a evolução da tecnologia os levantamentos cartográficos tornaram-se mais precisos e os seus produtos são levantados e produzidos em meio digital, desta forma a avaliação através do PEC pode ter se tornado obsoleta, classificando produtos de diferentes precisões na mesma classe.

Os resultados adquiridos na ortorretificação da imagem através da DLT foram considerados satisfatórios e deve-se principalmente à atualidade das cartas topográficas utilizadas como referência, o que possibilitou a correta localização de feições na imagem e na carta para servir como pontos de controle e checagem.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ao final desta dissertação, e analisando os resultados alcançados pode-se concluir que:

- O modelo matemático DLT é aplicável para a ortorretificação de imagens CCD CBERS 2 em áreas de relevo acidentado;
- As imagens particionadas não podem ser ortorretificadas por processos convencionais existentes na maioria dos softwares comerciais, concluindo-se que a DLT é uma maneira de contornar esta problemática. Este aspecto é de extrema importância tratando-se de imagens que abrangem extensas áreas como as imagens CCD do CBERS 2, possibilitando assim a delimitação de áreas de estudo e a diminuição no levantamento de pontos de controle;
- A utilização de MDE oriundos de fontes diferentes, como as utilizadas neste trabalho (MDE advindo das cartas topográficas e MDE do SRTM), afeta a qualidade do produto cartográfico obtido;
- A utilização do MDE do SRTM demonstrou-se satisfatória para a ortorretificação de imagens CCD CBERS 2 na escala 1:50.000 ou menores;
- A utilização de polinômios de 2° para a correção de cenas CCD CBERS de áreas de relevo acidentado não absorve os erros inerentes à elevação do relevo, produzindo neste trabalho erros planimétricos em sua maioria superiores a um pixel da imagem, sendo necessário o processo de ortorretificação;

Uma considerável vantagem na utilização da transformação DLT para a correção geométrica de imagens CBERS é que, diferentemente do uso de polinômios, a DLT modela os parâmetros de distorção relativos à aquisição da imagem e utilizando-se sensores de quadro estes parâmetros podem ser recuperados conforme demonstrado na revisão bibliográfica.

Os resultados adquiridos com a metodologia proposta na área teste deste trabalho impulsiona a aplicação da mesma metodologia em outras áreas de estudo, para testar o seu comportamento em regiões de diferentes características de relevo e distribuição de pontos, para a comprovação dos resultados alcançados. Recomenda-se a utilização de diferentes fontes de informação cartográfica, sendo interessante neste caso, a utilização da metodologia em área de relevo escarpado e com pontos de controle e checagem levantados *in loco*. O levantamento de pontos através do GPS (*Global Positioning System*) garantiria a localização exata do ponto na imagem bem como a precisão de suas coordenadas.

O trabalho também proporcionou o surgimento de perspectivas para a futura aplicação desta metodologia na ortorretificação de cenas do satélite CBERS 2B que foi lançado no dia 19 de setembro de 2007 e possui uma câmera pancromática de alta resolução espacial de 2,7 metros. Segundo SAVAPOL e ARMENAKIS (1998) novos sensores tornam-se operacionais e seus modelos matemáticos específicos podem não estar disponíveis imediatamente. Por esta razão, o mesmo autor afirma que o uso do modelo da DLT é necessário durante as investigações das potencialidades do novo sensor.

Na iniciativa de aprimorar os produtos disponibilizados aos usuários o INPE está trabalhando na criação de produtos de níveis 3 e 4 de correção (COSTA *et al*, 2007). O nível 3 é a imagem com correções radiométrica e geométrica. Segundo o mesmo autor este nível utiliza o mesmo modelo de correção geométrica de sistema que o nível 2, utilizando informações previamente conhecidas como os parâmetros de geometria do sensor e informações fornecidas juntamente com os dados da imagem (efemérides e atitude), mas refinada pelo uso de pontos de controle. Os pontos de controle serão obtidos automaticamente de uma base de dados ou selecionados por um operador. Na aplicação do modelo de correção será utilizado um elipsóide auxiliar, definido a partir da altitude média da região, dos parâmetros do elipsóide padrão e do datum. O refinamento do modelo se dá por uma

transformação polinomial de primeiro grau (afinidade ou projetiva).

O nível 4 de correção será a imagem com correções radiométrica e geométrica, refinada pelo uso de pontos de controle e de um MDE. Os pontos de controle e o MDE podem ser automaticamente obtidos de uma base de dados, ou selecionados por um operador. Sendo o MDE da base de dados MDE's do SRTM.

Conforme SILVA *et al* (2007), juntamente com as imagens de níveis 2, 3 e 4, o INPE disponibilizará os RPC's, num arquivo com o mesmo formato utilizado pelos operadores de satélites de alta resolução espacial (por exemplo, Ikonos e Quick-Bird). Desta forma, os usuários poderão ortorretificar as imagens.

6 REFERÊNCIAS

ABDEL-AZIZ, Y.I; KARARA, H.M. **Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry**. American Society of Photogrammetry Symposium on Close-Range Photogrammetry, Urbana, pp. 1-18, 1971.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba, UFPR, Paraná, 1998.

BEHDINIAN, B. Generating Orthoimage from Ikonos Data. **XXIII Asian Conference on Remote Sensing**. Kathmandu, Nepal 2002.

BRITO, J.; COELHO, L. **Fotogrametria Digital**. Instituto Militar de Engenharia. 1a Ed. Rio de Janeiro, Brasil: 2002.

CGIAR – CSI. **Consultative Group for International Agriculture Research - Consortium for Spatial Information** <http://srtm.csi.cgiar.org/> Acesso em junho de 2007.

CONCAR. Comissão Nacional de Cartografia: Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional, **Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984**. www.concar.ibge.gov.br Acesso em agosto de 2007.

CORREIA, J. D., CRUZ, C.B.M., MENEZES, P.M.L., MARINI, S.S., BARROS, R.R.. **Contribuição das imagens CBERS na Atualização do Mapeamento Sistemático Brasileiro na escala 1:100.000**. SBSR, Goiânia, 2005. p. 873-880

COSTA, E.R., SILVA, M.A.O, SILVA, A.J.M. **Uso de pontos de controle e Modelo Numérico de Elevação de terreno na geração de imagens CBERS: Níveis 3 e 4 de processamento** II Simpósio Brasileiro de Geomática V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. Presidente Prudente, 2007. p. 461-468

ELASHMAWY, N., ELMANADILI, Y., BARAKAT H., Comparative analysis and evaluation of various mathematical models for stereo IKONOS satellite images. **FIG Working Meek 2005 and 8° International Conference on the Global Spatial Data Infrastructure**. Cairo - Egito, 2005.

FALKNER, E., MORGAN, D. **Aerial Mapping methods and applications**. 2 ed Boca Raton Lewis, 2002.

FERNANDES, V.O., MITISHITA, E.A., BÄHR, H.P., VÖGTLE, T.. **Análise do potencial da Monorestituição digital aplicado à imagem multiespectral Daedalus ATM e aerofotométrica integrado ao laser scanning.** COBRAC, Florianópolis, 2004.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas.** Curitiba Ed.UFPR, 1994.

INPE. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais** <http://www.cbcrs.inpe.br/> Acesso em outubro de 2006 e junho de 2007.

KRAUSS, K, WALDHÄUSL, P. **Photogrammetry Fundamentals and Standard Processes.**Bonn: Dümmler, 1993. Volume 1, 391p.

KWON, Y.H. **Kwon3D motion analysis Web.** 1998 <http://kwon3d.com/> Acesso em outubro de 2006.

LILESSAND, T. M., KIEFER, R.W., CHIPMAN, J.W. **Remote Sensing and Image Interpretation.** 5^a ed. John Wiley & Sons, Nova Yorque, 2004. 763p.

MIKHAIL, E.M.; BETHEL, J.S.; McGLONE, J.C. **Introduction to Modern Photogrammetry.** John Wiley & Sons, Nova Yorque, 2001.

MITISHITA. E.A. **Monorestituição Digital de aerofotos, associada com sistema de computação gráfica C.A.D., para fins de mapeamento na área florestal.** Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – UFPR, Curitiba, 1997.

_____. E.A. et al. **3-D Monocular restitution applied to small format digital airphoto and lazer scanner data.** XX ISPRS, Istanbul, Turkey 2004.

_____. SARAIVA, C.C.S. MACHADO A.L. **Monorestituição de imagens de satélite de alta resolução IKONOS 2 (Geo), utilizando-se da transformação DLT e Modelo Digital de Terreno.** XI SBSR, Belo Horizonte, p.357-364, 2003.

NASA. **National Aeronautics and Space Administration** <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> Acesso em setembro de 2006 e fevereiro de 2007.

NOVAK, K. **Analytical Photogrammetry.** Department of Geodetic Science and Surveying. Ohio State University. Columbus, OH. 1991.

OKAMOTO, A., FRASER, C., HATTORI, S., HASEGAWA H., ONO, T., An alternative approach to the triangulation of SPOT imagery. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Volume 32 parte 4, Stuttgart, Germany, p. 457-462, 1998.

PEDRO, P. C., Avaliação de **Ortoimagens utilizando o modelo APM (Affine Projection Model) e imagens de alta resolução Ikonos e Quickbird**. Dissertação de Mestrado – UFPR, Curitiba, 2005.

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis: an Introduction**. 2^a ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Nova Yorque, 1995. 340 p.

SAVOPOL, F. ARMENAKIS, C. Modelling of the IRS-1C satellite pan stereo-imagery using the DLT approach. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Volume 32/4, Stuttgart, p. 511-514, 1998.

SCHENK, T. **Digital Photogrammetry**. The Ohio State University, Columbus Volume 1, 1999.

SCHOWENGERDT, R. A. **Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing**. Academic Press, Orlando, 1983. 249 p.

SILVA, M.A.O, COSTA, E.R., NEVES, P.E., SILVA, A.J.M. **O uso de pontos de controle no processamento de imagens CBERS SBSR**, Florianópolis, 2007. p1133-1139.

VOLOTÃO, C.F.S. **Geração de ortimagens para aplicações urbanas: desenvolvimento das equações e protótipo experimental**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – INPE, São José dos Campos, 2001.

WOLF, P.R., DEWITT, B.A. **Elements of Photogrammetry: with applications in GIS**. 3^a ed., McGraw-Hill, Nova Yorque, 2000.

YAMAKAWA, T., FRASER C.S., The affine projection model for sensor orientation:experiences with hight-resolution satellite imagery. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Volume 35 parte 1, Istambul, Turquia, 2004 p. 142-147.