

Nilcilene das Graças Medeiros

**Orientação exterior de imagens orbitais
usando modelos rigorosos com feições
retas**

Tese de Doutorado

**Presidente Prudente
2007**

Nilcilene das Graças Medeiros

**Orientação exterior de imagens orbitais usando modelos
rigorosos com feições retas**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli

Co-Orientador: Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz

**Presidente Prudente
2007**

M44o Medeiros, Nilcilene das Graças.
Orientação exterior de imagens orbitais usando modelos rigorosos com feições retas / Nilcilene das Graças Medeiros. - Presidente Prudente : [s.n], 2007
183 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia

Orientador: Antonio Maria Garcia Tommaselli

Co-Orientador: Aluir Porfírio Dal Poz

Banca: Julio Kiyoshi Hasegawa, Mauricio Galo, Jorge Pimentel Cintra, Edson Aparecido Mitishita

Inclui bibliografia

1. Cartografia. 2. Orientação de imagens. 3. *Pushbroom*. 4. Feições retas. I. Tommaselli, Antonio Maria Garcia. II. Dal Poz, Aluir Porfírio. III. Presidente Prudente - Faculdade de Ciências e Tecnologia.

CDD(18.ed.) 621.71

DEDICATÓRIA

À Deus.

À meus amados pais Sebastião e Gentili, pelo amor incondicional e o incentivo durante essa jornada. Meus irmãos Tina e Du, meus cunhados Rodolfo e Maria, e meus amados sobrinhos: Henrique, Duda, Isa e Felipe.

Ao meu tio Reis Medeiros (*in memoriam*).

Ao meu esposo William, pelo amor, companheirismo e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro destinado a essa pesquisa com a concessão de bolsa de estudo.

Ao professor Antonio M. G. Tommaselli pela imprescindível orientação, amizade, incentivo e confiança dedicados a mim no desenvolvimento desta Tese.

Ao professor Aluir P. Dal Poz, pelo apoio e incentivo dedicados durante este período.

A todos os docentes do Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) e do Departamento de Cartografia pelo auxílio técnico, útil em minha formação.

Aos amigos Mário L. Reiss, José Marcato Junior e Wimerson Bazan pela disponibilização de funções implementadas, e aos amigos Thiago Tiedtke, Paulo Amorim, Wesley Polezel e Luiz Fernando Dal Belo pelo auxílio prestado.

Aos amigos do PPGCC, em especial Rejane, Paula, Regina, Wimerson, Juliano, Rodrigo Ferreira, Priscila, Aline, Edgar, Ligia, Maria Ligia, Claudinei, Daniela dos Anjos, Daniela Modesto, Zanin, Rodrigo Bezerra (danone), Rodrigo Lopes (paulista), João Paulo, Adriana, Lauriana e Letícia pelas horas de boa convivência.

Ao amigo e professor de Inglês José Brito de Souza pelos ensinamentos sobre dedicação e perseverança.

Aos amigos Miriam C. Espinhosa, Camila M. Remelli, Renata C. Faustino, Giovani Vale, Patrícia Scalco, Jaqueline V. Matsuoka, Marcelo Tomio Matsuoka, Zaqueu, Marco Aurélio, Elaine, Daniel e Thiago Statella que mesmo de longe me deram força e incentivo.

As amigas e conterrâneas Zenaide Trevisan e Maria Conceição pelo companheirismo ao longo dos anos, e a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

Transportai um punhado de terra todos os dias e fareis uma montanha.

(Confúcio)

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento e avaliação de dois modelos de orientação exterior para sensores de varredura linear (*pushbroom*) que permitem estimar os coeficientes que descrevem a trajetória da plataforma, ambos utilizando feições retas como controle de campo. Considerando que a aquisição da imagem de varredura linear não é instantânea, devem ser calculados seis Parâmetros de Orientação Exterior (POE) para cada linha adquirida. Para tanto a posição e atitude do sensor são modeladas a partir de um polinômio temporal. A relação de uma reta no espaço imagem e sua homóloga no espaço objeto é estabelecida no primeiro modelo, a partir da equivalência entre o vetor normal ao plano de projeção no espaço imagem e o vetor normal ao plano de projeção no espaço objeto rotacionado. A propriedade de equivalência entre planos foi adaptada para considerar a geometria da imagem de varredura linear. O segundo modelo tem como princípio a ortogonalidade do vetor posição de um ponto da reta no espaço imagem (vetor de visada) e o vetor normal ao plano de projeção que contém essa reta no espaço objeto. Além destes, o modelo de colinearidade usando pontos adaptado ao sensor de varredura linear, também foi implementado a fim de comparar as metodologias. Experimentos com dados simulados correspondentes a uma cena do satélite CBERS (China-Brazil Earth Resource Satellite) e experimentos com dados reais usando uma imagem CBERS foram realizados para testar os modelos desenvolvidos. Os resultados mostraram que os modelos propostos podem ser usados para calcular os POE de imagens de varredura linear, e dispondo de tais parâmetros, a correção geométrica de imagens orbitais pode ser realizada. São analisados ainda, vários fatores determinantes da precisão, como o número e distribuição das entidades de controle.

ABSTRACT

The aim of this paper is to present the derivation and evaluation of two models for orientation of pushbroom sensors that allow estimating the polynomial coefficients describing the platform trajectory. Both models use only linear features as ground control. Considering that pushbroom image acquisition is not instantaneous, six EOP (Exterior Orientation Parameters) for each scanned line must be estimated. The sensor position and attitude parameters are modeled with a time dependent polynomial. The relationship between a straight line in the image space and its homologous in the object space is established in the first model through a mathematical model based on the equivalence between the vector normal to the projection plane in the image space and the vector normal to the rotated projection plane in the object space. The equivalence property between planes was adapted to consider the pushbroom geometry. The second model rely on the principle that the position vector containing image point (viewing vector) and the normal vector to the projection plane in the object space are orthogonal. The model based on collinearity equations using points adapted to the pushbroom geometry were also implemented aiming at the comparison the methodologies. Experiments with simulated data corresponding to a CBERS scene (China-Brazil Earth Resource Satellite) and experiments with real data using a CBERS image were accomplished in order to test the developed models using straight lines. The obtained results showed that the proposed models can be used to estimate the EOP of pushbroom images with suitable accuracy. Such parameters (EOP) can be used to accomplish the geometric correction of orbital images. Several other factors attesting accuracy like distribution and number of control entities were also evaluated.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Considerações Iniciais	15
1.2 Objetivos	20
1.3 Justificativa	21
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1 Considerações iniciais	23
2.2 Sistema CBERS	24
2.3 Correção geométrica em imagens CBERS	28
2.4 Realce e Extração de Feições	30
2.4.1. Feições lineares	31
2.4.2. Etapas do Processo de Extração de Feições	33
2.4.2.1. Realce de imagens	35
2.4.3 Transformada de Hough	39
2.4.4 Extração de linhas com precisão subpixel	44
2.5 Levantamento das feições lineares no espaço objeto	47
2.5.1 Posicionamento relativo cinemático	49
2.6 Correspondência de Imagens	49
2.7 Sensores Digitais	51
2.7.1 Câmaras de quadro digitais	52
2.7.2 Sensores de varredura mecânica	52
2.7.3 Sensores lineares	55
2.8 Geometria do Sensor Pushbromm	59
2.8.1 Modelo de sensor	59
2.8.2 Modelo de plataforma	60
2.8.2.1 Modelos rigorosos baseados em parâmetros de órbita	61
2.8.2.2 Modelos rigorosos baseados em posição-rotação	64
2.9 Modelos não Paramétricos (ou modelos generalizados)	67
2.10 Modelos de orientação usando abordagem rigorosa	68
2.10.1 Modelos rigorosos para imagens orbitais	68
2.10.2 Modelos Rigorosos	70
2.10.2.1 Modelo por feixes independentes modificado	71

2.10.3 Modelos Rigorosos usando Feições Retas	76
2.10.3.1 Contextualização histórica	76
2.10.3.2 Modelo de planos equivalentes	80
3. MATERIAIS E MÉTODOS	85
3.1 Materiais	85
3.2 Metodologia.....	85
3.2.1 Dados de entrada.....	89
3.2.1.1. Pré-Processamento.....	92
3.2.1.2 Levantamento dos eixos das Rodovias	94
3.2.2 Extração de feições	97
3.2.3 Métodos de orientação baseados em modelos físicos	102
3.2.3.1 Modelo dos Planos Equivalentes Adaptado	103
3.2.3.2 Modelo de Coplanaridade com Retas	113
3.2.3.3 Modelo de Colinearidade adaptado para a geometria pushbroom	117
3.2.4 Implementação dos modelos.....	119
4. RESULTADOS E ANÁLISES	121
4.1 Experimentos	121
4.1.1 Resultados obtidos com dados simulados.....	122
4.1.2 Resultados obtidos com dados reais	144
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	169
5.1 Conclusões.....	169
5.2 Recomendações para trabalhos futuros	171
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	173

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Os diferentes campos de visada do satélite CBERS.	25
Figura 2 - Imagem CBERS contendo cruzamentos de rodovias.	32
Figura 3 - Exemplos de contraste de imagens.	35
Figura 4 - Exemplo de suavização da imagem: imagem original (a) e imagem suavizada (b).	36
Figura 5 - Imagem original (a), imagem de bordas (b).	37
Figura 6 - (a) Imagem de bordas e (b) imagem limiarizada.	38
Figura 7 - Processo de afinamento de uma borda em imagem sintética; imagem original (a), borda afinada (b).	39
Figura 8 - Uma linha (a) no espaço imagem, (b) no espaço de parâmetros.	40
Figura 9 - Parâmetros normais para uma linha.	41
Figura 10 - Projeção dos pontos colineares em uma linha.	42
Figura 11 - Curvas senoidais no espaço de parâmetros.	42
Figura 12 - Perfil dos ND (Números Digitais) na direção transversal a uma borda.	46
Figura 13 - Superfície cilíndrica parabólica.	47
Figura 14 - Geometria de uma câmara de quadro digital.	52
Figura 15 - Geometria de varredura mecânica.	53
Figura 16 - Distorções na imagem para sistemas de varredura mecânica.	54
Figura 17 - Geometria de uma câmara panorâmica.	54
Figura 18 - Esquema de um sensor linear pushbroom.	55
Figura 19 - Cena formada por um scanner pushbroom.	56
Figura 20 - Ilustração de uma cobertura desigual do terreno por uma câmara linear, onde a parte superior ilustra a projeção da linha no terreno e a parte inferior a linha na imagem.	57
Figura 21 - Princípio da Geometria da câmara tri-linear.	58
Figura 22 - Modelo de sensor para câmara de quadro (a) e sensor pushbroom (b).	59
Figura 23 - Configuração do sistema sensor, de órbita e de referência terrestre.	61
Figura 24 - Configuração do sistema sensor pushbroom, de órbita e de referência do terreno.	65
Figura 25 - Condição de Colinearidade.	71
Figura 26 - O efeito de pequenas mudanças nos parâmetros para a fotografia e vetor linear.	73

Figura 27 - Geometria de uma linha reta no espaço objeto.....	77
Figura 28 - Vetores normais em relação aos planos de interpretação no espaço imagem e objeto.	80
Figura 29 - Elementos das representações normal e paramétrica da linha reta.....	81
Figura 30 – Fluxograma do estudo realizado com processos para orientação automática.	88
Figura 31 – Imagem ilustrando a sobreposição da composição colorida da cena CBERS e do vetor com o nível lagos.....	90
Figura 32 - Pontos escolhidos para a análise estatística.	91
Figura 33 - Imagem ilustrando um trecho da cena da banda 4 (a), e trecho da cena pré-processada (b).	94
Figura 34 - Trecho do mapa rodoviário do Estado de São Paulo com as sub-regiões usadas no levantamento.	95
Figura 35 - Imagem da sobreposição dos eixos das rodovias coletados (em verde) e imagem da banda 4 CBERS.	97
Figura 36 - Imagem CBERS com os eixos de rodovias usados como controle de campo para os experimentos.	98
Figura 37 - Sequência do processo de extração.....	100
Figura 38 - Trecho da imagem CBERS ilustrando uma rodovia em uma região de baixo contraste.....	101
Figura 39 - Vetores normais em relação aos planos de interpretação no espaço imagem para as n linhas e no espaço objeto.....	104
Figura 40 - O problema de orientação do vetor normal para o caso de sensores pushbroom.	109
Figura 41 - Geometria de um vetor de visada de um ponto p' no espaço imagem e o vetor normal da reta no espaço objeto.	114
Figura 42 - Relacionamento de um ponto no espaço objeto e no espaço imagem.	117
Figura 43 - Imagem simulada com características de uma imagem CBERS com agrupamento de 50 retas (a) e com 35 pontos (b).....	124
Figura 44 - Imagem ilustrando os 5 pontos de verificação.....	129
Figura 45 - Imagem simulada com características de uma imagem CBERS com agrupamento de 25 retas (a) e com 14 pontos (b).....	134

Figura 46 - Imagem simulada com características de uma cena CBERS e agrupamento de 25 retas com nova distribuição na cena (a) e com 14 pontos com nova distribuição na cena (b).....	136
Figura 47 - Imagem simulada com características de uma imagem CBERS com 25 retas e distribuição desfavorável das feições sobre a cena.	139
Figura 48 - Gráfico com a representação dos quatro testes realizados para X_0 , Y_0 (a) e para a_1 e a_2 (b) estimados.....	141
Figura 49 - Gráfico com a representação dos quatro testes realizados para Z_0 (a) e a_3 (b) estimados.	141
Figura 50 - Gráfico com a representação dos quatro testes realizados para k_0 (a) e a_4 (b) estimados.	141
Figura 51 - Imagem simulada com características de uma cena CBERS com agrupamento de 7 pontos.....	142
Figura 52 - Imagem da cena CBERS com distribuição de pontos de controle usados nos experimentos.....	145
Figura 53 - Distribuição dos 123 pontos na cena CBERS usados como referência.....	146
Figura 54 - Distribuição dos 8 pontos de verificação na cena CBERS.	148
Figura 55 - Configuração com agrupamento de 30 retas (a) e com 15 pontos (b), com boa distribuição na cena.	155
Figura 56 - Configuração com agrupamento de 30 retas (a) e com 15 pontos (b), com distribuição desfavorável na cena.....	158
Figura 57 - Imagem da cena CBERS com 15 pontos com nova distribuição.	164
Figura 58 – Imagem da cena CBERS com 10 retas com boa distribuição.....	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características do instrumento imageador CCD.	27
Tabela 2 - Coordenadas dos seis pontos e o erro médio em E e N.	91
Tabela 3 - Parâmetros de orientação exterior simulados.	122
Tabela 4 - Resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado usando 50 retas e erros aleatórios da ordem de 2 e 5 μ m.	126
Tabela 5 - Resultados obtidos com o modelo de coplanaridade para retas usando 50 retas e erros aleatórios na ordem de 2 e 5 μ m.	127
Tabela 6 - Resultados obtidos com o modelo de colinearidade para pontos usando 35 pontos e erros aleatórios na ordem de 5 e 13 μ m.	127
Tabela 7 - Discrepâncias em 5 pontos de verificação para as três abordagens.	129
Tabela 8 - Valores dos parâmetros de orientação exterior simulados considerando um polinômio de 1ª ordem (trajetória linear).	130
Tabela 9 - Resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado usando 50 retas, e erros aleatórios na ordem de 2 e 5 μ m e 8 parâmetros.	131
Tabela 10 - Resultados obtidos com o modelo de coplanaridade para retas usando 50 retas, erros aleatórios na ordem de 2 e 5 μ m e 8 parâmetros.	131
Tabela 11 - Resultados obtidos com o modelo de colinearidade para pontos usando 35 pontos, erros aleatórios na ordem de 5 e 13 μ m e 8 parâmetros.	132
Tabela 12 - Discrepâncias em 5 pontos de verificação para as três abordagens com polinômio de 1ª ordem.	133
Tabela 13 - Resultados obtidos com os modelos de planos equivalentes adaptado e de coplanaridade para retas usando 25 retas, e o modelo e colinearidade para pontos usando 14 pontos.	135
Tabela 14 - Resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado e modelo de coplanaridade retas usando 25 retas mal distribuídas na cena (5 μ m), e modelo e colinearidade para pontos usando 14 pontos mal distribuídos na cena (13 μ m).	137
Tabela 15 - Resultados obtidos com o modelo de coplanaridade para retas, com 25 retas, 13 μ m de erro aleatório, e com 1 e 2 pontos contidos em cada reta.	140
Tabela 16 - Resultados obtidos com o modelo de coplanaridade para retas, com 25 retas, 13 μ m de erro aleatório, e com 4 e 8 pontos contidos em cada reta.	140

Tabela 17 - Resultados obtidos combinando-se o modelo dos planos equivalentes adaptado e colinearidade, usando 50 retas com 7 e 14 pontos.	143
Tabela 18 - Parâmetros de orientação exterior estimados e usados como referência (polinômio de 2ª ordem).....	146
Tabela 19 - Parâmetros de orientação exterior estimados e usados como referência (modelo linear; polinômio de primeira ordem).	147
Tabela 20 - Discrepâncias em 8 pontos de verificação para o modelo de colinearidade com pontos, com polinômio de 2ª e 1ª ordem.	148
Tabela 21 - Resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado, modelo de coplanaridade para retas e modelo de colinearidade para pontos com dados reais usando polinômio de segunda ordem.....	150
Tabela 22 - Discrepâncias em 8 pontos de verificação para as três abordagens com polinômio de 2ª ordem.....	151
Tabela 23 - Resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado, sem a correção dos parâmetros angular e linear da reta.	152
Tabela 24 - Resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado, modelo de coplanaridade para retas e modelo de colinearidade para pontos com dados reais usando polinômio de primeira ordem.	153
Tabela 25 - Discrepâncias em 8 pontos de verificação para as três abordagens com polinômio de 1ª ordem.....	154
Tabela 26 - Resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado, modelo de coplanaridade para retas e modelo de colinearidade para pontos com dados reais usando menor número de observações.....	156
Tabela 27 - Discrepâncias em 8 pontos de verificação para as três abordagens com número menor de observações.	157
Tabela 28 - Resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado, modelo de coplanaridade para retas e modelo de colinearidade para pontos com dados reais usando menor número de observações e outra distribuição.....	158
Tabela 29 - Discrepâncias em 8 pontos de verificação para as três abordagens com número menor de observações e nova distribuição.	159
Tabela 30 - Resultados obtidos com o modelo de coplanaridade para retas com dados reais usando maior número de observações por reta.	160
Tabela 31 - Discrepância em 8 pontos de verificação para a abordagem de coplanaridade para retas com 8 pontos por reta.....	161

Tabela 32 - Resultados obtidos com ajustamento simultâneo, usando 30 retas bem distribuídas e 15 pontos bem distribuídos; e 30 retas bem distribuídas e 15 pontos mal distribuídos.....	162
Tabela 33 - Discrepância em 8 pontos de verificação para abordagem do modelo com ajustamento simultâneo usando 30 retas bem distribuídas e 15 pontos bem distribuídos; e 30 retas bem distribuídas e 15 pontos mal distribuídos.	163
Tabela 34 - Resultados obtidos com o ajustamento simultâneo usando 30 retas mal distribuídas e duas configurações de 15 pontos com distribuição desfavorável.	164
Tabela 35 - Discrepância em 8 pontos de verificação para abordagem do modelo com ajustamento simultâneo usando 30 retas mal distribuídas e duas configurações de 15 pontos com distribuição desfavorável.....	165
Tabela 36 – Resultados obtidos com o ajustamento simultâneo usando 10 retas bem distribuídas, com 15 pontos bem distribuídos; e 15 pontos mal distribuídos.	166
Tabela 37 - Discrepância em 8 pontos de verificação para abordagem do modelo de ajustamento simultâneo usando 10 retas bem distribuídas e duas configurações de 15 pontos, uma com distribuição favorável e outra com desfavorável.....	167

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

No cenário atual, voltado à percepção da dinâmica do ambiente, as imagens orbitais apresentam-se como uma importante fonte de informação, úteis aos processos de avaliação, planejamento e monitoramento da superfície terrestre, auxiliando os usuários na tomada de decisão.

O avanço tecnológico das últimas décadas, o crescente aumento do número de sistemas orbitais, e o aprimoramento relacionado, principalmente, às suas resoluções, acarretaram na grande disponibilidade de informações sobre diferentes comportamentos de fenômenos espaciais, como vegetação, solo, recursos hídricos, ambientes antrópicos, dentre outros.

Dentre as principais vantagens dos sistemas de imageamento orbitais destacam-se a redundância de informação oriunda das várias bandas espectrais, frequente disponibilização de dados e a forma de aquisição, que na maioria dos casos compreende grandes áreas, de maneira sistemática, a baixos custos e em formato digital, o que faz com que esses dados sejam de grande relevância para estudos em diversas áreas do conhecimento.

Imagens adquiridas por sistemas sensores como Landsat ETM e SPOT 1, 2, 3 e 4, com média resolução espacial, foram muito utilizadas em aplicações ambientais, planejamento rural, etc, visto que nestes casos, geralmente, não se necessita de um rigor geométrico acentuado.

Já os satélites Ikonos, Eros, QuickBird enquadram-se na categoria de sistemas com alta resolução espacial, os quais possibilitaram novas aplicações, como planejamento urbano, mapeamento em escalas médias, dentre outras, que antes eram atendidas apenas com imagens aéreas.

Dentre os sistemas de satélites existentes, o satélite CBERS (China-Brazilian Earth Resources Satellite), destaca-se por ser resultado de uma cooperação entre a China através da CAST (Academia Chinesa de Tecnologia Espacial) e o Brasil através do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) que teve início em 1988. Esta parceria entre os governos estabeleceu o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados, buscando a autonomia no monitoramento de seus recursos naturais e trazendo à sociedade, um retorno direto sob a forma de produtos e serviços.

Além de ser uma tecnologia parcialmente nacional, a principal vantagem do sistema CBERS, é que desde o início, este programa vem realizando a difusão de suas imagens de forma sistemática e gratuita, tanto para o campo científico, como para os profissionais envolvidos com aplicações de Sensoriamento Remoto.

Para as diversas aplicações de monitoramento e mapeamento, a disponibilidade de sistemas de satélites e as alternativas de dados disponíveis são inúmeras, cabendo ao usuário explorar sua potencialidade. Tais dados, se forem tratados adequadamente, podem gerar produtos bastante confiáveis com detalhamento das informações de interesse, que inclusive, podem ser integradas a outras bases de dados cartográficos.

Diante do exposto, é nítida a importância dessas informações, quanto à sua utilização, para as diversas áreas, tornando válidos os estudos sobre sua geometria de aquisição, e, conseqüentemente, sua exatidão geométrica.

Além das imagens orbitais, outros produtos derivados, que são mais acessíveis economicamente, não apresentam boa geometria e, por outro lado, produtos com maior exatidão, possuem preços mais elevados. Uma maneira de melhorar a qualidade geométrica dos produtos que possuem preços mais acessíveis é realizar uma correção geométrica usando dados de campo.

A correção geométrica de imagens orbitais é uma etapa essencial quando se pretende utilizar dados confiáveis em aplicações, como classificação de imagens para geração de mapas temáticos, monitoramento de expansão agrícola e ambiental, dentre outras. Um procedimento bastante comum é a correção geométrica por meio de transformações planas entre o referencial da imagem e do terreno. Entretanto, quando se quer dispor de informações com melhor rigor geométrico, é imprescindível utilizar modelos que considerem a geometria de aquisição dessas imagens, fornecendo dados com precisão na ordem de 1 a 2 pixels.

Muitos modelos geométricos diferentes em complexidade, rigor e precisão, foram desenvolvidos, como descritos em Fritsch e Stallmann (2000), Hattori et al. (2000) e Dowman e Michalis (2003), para realizar a correção geométrica de imagens orbitais, como do

satélite SPOT, Landsat, CBERS, Ikonos, etc., adquiridas por sensores do tipo *pushbroom* (varredura linear). As principais abordagens incluem modelos rigorosos e modelos não paramétricos ou generalizados (TONOLO e POLI, 2003).

Como as imagens dos sensores *pushbroom* não são instantâneas, cada linha da imagem é tomada de uma posição e orientação diferentes, ao contrário da imagem de quadro (*frame*), que possui um único conjunto de parâmetros de orientação exterior (3 coordenadas do centro perspectivo e três ângulos de atitude) por imagem. No caso do sensor *pushbroom*, existem 6 incógnitas para cada linha da imagem, que são determinadas diretamente durante a coleta das imagens, usando sensores de orientação direta como GPS, giroscópios, sensores solares e rastreadores estelares. A qualidade destes dados, entretanto, não é compatível com a resolução da imagem, que pode ser de 1 metro, como as imagens Ikonos, por exemplo. Uma alternativa é usar controle de campo para melhorar a qualidade dos dados de orientação.

Os arquivos contendo estes metadados, ou seja, os parâmetros de orientação de cada imagem da cena formada podem não ser disponibilizados pelas empresas controladoras dos sistemas. Ao invés disso, elas disponibilizam os coeficientes polinomiais racionais, calculados a partir dos dados orbitais.

Sem a informação dos parâmetros de orientação torna-se necessário utilizar controle de campo para realizar a correção geométrica, e mesmo quando os metadados são disponibilizados, como no caso do satélite Quickbird, o controle de campo é necessário para refiná-los.

Para o caso das imagens CBERS que são disponibilizadas gratuitamente, correções geométricas são realizadas usando inicialmente dados de efemérides. Como esses dados possuem baixa precisão, devido à qualidade dos sensores embarcados, essas imagens apresentam erros posicionais acentuados. Desta forma, torna-se necessária uma correção geométrica adicional usando dados de campo. Mesmo para sensores que permitam um georreferenciamento de melhor qualidade, é indispensável a correção geométrica com dados de campo para eliminar os erros residuais decorrentes do georreferenciamento direto.

Geralmente em Fotogrametria, os modelos de orientação que relacionam os espaço imagem e objeto, utilizam como controle de campo entidades do tipo pontos. No entanto, alguns problemas críticos podem ocorrer com a utilização desse tipo de entidade quando usada como controle de campo. Estas feições nem sempre estão disponíveis em número adequado, ou então, não possuem uma boa distribuição geométrica na cena, prejudicando o resultado final da correção.

O uso de feições lineares, como controle de campo, é uma forma alternativa de se determinar a orientação exterior para fazer a correção geométrica. Podem ser citados como exemplos deste tipo de informação, arestas de edificações, estradas, limites de propriedades, entre outras feições. Tais feições são mais fáceis de serem reconhecidas e extraídas automaticamente, enquanto que a aquisição de pontos de apoio de modo automático é mais complexa, sendo, na maioria das vezes, realizada de modo interativo.

Feições lineares têm sido usadas em muitos trabalhos como Lugnani (1980), Tommaselli (1988), Cintra e Viadana (1996), Habib e Kelley (2001), Habib (2004), Dalmolin et al. (2005), Dal Poz e Scalco (2006).

Basicamente os métodos de extração de feições dividem-se em três categorias: manuais (interativos), semi-automáticos e automáticos. Nos métodos manuais, o operador realiza tanto a identificação como a delimitação das feições interativamente. O método semi-automático é caracterizado pela interação do operador apenas na identificação das feições, ficando a cargo do sistema a etapa de extração. Já os métodos automáticos tentam evitar totalmente a intervenção humana durante o processo de extração. No entanto, os métodos automáticos ainda não são totalmente satisfatórios, exceto em situações específicas.

A extração automática de feições é uma tarefa de grande importância na automação de processos, não somente para a orientação automática de imagens, como também para Reconhecimento Automático, Visão de Máquina e Controle de Qualidade. Em todas as situações espera-se obter métodos capazes de identificar as feições e extraí-las com boa qualidade geométrica.

Outro aspecto relevante no processo de correção geométrica é a determinação automática da correspondência (*matching*) entre entidades homólogas, a qual também faz parte da maioria dos processos fotogramétricos digitais.

Os métodos de correspondência normalmente empregados são por área ou por feições (ou características). Em geral o que diferencia esses métodos é o tipo de primitiva que é usada no processo de correspondência. O método mais usado em Fotogrametria é a correspondência por área, que baseia-se na correspondência dos níveis de cinza dos pixels, que são comparados nas duas imagens; a medida de similaridade entre eles indica se existe correspondência ou não das entidades homólogas. Já o método baseado em feições (ou características) compreende primitivas que podem ser pontos, linhas ou regiões. Nesse método a correspondência é realizada comparando os atributos dessas primitivas, que possuam maior similaridade (HEIPKE, 1996).

Além da correspondência de feições homólogas em imagens com sobreposição, a correspondência pode ser realizada também de feições homólogas do espaço objeto e imagem.

Num processo de correspondência entre feições do espaço objeto e imagem, as feições do espaço objeto são projetadas para o espaço imagem e algum critério de correspondência é usado.

Se no processo de correspondência as imagens orbitais não apresentassem distorções geométricas, as feições do espaço objeto projetadas já teriam uma correspondência imediata com as feições do espaço imagem por proximidade. Porém, isso não ocorre na prática, visto que na maioria das vezes, as imagens orbitais, com preços mais acessíveis, possuem erros na geometria, originados do uso apenas de dados de efemérides. Assim, as feições homólogas possuem uma separação entre si, dificultando os processos de correspondência. Há casos em que as correções geométricas são bastante aproximadas e os erros posicionais das feições homólogas são elevados, como no caso das imagens CBERS (nível 2), o que implica numa grande “distância” entre essas feições e conseqüentemente, num grande espaço de busca.

Um método de correspondência baseado em feições que pode ser usado, por exemplo, é a correspondência relacional (SHAPIRO e HARALICK, 1987; DAL POZ, 1996; WILLIAMS et al., 1999; RANGARAJAN et al., 2003) relacionada aos atributos dessas feições homólogas.

Uma outra possibilidade de fazer essa correspondência, considerando as imagens CBERS (nível 2) é usar uma imagem CBERS com georreferenciamento preciso como referência e realizar uma correspondência por área de alguns pontos dessa imagem com pontos homólogos de outra imagem CBERS da mesma cena (mesma órbita/ponto), a fim de melhorar a correção geométrica aproximada. Com uma correção geométrica mais precisa, a separação entre as feições projetadas do espaço objeto para o espaço imagem, e as feições do espaço imagem, seria menor. Com um espaço de busca reduzido, pode ser usado então, um processo de correspondência com o critério de proximidade, por exemplo.

O uso desse método alternativo é atrativo, visto que dispondo da imagem de referência, esse procedimento pode ser realizado para uma seqüência de imagens temporais, podendo ser útil nas aplicações, por exemplo, de monitoramento.

Com a determinação da correspondência entre as feições (objeto-imagem) têm-se como relacionar o espaço objeto e o espaço imagem, usando um modelo rigoroso, a

fim de determinar os parâmetros de orientação exterior e uma subsequente correção geométrica.

No intuito de contribuir com uma metodologia voltada à determinação de uma correção geométrica em imagens orbitais, este trabalho teve como finalidade estudar e avaliar o problema de determinação dos parâmetros de orientação exterior, usando modelos rigorosos com feições lineares. Tal metodologia é de grande interesse visto que, o uso de feições retas em modelos rigorosos para orientação de imagens ainda é um campo pouco explorado.

Para isso, foi realizado o desenvolvimento e avaliação de dois modelos rigorosos para orientação de imagens orbitais usando feições retas. O primeiro deles é baseado no modelo de planos equivalentes (TOMMASELLI e TOZZI, 1996) o qual, originalmente foi desenvolvido para resseção espacial de imagens de quadro usando feições retas como apoio. Tal modelo foi modificado para considerar a geometria de varredura linear (*pushbroom*) das imagens orbitais. O segundo modelo é baseado no princípio da ortogonalidade de um vetor que contém um ponto da reta no espaço imagem com o vetor normal ao plano de projeção que contém esta reta no espaço objeto, considerando a geometria de um sensor de varredura linear. Este modelo apresenta uma abordagem bastante similar aos modelos de coplanaridade de Mulawa e Mikhail (1988) e Lee e Habib (2002).

O modelo de colinearidade usando pontos como controle de campo, estendido para considerar a geometria do sensor, também foi implementado a fim de compará-lo com as metodologias propostas que usam linhas retas e consideram a geometria *pushbroom*.

Além disso, uma estratégia de detecção semi-automática de feições lineares foi desenvolvida, para extrair as coordenadas imagem das feições retas. As coordenadas de pontos nas retas correspondentes no espaço objeto, no caso as rodovias presentes na cena CBERS abrangendo a área de estudo, foram determinadas com receptor GPS no modo cinemático.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver e avaliar modelos rigorosos para a determinação dos parâmetros de orientação exterior (POE) visando à orientação das imagens orbitais CBERS, usando entidades lineares como controle de campo.

Dentre os objetivos específicos do trabalho podem-se citar:

1. o estudo e desenvolvimento de dois modelos matemáticos de orientação de imagens, usando como controle de campo feições retas, adaptados especificamente aos sensores *pushbroom* lineares;
2. o desenvolvimento e estudo do processo de extração seletiva de feições lineares, usando a transformada de Hough, além do uso de uma função de ajuste de retas subpixel;
3. a realização de testes usando dados simulados de acordo com as características das imagens CBERS (sensor CCD), considerando quantidade e distribuição das retas e pontos, de modo a verificar a viabilidade dos modelos, e;
4. a realização de testes utilizando dados reais e a análise estatística dos resultados apresentados.

1.3 Justificativa

Para que imagens orbitais tenham rigor geométrico é necessário realizar uma correção geométrica, a qual visa eliminar as distorções sistemáticas sofridas no processo de aquisição dessas imagens.

Sendo o sistema sensor CBERS uma tecnologia parcialmente nacional e seus produtos de distribuição gratuita, aplicações em diversas áreas podem ser realizadas com o uso dessas imagens, o que viabiliza e torna relevante o aumento no número de pesquisas relacionadas às características e a utilidade dessas imagens. Assim, estudos sobre sua geometria, bem como a definição de novas alternativas para a correção geométrica, podem trazer grandes contribuições, principalmente por que essas imagens, quando obtidas no nível básico, possuem um georreferenciamento aproximado de baixa precisão, sendo os maiores erros em translação.

Nos últimos anos, com o desenvolvimento dos novos sistemas orbitais, muitas áreas do conhecimento passaram a utilizar imagens orbitais, devido às vantagens apresentadas por elas. A evolução desses sistemas permitiu o uso de imagens orbitais de alta resolução em algumas aplicações que antes não podiam ser atendidas, devido à necessidade de informações precisas.

Tendo em vista que o sistema CBERS tem como previsão para os próximos anos aumentar sua resolução espacial, fica clara a importância de estudos sobre esse sistema sensor.

A investigação do uso de modelos mais complexos, como os rigorosos, para a orientação de imagens de varredura linear, é relevante, pois com o aumento da resolução espacial, a variação do relevo deve ser levada em consideração. Além do mais, o uso de feições retas como controle de campo na orientação de imagens orbitais ainda não é um tema suficientemente explorado e merece ser estudado e avaliado, visto que a maioria dos trabalhos de orientação com imagens orbitais usa apenas pontos como controle de campo.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Considerações iniciais

Os sistemas de aquisição de imagens orbitais geram informações que vêm sendo utilizadas em várias aplicações, incluindo o Mapeamento. Entretanto, o uso generalizado dessas imagens na identificação e detecção de mudanças na superfície terrestre é dependente de sua qualidade geométrica final. Sabe-se que essas imagens possuem distorções oriundas de diferentes fontes e que precisam ser minimizadas a fim de serem utilizadas plenamente.

Essas distorções são categorizadas, basicamente, em dois grupos: distorções radiométricas e distorções geométricas. As correções utilizadas para minimizar essas distorções, fazem parte de técnicas de pré-processamento realizadas nas imagens originais, ou seja, imagens que ainda não sofreram nenhum tipo de tratamento.

Na correção radiométrica as técnicas utilizadas modificam os números digitais (ND) originais, para torná-los mais próximos dos valores que deveriam estar presentes na imagem. Esta correção engloba as distorções provocadas pela atmosfera e os problemas derivados do mal funcionamento dos sensores (RICHARDS, 1993).

De modo geral, a correção geométrica é uma fase de pré-processamento que tem como objetivo restaurar a geometria da imagem. De acordo Richards (1993) a correção geométrica altera a geometria da imagem com a finalidade de corrigir distorções produzidas pelo movimento de rotação da Terra ou por pequenas variações na altitude, atitude ou na velocidade da plataforma.

A correção geométrica deve modelar os erros inerentes ao processo de aquisição das imagens, as quais podem ser referenciadas a um sistema de projeção cartográfica de interesse (D'ALGE, 1999).

Existem duas técnicas que podem ser usadas para corrigir os vários tipos de distorções geométricas presentes em uma imagem digital. A primeira delas tem como finalidade modelar a natureza e a magnitude da fonte de distorção, estabelecendo um modelo rigoroso. A segunda é definida por um modelo não paramétrico ou generalizado, a qual estabelece uma relação matemática entre a posição do pixel na imagem e a correspondente coordenada deste ponto no terreno. Esta relação pode ser usada para corrigir a geometria da imagem, independentemente da causa da distorção (D'ALGE, 1999).

2.2 Sistema CBERS

Com o desenvolvimento e aprimoramento dos sistemas orbitais nos últimos anos, os usuários podem se utilizar de informações terrestres com considerável nível de atualização, bem como gerar produtos cartográficos com qualidade requerida, através do processamento fotogramétrico das imagens.

Segundo Zanardi et al. (2005) a última década do século XX foi marcada por notáveis avanços na área de Sensoriamento Remoto. Foram desenvolvidos e lançados, tanto por plataformas de programas espaciais já existentes, como por projetos inéditos, sensores de alto desempenho, no que se refere às resoluções espacial, espectral, radiométrica e temporal. A bordo de plataformas orbitais, esses novos sensores vieram complementar o registro dos recursos naturais e do meio ambiente terrestre.

Países que não possuem um sistema de satélite para a observação da Terra e necessitam de imagens obtidas por esses sensores, podem, em algumas situações não encontrar imagens voltadas às suas necessidades, visto que tais satélites não são inteiramente adequados às peculiaridades do território ou dos recursos naturais investigados.

Na década de 80, o governo Brasileiro iniciou a idealização e implementação de um programa técnico-científico espacial brasileiro, que se estabeleceu propriamente com a formulação do Programa CBERS, em parceria com a China, o qual foi o marco de uma nova era no campo espacial nacional.

Somado à importância de uma cooperação e da obtenção de um parceiro para divisão dos custos, tem-se os fatores de natureza puramente física de ambos os países, como a vasta extensão territorial com grandes áreas despovoadas e de difícil acesso, assim como a acentuada vocação agrícola (ZANARDI et al., 2005).

Com o estabelecimento da parceria, o satélite CBERS foi projetado com sensores voltados às aplicações comuns para ambos os países, principalmente em áreas de

gerenciamento de recursos naturais, monitoramento de florestas, geologia, hidrologia, além de um sistema de monitoramento ambiental.

Lançado em outubro de 1999, o primeiro satélite do Programa CBERS apresenta a capacidade técnica de um sistema completo de Sensoriamento Remoto para observação da Terra, compatível com as necessidades atuais. Composto de dois módulos, o satélite CBERS-1 agrega sistemas ópticos e eletrônicos usados para a coleta de dados em diferentes resoluções espaciais, temporais e radiométricas. O módulo “carga útil” é composto pelos sistemas CCD (High Resolution CCD Camera), IRMS (Infrared Multispectral Scanner) e WFI (Wide Field Imager), enquanto que o módulo “serviço” contém os equipamentos necessários à operação do satélite (ESPINDOLA et al., 2004).

Com o lançamento do segundo satélite do Programa CBERS em 2003, uma nova capacidade técnica foi adicionada ao sistema, ou seja, a possibilidade de visadas laterais que, tomadas de pontos diferentes, permitem a formação de pares estereoscópicos (MARANHÃO e RAIVEL, 2005). Exceto pela incorporação das visadas laterais, que proporcionam imagens com certo grau de sobreposição da cena num intervalo de três dias entre duas imagens, o satélite CBERS-2 é tecnicamente idêntico ao CBERS-1.

Uma característica dos satélites CBERS-1 e 2 é a diversidade de câmaras que esses satélites possuem, com diferentes resoluções espaciais e frequências de coleta de dados. A Figura 1 ilustra os diferentes campos de visada do satélite CBERS.

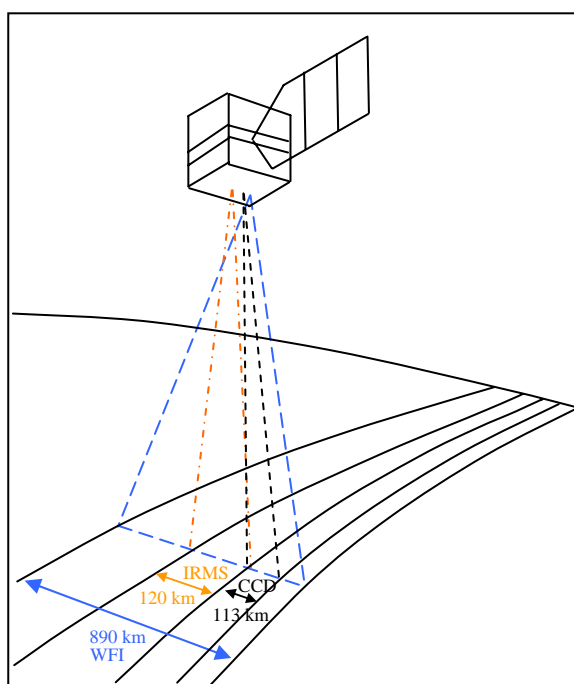


Figura 1 - Os diferentes campos de visada do satélite CBERS.
Fonte: Adaptado do INPE (2007).

As câmaras CCD e IRMS, que possuem campos de visada de 113 km e 120 km, respectivamente, levam 26 dias para fazer o recobrimento global. Já para a câmara WFI, que recobre uma faixa de 890 km, o recobrimento global é feito em 5 dias (INPE, 2007).

A câmara imageadora CCD produz imagens com resolução espacial de 20 m em quatro bandas espectrais e uma pancromática, enquanto que a câmara IRMS produz imagens com 80 m de resolução espacial em três bandas do espectro e 160 m na banda espectral correspondente a região do infravermelho termal, e a câmara WFI produz imagens com 260 m em 2 faixas espectrais (INPE, 2007).

Visto que dentre as câmaras do sistema CBERS, o sensor CCD produz imagens com melhor resolução espacial, prestando-se à observação de fenômenos ou objetos cujo detalhamento seja importante, esse sensor apresenta-se como o mais indicado para aplicações voltadas à Cartografia, e a ele será dado maior ênfase neste estudo.

Segundo Maranhão e Raivel (2005), a câmara CCD é um dos principais instrumentos a bordo do satélite CBERS. Ela é utilizada para adquirir cenas da superfície terrestre a partir do modo de varredura “pushbroom”. A partir de sua órbita o sensor CCD a bordo do CBERS adquire simultaneamente imagens nas bandas azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, além da banda pancromática. A resolução espacial de cada banda é de 20 metros, o que equivale a 5812 pixels por linha em cada banda.

Com um campo de varredura cobrindo uma faixa de 113 km de largura, a câmara CCD tem a capacidade de orientar seu campo de visada dentro de ± 32 graus, possibilitando a obtenção de imagens estereoscópicas de uma determinada região. Além disso, qualquer fenômeno detectado pela câmara WFI pode ser focalizado pela câmara CCD, para estudos mais detalhados, através de seu campo de visada (MARANHÃO e RAIVEL, 2005).

A órbita do satélite CBERS é heliosíncrona, realizando aproximadamente 14 revoluções a cada dia. Nesta órbita, o satélite cruza o Equador sempre na mesma hora local, permitindo assim que se tenham sempre as mesmas condições de iluminação solar para a comparação de imagens tomadas em dias diferentes.

A câmara CCD pode ser dividida em subsistemas principais e auxiliares, os quais são divididos em quatro pacotes montados no interior do satélite sendo eles o Corpo da Câmara, a Caixa de Controle óptico e mecânico, o Controle de Temperatura e os Circuitos de Imagem CCD.

A Tabela 1 ilustra uma descrição sucinta das principais características do sistema CBERS-2 com o instrumento imageador CCD.

Tabela 1 - Principais características do instrumento imageador CCD.

	Características
Bandas espectrais	0,51 - 0,73 μm (pan) 0,45 - 0,52 μm (azul) 0,52 - 0,59 μm (verde) 0,63 - 0,69 μm (vermelho) 0,77 - 0,89 μm (infravermelho próximo)
Campo de Visada	8,3°
Inclinação	98.504°
Elemento de Resolução espacial	20 x 20 m
Largura da faixa imageada	113 km
Altura da órbita hélio-síncrona	778 km
Capacidade de apontamento do espelho	$\pm 32^\circ$
Resolução temporal	26 dias: visada vertical - 3 dias: visada lateral
Frequência da portadora de RF	8103 & 8321 MHz
Taxa de dados da imagem	2 x 53 Mbits/s

Fonte: (INPE, 2007).

Destacam-se como aplicações potenciais do imageador CCD (INPE, 2007):

- **Vegetação:** identificação de áreas de florestas, alterações florestais em parques, reservas, florestas nativas ou implantadas, quantificações de áreas, sinais de queimadas recentes;
- **Agricultura:** identificação de campos agrícolas, quantificação de áreas, monitoramento de desenvolvimento e expansão agrícola, quantificação de pivôs centrais, auxílio em previsão de safras, fiscalizações diversas;
- **Meio ambiente:** identificação de anomalias antrópicas ao longo de cursos d'água, reservatórios, florestas, cercanias urbanas, estradas; análise de eventos episódicos naturais compatíveis com a resolução da câmara, mapeamento de uso do solo, expansões urbanas;
- **Água:** identificação de limites continente-água, estudos e gerenciamento costeiros, monitoramento de reservatórios;
- **Cartografia:** dada a sua característica de permitir visadas laterais de até 32° a leste e a oeste, em pequenos passos, possibilita a obtenção de pares estereoscópicos e a consequente análise cartográfica. Essa característica também permite a obtenção de imagens de uma certa área no terreno em intervalos mais curtos, o que é útil para efeitos de monitoramento de fenômenos dinâmicos;

- **Geologia e solos:** apoio a levantamentos de solos e geológicos;
- **Educação:** geração de material de apoio a atividades educacionais em geografia, meio ambiente, e outras disciplinas.

De modo geral, os satélites CBERS trouxeram significativos avanços científicos e tecnológicos ao Brasil. Suas imagens são usadas desde o controle do desmatamento e queimadas na Amazônia Legal, até o monitoramento de recursos hídricos, áreas agrícolas, crescimento urbano e ocupação do solo. Além de ser fundamental para grandes projetos nacionais estratégicos, como o SIVAM (Sistema de Vigilância da Amazônia), e a ocupação de espaço definitivo em diversos programas ambientais (INPE, 2007).

Após uma década de troca de conhecimentos e experiências, bem como o bom desempenho dos satélites, a parceria China-Brasil alcançou boa parte de seus objetivos com o lançamento do CBERS-1 e do CBERS-2. Ambos os governos decidiram expandir o acordo e incluir outros dois satélites da mesma categoria, os satélites CBERS-3 e 4, como uma segunda etapa da parceria sino-brasileira.

O potencial de aplicação de um dado sensor é estabelecido em função de suas características espectrais, radiométricas, espaciais e temporais, além de atender a melhor relação custo/benefício. Assim, uma das grandes vantagens no uso de imagens CBERS é que essas informações são distribuídas gratuitamente pelo INPE em modo padrão. As cenas podem ser escolhidas pelo usuário através das opções como região, órbita/ponto ou coordenadas terrestres.

Porém, o uso dessas imagens com dados do georreferenciamento baseados no modelo orbital, ainda é inviabilizado devido ao erro posicional apresentando, que é da ordem de quilômetros. Assim, a correção geométrica é indicada visando melhorar a qualidade geométrica dessas imagens.

2.3 Correção geométrica em imagens CBERS

No processo de correção geométrica de uma imagem, diversos modelos matemáticos podem ser empregados, que são classificados em duas categorias: modelos rigorosos ou modelos não paramétricos (TONOLO e POLI, 2003).

Os modelos rigorosos levam em conta o processo físico de formação da imagem, considerando a geometria interna e externa do sensor, e podem ser baseados em feições do tipo ponto ou feições lineares (HABIB et al., 2004).

Ao contrário dos modelos rigorosos, os modelos não paramétricos não levam em consideração as características físicas de formação da imagem, e os parâmetros envolvidos geralmente não possuem significado físico ou geométrico.

De acordo com D'Alge (1999), o modelo fotogramétrico, assim chamado, devido às semelhanças com o modelo de equações de colinearidade, usado para a fototriangulação, tem sido utilizado pelo INPE, por exemplo, na geração de imagens orbitais com correção geométrica de sistema. Dos dados de efemérides é recuperada a posição do satélite, e com base nos dados de atitude (ângulos *roll*, *pitch* e *yaw*) e nos parâmetros do sistema de imageamento, define-se a direção de visada. A posição do satélite e a direção de visada definem uma reta que intercepta o elipsóide de referência. Ficam então definidas as coordenadas geodésicas correspondentes ao pixel adquirido em um dado instante.

Se os dados de efemérides não forem precisos a imagem corrigida pode ainda ser refinada usando controle de campo, como cruzamentos de estradas, confluências de rios, etc., Além destas, feições retas, como rodovias, arestas de edificações, limites de propriedades, dentre outras, também são uma fonte de informação muito útil para o controle de campo, visto que são mais fáceis de serem identificadas e extraídas de modo automático.

Considerando o satélite CBERS, o método de correção geométrica de sistema, para um dado instante τ e um sistema geocêntrico cartesiano, se resume (D'ALGE, 1999):

1. na definição da posição do satélite para o instante τ (dados de efemérides);
2. na definição da direção de visada para o instante τ (dados de atitude);
3. na formulação da equação da reta que passa pela posição do satélite e tem a direção de visada anteriormente determinada;
4. na formulação da equação do elipsóide de referência adotado;
5. na interseção da reta com o elipsóide;
6. e na transformação das coordenadas terrestres médias (X, Y, Z) em coordenadas geodésicas (φ , λ). Fica assim estabelecida uma relação entre coordenadas de imagem (linha, coluna) e coordenadas geodésicas.

As seis etapas descritas representam o mapeamento direto da correção geométrica, no qual se define a região do espaço geográfico a ser ocupada pela imagem de saída ou imagem corrigida. Com base nas dimensões desta região e da resolução espacial escolhida, calculam-se o número de linhas e colunas da imagem de saída. O mapeamento inverso determina então qual pixel, na imagem original, corresponde a um dado pixel na imagem de saída. Esta transformação inversa raramente gera um valor inteiro, em termos de coordenadas, na imagem original. Por isso faz-se necessária uma última etapa de interpolação ou reamostragem para que se definam os níveis de cinza da imagem de saída (D'ALGE, 1999).

Os níveis de correção utilizados para as imagens adquiridas pelo satélite CBERS são estabelecidos de acordo com: Nível 0, Nível 1, Nível 2, e os subseqüentes produtos gerados a partir desses dados usando, por exemplo, controle de campo.

A imagem em Nível 0 é a imagem 'bruta', recebida diretamente pela estação de recepção no INPE, e não possui nenhum tipo de processamento. Nesta imagem (Nível 0) há a fusão das sub-imagens obtidas pelos sensores lineares, e o ordenamento das linhas.

A imagem em Nível 1 é resultante da aplicação de uma correção radiométrica sobre a imagem em Nível 0.

A imagem em Nível 2 apresenta uma correção geométrica sobre a imagem de Nível 1, usando os dados de efemérides. O uso desses dados, porém, não fornece uma correção precisa, visto que os sensores embarcados, que no caso do satélite CBERS são, giroscópios, sensor solar e sensor de horizonte, não apresentam a precisão requerida para a realização dessa correção.

Os modelos rigorosos usados para o cálculo dos parâmetros de orientação exterior com dados de campo, que permitirão as correções geométricas nas imagens CBERS, usados neste trabalho, serão descritos na Seção 3.2.3.

2.4 Realce e Extração de Feições

As feições de interesse de uma cena são determinadas por um processo de extração, que é constituído basicamente por duas etapas: a primeira delas é a identificação dessas feições na cena; a segunda é a extração dessas feições de interesse, dentre a grande variedade de tipos de feições existentes. O realce das feições de interesse é uma fase preliminar fundamental para que se tenha um bom desempenho no processo de extração, visto que, com o realce, essas informações são contrastadas com o restante da cena.

Porém, a extração de feições é uma tarefa bastante complexa, devido à existência dos variados tipos de estruturas, como edificações, oclusões, efeitos de sombras, ruídos, baixo contraste, entre outros fatores, que prejudicam esse processo.

De acordo com Artero e Tommaselli (1999) a extração de feições em imagens digitais é uma tarefa de difícil solução, constituindo ainda um problema não totalmente resolvido. Assim, procedimentos eficazes para a extração de feições são de grande interesse na automação de processos, podendo ser utilizados em Reconhecimento automático (objetos e pessoas), Visão Computacional e Controle de qualidade. Em todas as situações espera-se obter métodos capazes de apresentar boa resposta geométrica (dimensão e orientação).

Segundo Amini (2004) a extração automática de informações da superfície terrestre em Fotogrametria e Sensoriamento Remoto requer a formulação de procedimentos e conhecimentos que condensam o conteúdo das imagens.

Uma vez que o processo de extração pode ser prejudicado pela grande diversidade de informações contidas nas imagens, estratégias alternativas que visem selecionar e extrair apenas algumas das entidades da cena são de grande interesse.

Assim, ao contrário de abordagens mais genéricas, uma abordagem de extração seletiva de feições, tem como finalidade a seleção e extração de certo tipo de entidade, como por exemplo, linhas retas, que atendam à algumas características, como orientação, tamanho, etc.

O tipo de entidade a ser extraído num processo de extração está diretamente relacionado com sua aplicação. A maioria dos objetos de interesse contidos nas imagens pode ser descrita por estruturas de polígonos, os quais podem ser decompostos em trechos por primitivas como linhas retas.

De acordo com Tommaselli e Tozzi (1996) o uso de linhas retas na análise de imagens, é totalmente justificado, considerando-se que as bordas dos objetos construídos pelo homem normalmente apresentam formas lineares e, ainda, bordas de objetos naturais com traçados mais sinuosos podem ser aproximadas por um conjunto de pequenos segmentos de linhas retas (linhas poligonais).

2.4.1. Feições lineares

Com os avanços contínuos em Fotogrametria Digital e Processamento Digital de Imagens (PDI), os procedimentos automatizados são cada vez mais utilizados, e a

maioria destes procedimentos ainda é baseada em entidades do tipo pontos. Porém, o uso de pontos nos vários processamentos fotogramétricos, pode ser inviável devido a alguns fatores, como sua distribuição inadequada na cena, quantidade insuficiente, além de serem de difícil identificação, tanto manual quanto automaticamente. Estes problemas mostram que, embora os modelos usando pontos sejam conhecidos e tenham sido testados, é recomendável estudar outras alternativas complementares.

Feições lineares podem ser usadas em várias tarefas de Fotogrametria, como em interseção espacial, resseção e triangulação. O uso de feições lineares é especialmente aplicável no mapeamento de ambientes artificiais. Objetos naturais também podem ser usados, como rios, litorais, limites de vegetação, e são uma boa possibilidade na aplicação de abordagens baseadas em feições para mapeamento (HEIKKINEN, 2002).

Assim, os principais tipos de feições lineares encontrados em imagens são rodovias, construções artificiais, rios, ferrovias e limites de vegetação. A Figura 2 apresenta exemplos de feições lineares, representadas por rodovias, contidas em dois trechos da imagem CBERS, na banda do infravermelho próximo.



Figura 2 - Imagem CBERS contendo cruzamentos de rodovias.

O aparecimento dos sistemas de aquisição de imagens digitais em conjunto com ferramentas de processamento motivaram pesquisas para o uso de feições lineares. Algumas das principais vantagens no uso dessas feições são (HABIB et al., 2004):

1. Feições lineares no espaço imagem são mais fáceis de serem extraídas se comparadas com pontos. Isto se deve à natureza intrínseca das feições lineares, que possuem descontinuidades em uma direção;
2. Feições lineares no espaço imagem podem ser extraídas com precisão subpixel na direção transversal às bordas;
3. Imagens de ambientes artificiais são ricas em feições lineares;

4. Feições lineares possuem informações semânticas, bastante úteis nos processos de geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT), compilação de mapas e reconhecimento de objetos, e;
5. Feições lineares aumentam a redundância, melhoram a robustez e a rigidez geométrica de várias atividades de ajustamento fotogramétrico.

No espaço objeto, as feições lineares podem ser obtidas facilmente de mapas ou bases de dados digitais existentes, ou medidas diretamente.

As feições lineares no espaço imagem podem ser representadas por uma função analítica, por exemplo, linhas retas e seções cônicas, ou por uma forma irregular (forma-livre, como *splines*). Entre estas alternativas de representação, pode-se demonstrar que as feições retas são apropriadas para atividades fotogramétricas pelas seguintes razões (HABIB et al., 2004):

- As feições lineares de formas livres podem ser representadas com precisão como uma seqüência de segmentos de linhas retas (linhas poligonais);
- As linhas retas podem ser usadas para a estimação dos parâmetros de orientação interior de câmaras de quadro, visto que as linhas retas do espaço objeto devem aparecer como linhas retas no espaço imagem na ausência de distorções, e;
- As linhas retas podem ser usadas para a estimação dos parâmetros de orientação exterior de sensores lineares, visto que linhas retas no espaço objeto não aparecem como linhas retas no espaço imagem devido às perturbações ao longo da trajetória de vôo.

2.4.2. Etapas do Processo de Extração de Feições

A maior parte das etapas no processo de extração de feições em imagens digitais envolve técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI).

Segundo Lillesand e Kiefer (1987), o Processamento Digital de Imagens envolve a manipulação e a interpretação das imagens digitais com o auxílio do computador. As formas possíveis de manipulação da imagem digital são literalmente infinitas. Entretanto,

todos estes procedimentos podem ser categorizados em um (ou mais) dos quatro tipos de operações (LILLESAND e KIEFER, 1987):

- Retificação e Restauração de Imagens: estas operações objetivam corrigir as distorções ou dados degradados da imagem para gerar uma representação mais fiel da cena. Isto envolve tipicamente o processamento inicial dos dados brutos da imagem com correções referentes às distorções geométricas e radiométricas da cena;
- Realce de Imagens: estes procedimentos são aplicados na imagem com a finalidade de melhorar a visualização ou gravação dos dados para subseqüentes interpretações visuais. Normalmente, o realce de imagens envolve técnicas que aumentam a distinção visual entre os alvos presentes na cena;
- Classificação de Imagens: o objetivo desta operação é substituir a análise visual dos dados com as técnicas quantitativas para automatizar a identificação dos alvos em uma cena. Isto envolve normalmente a análise de imagem multiespectral e esta aplicação pode ser baseada em regras estatísticas para determinar a identidade dos alvos presentes na superfície terrestre, analisando-se a imagem pixel a pixel;
- Fusão de Dados: este processo é usado para agrupar dados oriundos de fontes de informação diferentes, com o objetivo de gerar uma imagem que reúna as melhores características espectrais e espaciais dos conjuntos utilizados ou integrar níveis de informações diferentes, como por exemplo, imagens orbitais com fotografias aéreas ou bases cartográficas em meio digital.

A etapa de pré-processamento da imagem original é de fundamental importância para os processamentos digitais subseqüentes, como a extração de feições.

Diversas são as técnicas utilizadas no pré-processamento, como a técnica dos componentes principais, índices de realce, limiares, operações aritméticas como subtração de imagens, adição de imagens, dentre outras. Algumas dessas técnicas produzem resultados bastante relevantes e são muito úteis na seqüência de passos que pode constituir um processo de extração.

Num processo de extração, que usa como informação apenas os valores de brilho da cena, várias etapas são úteis para o desempenho desse processo. O diferencial está justamente na escolha mais adequada desse conjunto de etapas.

Uma seqüência possível, por exemplo, pode ser encontrada em Gato et al., (2001), que classificam essas etapas em pré-processamento, segmentação, refinamento e vetorização.

Além desta, outras seqüências podem ser empregadas para a extração, inserindo ou removendo algumas das etapas citadas acima, no sentido de melhorar o desempenho dos algoritmos para situações específicas.

2.4.2.1. Realce de imagens

O realce de imagens, considerado como parte integrante das ferramentas de pré-processamento, é uma tarefa de grande importância nos processamentos de imagens digitais para diversas aplicações subseqüentes, em diversas áreas. Envolve as técnicas de transformação e manipulação que visam melhorar as características visuais da imagem, como o aumento de contraste, diminuição de ruídos e/ou distorções.

A Figura 3 ilustra um exemplo de duas figuras com diferentes contrastes e seus respectivos histogramas.

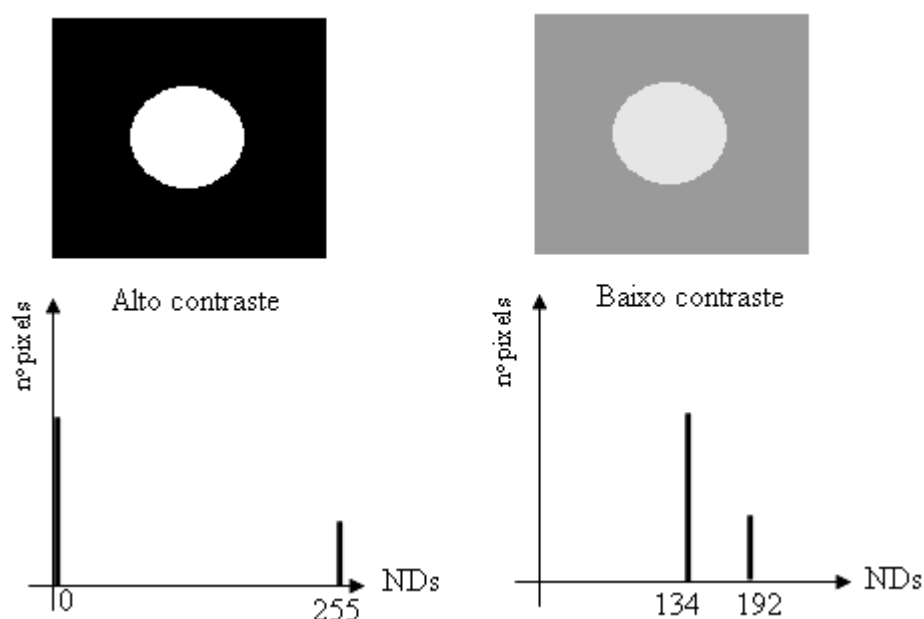


Figura 3 - Exemplos de contraste de imagens.

Todos os procedimentos cabíveis e úteis na determinação de uma separação efetiva das feições de interesse com o restante da cena, são válidos no sentido de contribuir para o realce dessas informações. Muitas são as técnicas que podem ser utilizadas com essa finalidade, sendo aqui descritas, de forma sucinta, quatro delas: suavização, detecção de bordas, limiarização e afinamento.

- Etapa de Suavização

A suavização da imagem pode ser executada inicialmente num processo de extração de feições, com o objetivo de reduzir algumas variações irregulares, que produzem bordas falsas na imagem, bem como para a remoção de alguns tipos de ruído. Nesta etapa a utilização de filtros que suavizem a imagem e preservem as bordas verdadeiras podem ser de maior interesse.

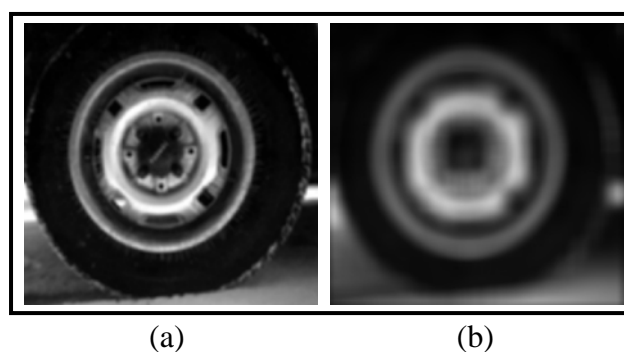


Figura 4 - Exemplo de suavização da imagem: imagem original (a) e imagem suavizada (b).

Os filtros de suavização provocam um borramento na imagem, diminuindo as definições de bordas, e quando se tem por objetivo fazer a vetorização da imagem, a preservação da localização das bordas é fundamental; portanto, é desejável, nesta etapa, a utilização de filtros de suavização que apresentem uma máxima preservação das bordas.

A presença de ruídos e bordas em certas regiões da imagem caracteriza estas regiões como áreas de altas frequências. Por esse motivo os filtros projetados para a redução de ruídos são também conhecidos por filtros passa-baixa, por serem projetados de forma a atenuar as altas frequências, não modificando as baixas frequências (áreas homogêneas da imagem).

Os filtros de suavização comumente utilizados são filtros pela média, mediana, Gaussiana, dentre outros, por exemplo, filtros no domínio da frequência. Detalhes sobre estes filtros podem ser encontrados em Nixon e Aguado (2002) e Gonzalez e Woods (2000).

- Etapa de Detecção de Bordas

A detecção de bordas normalmente baseia-se na aplicação de operadores que detectam variações de brilho na imagem, que via de regra, são gerados a partir de uma operação de diferenciação na região.

A detecção de bordas num processo de segmentação é a abordagem mais comum para a detecção de descontinuidades significativas nos níveis de cinza. A razão é que pontos e linhas finas isoladas não são ocorrências frequentes na maioria das aplicações práticas (GONZALEZ e WOODS, 2000).

Uma borda é o limite entre duas regiões com propriedades relativamente distintas de nível de cinza. Basicamente a idéia por trás da maioria das técnicas de detecção de bordas é a computação de um operador local diferencial.

Operadores como Gradiente, Laplaciano, Sobel, Prewitt, Nevatia e Babu, Canny, dentre outros, fazem parte deste grupo de técnicas de detecção de bordas. Maiores detalhes podem ser encontrados em Nixon e Aguado (2002), Sonka et al. (1998), Gonzalez e Woods (2000), Artero (1999), etc.

A Figura 5 ilustra um exemplo de detecção de bordas pelo operador de Sobel, a partir de um trecho de uma imagem aérea na escala 1:8000.

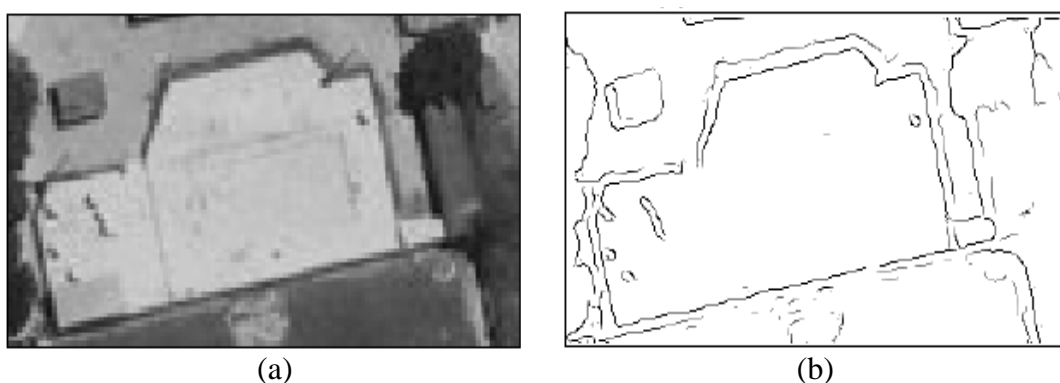


Figura 5 - Imagem original (a), imagem de bordas (b).
Fonte: Artero e Tommaselli (2002).

- Etapa de Limiarização

Segundo Gonzalez e Woods (2000) a limiarização é uma operação normalmente utilizada para eliminar algumas bordas detectadas, mas que, por apresentarem uma baixa magnitude, devem ser desconsideradas, a fim de simplificar o processamento

posterior. Além disso, também pode ser usada para binarizar imagens. Um exemplo de limiarização é ilustrado na Figura 6.

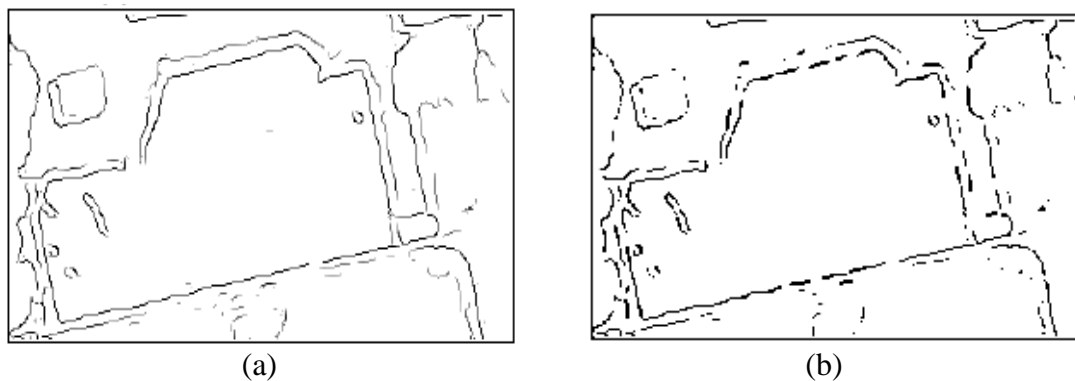


Figura 6 - (a) Imagem de bordas e (b) imagem limiarizada.

Um método eficiente de limiarização deve ser capaz de fornecer automaticamente um valor (limiar), para o qual todos os pixels com valor de brilho inferior a esse limiar devam ser eliminados. Comumente a etapa de limiarização é utilizada para eliminar as bordas insignificantes da imagem, após o processo de detecção de bordas. De maneira geral, é possível afirmar que as bordas menos importantes (e que devem ser eliminadas) são aquelas que possuem uma magnitude muito pequena (ARTERO, 1999).

Existe um grande número de técnicas para a obtenção de um valor específico (limiar), como a técnica de limiarização multi-espectral, a técnica de limiarização ótima (SONKA et al., 1998), a técnica de P-Tile (DOYLE, 1962), método de Otsu (OTSU, 1979), método de Otsu local (ARTERO e TOMMASELLI, 2000), limiarização com histerese (PARKER, 1997), etc, e em cada uma delas utiliza-se algum critério que se considera importante para obter o valor do melhor limiar.

- Etapa de Afinamento de bordas

De acordo com Artero (1999) uma borda normalmente não é obtida como uma linha única, e sim como um conjunto de pixels que a define. Uma etapa posterior ao processo de detecção de bordas, acompanhado de uma limiarização, é o afinamento das bordas.

Assim, a etapa de afinamento, considera que as bordas com espessura de mais de um pixel precisam ser afinadas, para facilitar a aplicação dos processos posteriores,

como a conexão de pixels. O resultado deve ser uma borda com a largura de um pixel. A Figura 7 apresenta um esquema do afinamento de bordas.

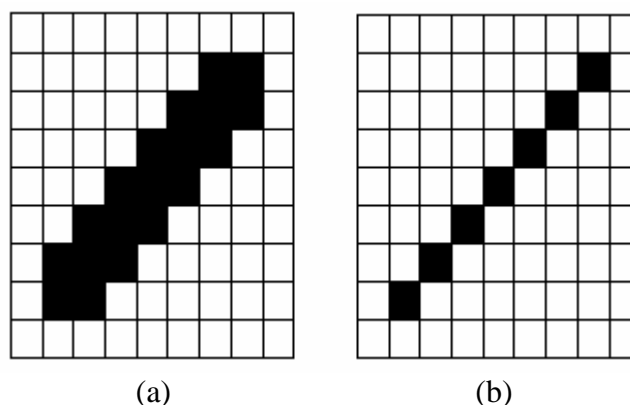


Figura 7 - Processo de afinamento de uma borda em imagem sintética; imagem original (a), borda afinada (b).

Existem vários métodos com o objetivo de resolver este problema, sendo que alguns dos mais conhecidos fazem parte das operações morfológicas de afinamento (*Thinning*) e geração de esqueleto (*Skeletonization*) (SONKA et al., 1998). Tais operações, contudo, são geralmente empregadas em imagens binárias, nas quais todos os pixels possuem apenas dois valores de brilho, que se resumem em cor de fundo e cor de frente do objeto. Neste caso, o afinamento consiste em uma eliminação gradual dos pixels da região, de tal modo que no final do processo sobrem apenas os pixels centrais da região. Quando as linhas a serem afinadas não são binárias, ou seja, são compostas por pixels de brilho variado (diferenças de magnitude), e ainda se verifica que o valor do brilho é maior, de acordo com a proximidade do mesmo em relação à borda, tais métodos não são adequados.

Outra função de afinamento de bordas é a supressão não máxima, que consiste em manter apenas os elementos da linha que são máximos locais (SONKA et al, 1998; ARTERO et al, 2000).

2.4.3 Transformada de Hough

A transformada de Hough é uma das técnicas de extração de feições bastante conhecida na prática de processamento de imagens para detecção e vetorização de linhas. Sua principal vantagem é a viabilização da detecção de formas passíveis de

parametrização, como linhas, círculos e elipses, e conseqüentemente, a discriminação de ruídos da imagem com relação às formas parametrizadas.

A origem desta técnica está nos trabalhos desenvolvidos por Hough na década de 60, que abordou o problema original de determinação de pontos colineares na imagem. A transformação clássica foi estendida para identificar posições de formas arbitrárias por Duda e Hart (1972), conhecida como Transformada de Hough generalizada. Desde então vem sendo utilizada em vários trabalhos como em Blanford (1987), Illingworth e Kittler (1988), Roth e Levine (1993), Hansen e Andersen (1997), Habib (2000), dentre outros.

A transformada de Hough clássica, usada para a detecção de linhas retas, envolve a transformação de cada um dos pontos da imagem de uma linha reta para um espaço de parâmetros. O espaço de parâmetros é definido por uma representação paramétrica usada para descrever linhas. Hough optou por usar os parâmetros angular e linear da reta, e assim o espaço de parâmetros torna-se um plano bidimensional (DUDA e HART, 1972).

No método de Hough para retas, cada ponto da borda de uma imagem é transformado, através de um mapeamento, para células no espaço de parâmetros. Este método baseia-se na Equação (1), que é a equação de uma linha no espaço imagem (BALLARD e BROWN, 1982), sendo a o coeficiente angular e b o coeficiente linear da reta:

$$y = ax + b \quad (1)$$

A Figura 8a ilustra dois pontos distintos (P_1 e P_2) contidos numa linha reta no espaço imagem e a Figura 8b ilustra duas retas no espaço paramétrico (a - b), que correspondem aos dois pontos distintos no espaço imagem.

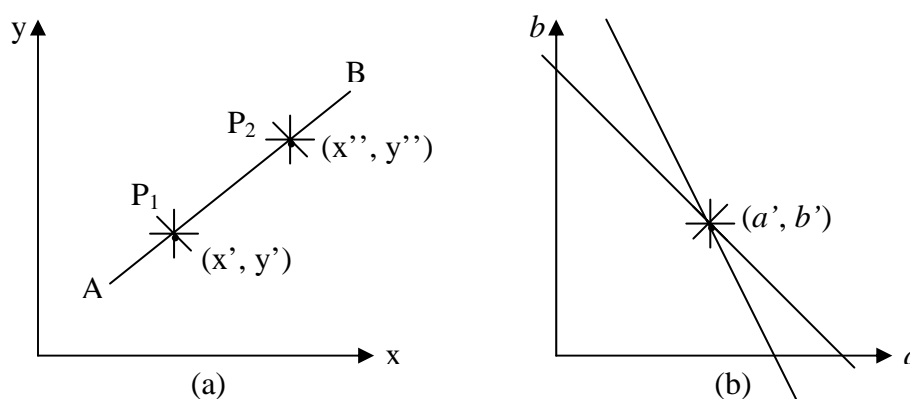


Figura 8 - Uma linha (a) no espaço imagem, (b) no espaço de parâmetros.
Fonte: Adaptada de Ballard e Brown (1982).

Considerando as coordenadas do ponto $P_1 (x', y')$ (Figura 8a) como fixas no espaço imagem, o mapeamento entre os espaços imagem-parâmetros determina uma linha no espaço dos parâmetros (Figura 8b) do ponto considerado.

Seguindo esse raciocínio, um segundo ponto $P_2 (x'', y'')$ também terá uma linha associada no espaço de parâmetros, que se interceptará no ponto (a', b') , correspondente aos coeficientes da linha AB no espaço imagem. Onde as linhas se interceptam no espaço de parâmetros tem-se a indicação da existência e da posição de pontos colineares. De fato, todos os pontos na linha AB produzirão linhas no espaço de parâmetros que se interceptam no ponto (a', b') .

Quando a reta for vertical, ocorre um problema na utilização da equação da reta pelos coeficientes angular e linear da reta (Equação 1), e o sistema não tem solução. Para evitar este tipo de problema, uma outra parametrização da linha pode ser usada, como a de coordenadas polares.

A parametrização com coordenadas polares foi utilizada por Duda e Hart (1972), com a representação de uma linha por:

$$\rho = x \cos \theta + y \operatorname{sen} \theta \quad (2)$$

A geometria correspondente à Equação (2) é mostrada na Figura 9, a qual ilustra a parametrização específica de uma linha reta pelo ângulo θ e a distância normal e algébrica ρ a partir da origem.

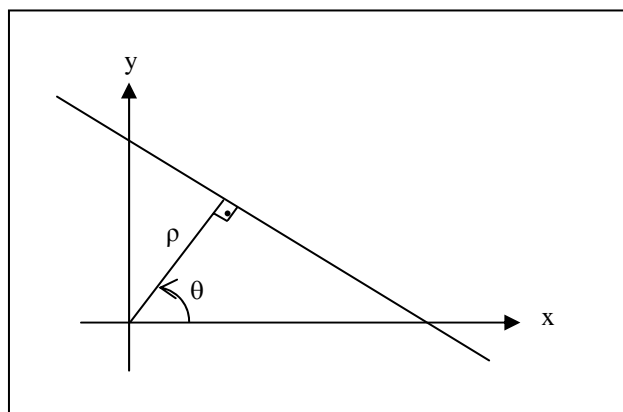


Figura 9 - Parâmetros normais para uma linha.
Fonte: Duda e Hart (1972).

Se o ângulo θ for restringido ao intervalo $[0; \pi]$, os parâmetros normais para uma linha são únicos. Com esta restrição, cada linha no espaço x - y corresponde a um único ponto no espaço θ - ρ .

Supondo agora um conjunto de n pontos $\{(x_1, y_1), \dots, (x_i, y_i)\}$ na imagem (Figura 10), a transformação dos n pontos (x_i, y_i) gera curvas senoidais (Figura 11) no espaço dos parâmetros θ - ρ (DUDA e HART, 1972):

$$\rho = x_i \cos \theta + y_i \sin \theta \quad (3)$$

A Figura 10 ilustra um conjunto de n pontos, contidos na linha reta do espaço imagem e a Figura 11 ilustra as curvas senoidais que representam cada ponto na linha reta do espaço imagem.

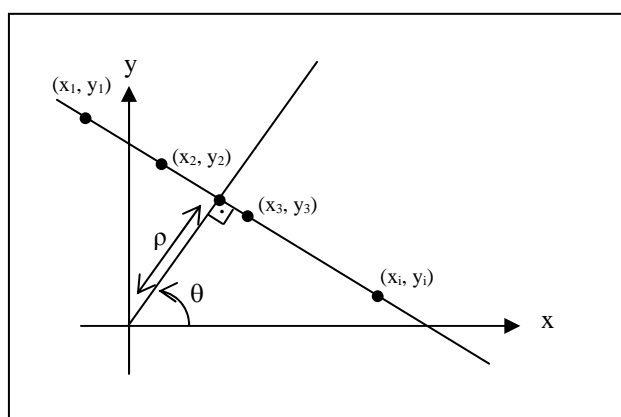


Figura 10 - Projeção dos pontos colineares em uma linha.
Fonte: Duda e Hart (1972).

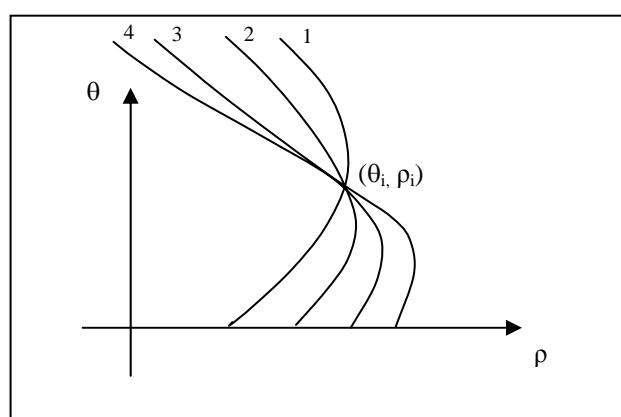


Figura 11 - Curvas senoidais no espaço de parâmetros.

As curvas correspondentes aos pontos colineares da reta na imagem têm um ponto de interseção comum. Este ponto no espaço dos parâmetros $(\theta - \rho)$ define a linha que

passa pelos pontos colineares. Os pontos que se interceptam no espaço de parâmetros para cada linha considerada, indicam os parâmetros correspondentes à forma específica dessa linha no espaço imagem.

Uma propriedade dual da transformação ponto-curva pode ser estabelecida. Considerando um conjunto de n pontos $\{(\theta_1, \rho_1), \dots, (\theta_i, \rho_i)\}$ no espaço dos parâmetros $(\theta - \rho)$, o mapeamento inverso para o espaço imagem pode ser determinado a partir da Equação (4):

$$y = (\rho_i - x \cos \theta_i) / \text{sen} \theta_i \quad (4)$$

As propriedades da transformação ponto-curva podem ser resumidas como segue (DUDA e HART, 1972):

- Propriedade 1: um ponto no plano da imagem corresponde à uma curva senoidal no plano dos parâmetros;
- Propriedade 2: um ponto no plano dos parâmetros corresponde à uma linha reta no plano da imagem;
- Propriedade 3: pontos contidos na mesma linha reta no plano da imagem correspondem à curvas passando por um ponto comum no plano dos parâmetros;
- Propriedade 4: pontos contidos na mesma curva no plano dos parâmetros correspondem a linhas sobre o mesmo ponto no plano da imagem.

Apesar da Transformada de Hough ser uma técnica robusta e muito conhecida, apresenta dificuldades quanto à necessidade de uma grande estrutura de dados. Além disso, não se consegue definir o início e o fim das retas determinadas, o que pode ser realizado em uma etapa posterior à identificação das linhas retas. Por outro lado, os problemas de oclusão e ruídos que ocorrem em imagens orbitais podem ser resolvidos com o apoio deste método.

A grande estrutura de dados usada na técnica de Hough, relacionada a uma matriz de acumuladores (espaço de parâmetros), pode ser restringida usando um intervalo específico para os parâmetros $(\theta-\rho)$, se esses parâmetros forem conhecidos a priori.

Para o caso da transformada de Hough para retas, uma possibilidade, é usar a informação a priori da orientação aproximada da reta que se deseja determinar, que pode ser

obtida, por exemplo, pelo cálculo das coordenadas dos extremos dessa reta, definida no espaço objeto, projetadas para o espaço imagem. Assim, a variação de $(\theta-\rho)$ é dada apenas nesse intervalo, diminuindo a dimensão da matriz de acumuladores no espaço de parâmetros.

Além da Transformada de Hough para retas, existem a Transformada de Hough para círculos e a Transformada de Hough Generalizada (BALLARD e BROWN, 1982).

2.4.4 Extração de linhas com precisão subpixel

No processo de extração de feições, muitas são as dificuldades existentes que devem ser contornadas a fim de determinar com sucesso as feições de interesse da cena, além da complexidade na automatização de todo o processo.

Segundo Bazan et al. (2004) dentre as dificuldades em se automatizar o processo de extração de feições, estão alguns problemas como a identificação inequívoca das entidades de interesse e o refinamento da posição das feições, a fim de se atingir uma posição com precisão subpixel.

Dentre as possibilidades de técnicas usadas nas etapas do processo de extração, um exemplo é a determinação das coordenadas de pontos isolados ou de pontos contidos em um segmento de reta, que pode ser realizada com precisão subpixel.

Grande parte dos processamentos realizados em Fotogrametria digital envolve a localização de pontos, como calibração, resseção espacial e a geração de MDT (Modelo Digital do Terreno), etc. Nesses processos a busca por uma determinação mais acurada das coordenadas dos pontos torna-se de grande interesse, visto que pode ocasionar uma melhora na precisão dos resultados subseqüentes. Ou seja, para alcançar resultados comparáveis com os instrumentos utilizados na Fotogrametria analítica, é necessário determinar as posições dos pontos homólogos com precisão subpixel.

Uma possibilidade para a determinação de pontos com qualidade subpixel é usar o procedimento de *matching* por mínimos quadrados, apresentado em Agouris e Schenk (1992) e Grün (1996). Neste procedimento o modelo matemático inclui parâmetros de natureza geométrica e radiométrica.

A questão da importância de medidas com qualidade subpixel, pode ser encontrada em vários trabalhos, como Galo e Tozzi (2002) e Schenk (1999).

Apesar da maioria dos procedimentos fotogramétricos utilizarem pontos, a extração automática de retas, considerando também uma abordagem subpixel, é uma alternativa que pode conduzir a bons resultados.

Neste sentido, Telles (2004) desenvolveu uma metodologia para a detecção de linhas retas em imagens, bem como o cálculo do eixo central da feição linear com precisão subpixel. Em sua abordagem, alguns passos são necessários para essa determinação:

- Suavização com preservação de bordas;
- Eliminação dos valores de brilho menores que um limiar estabelecido;
- Afinamento de bordas por esqueletonização;
- Cálculo da direção da linha;
- Supressão não máxima subpixel, e;
- Conexão dos pontos.

Esta metodologia considera que, após a aplicação das quatro primeiras etapas, o algoritmo de extração subpixel percorre a imagem e para cada pixel diferente de zero na matriz resultante do afinamento, é calculada uma direção perpendicular à direção obtida anteriormente para a feição linear naquele pixel. Nessa direção são calculadas posições subpixel, com uma unidade de pixel de distância entre si. Para cada posição subpixel faz-se uma interpolação bi-linear com os níveis de brilho dos pixels vizinhos da imagem resultante da limiarização. O resultado de cada interpolação é atribuído as suas respectivas posições subpixel (TELLES, 2004).

Depois de realizar a aquisição de todos os valores de brilho dos pontos pertencentes à direção perpendicular, a distância média ponderada pelos valores de brilho é calculada, com a finalidade de encontrar uma posição subpixel média no eixo central da feição linear.

Bazan et al. (2005) apresentam duas abordagens para a extração de feições lineares com precisão subpixel. Estas abordagens compreendem basicamente o refinamento das coordenadas de pontos (pixels) pertencentes às retas. Na etapa de segmentação prévia, que envolve as operações de suavização, limiarização e afinamento foi mantida a seqüência usada por Telles (2004).

Quanto às técnicas de refinamento, uma é baseada no ajuste de uma parábola ao perfil transversal dos níveis de cinza e a outra é baseada no ajuste de uma superfície cilíndrica parabólica. Estas abordagens se baseiam no ajustamento de modelos

paramétricos, pelo método dos mínimos quadrados (MMQ), à região que abrange a vizinhança da feição linear a ser refinada.

No procedimento de ajuste de parábola, o processo deve ser efetuado para todos os pixels do eixo médio da feição linear (resultante da esqueletonização), nos quais se utiliza uma parábola para modelagem e ajustamento do perfil vertical, por entender que a forma da parábola modela melhor o comportamento dos níveis de cinza interpolados ao longo deste perfil, para cada ponto subpixel calculado.

A Figura 12 exemplifica a idéia da técnica de ajuste pela forma parabólica. Neste exemplo, tem-se que a imagem apresenta um fundo escuro e as feições retas, pixels com tonalidades mais claras. Assim, o ponto crítico da parábola a ser determinado corresponde a um ponto de máximo. No caso de um fundo claro e feições escuras, o ponto crítico da parábola corresponde ao ponto de mínimo.

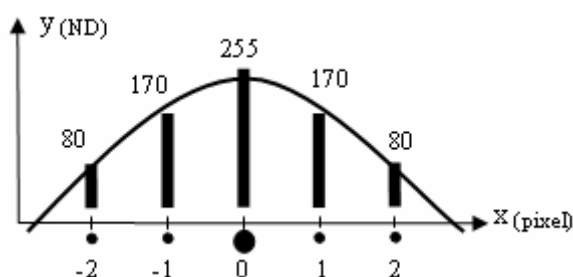


Figura 12 - Perfil dos ND (Números Digitais) na direção transversal a uma borda.
Fonte: Bazan et al. (2005).

Na Figura 12 o eixo y representa as observações, ou seja, os valores de cinza interpolados, e o eixo x o perfil transversal dos pontos subpixel calculados, os quais possuem um pixel de distância entre si ao longo do perfil transversal. A função parabólica então ajustada a este perfil e as coordenadas subpixel são determinadas em função do ponto crítico a partir da parábola ajustada (BAZAN et al., 2005).

O ponto crítico é obtido a partir dos coeficientes da parábola (a , b e c) estimados pelo MMQ, sendo este ponto o local em que o gradiente de y com relação a x se anula, ou seja, a primeira derivada da função igual a zero:

$$\frac{dy_{\text{perfil}}}{dx_{\text{perfil}}} = \frac{d(ax_{\text{perfil}}^2 + bx_{\text{perfil}} + c)}{dx_{\text{perfil}}} = 2ax_{\text{perfil}} + b = 0 \quad (5)$$

A segunda abordagem de refinamento das feições segmentadas, apresentada por Bazan et al. (2005) é baseada no ajuste de uma superfície cilíndrica parabólica à região de vizinhança de cada pixel ao longo do eixo médio da feição esqueletonizada. A Figura 13 ilustra a superfície cilíndrica parabólica. Verifica-se nesta figura que o ponto $P(x, y, z)$ é pertence à superfície cilíndrica e o ponto $Q(x, y, z)$ da diretriz também pertence ao vetor que passa pelos pontos P e Q , sendo que esse vetor (que passa por P e Q) é paralelo à geratriz.

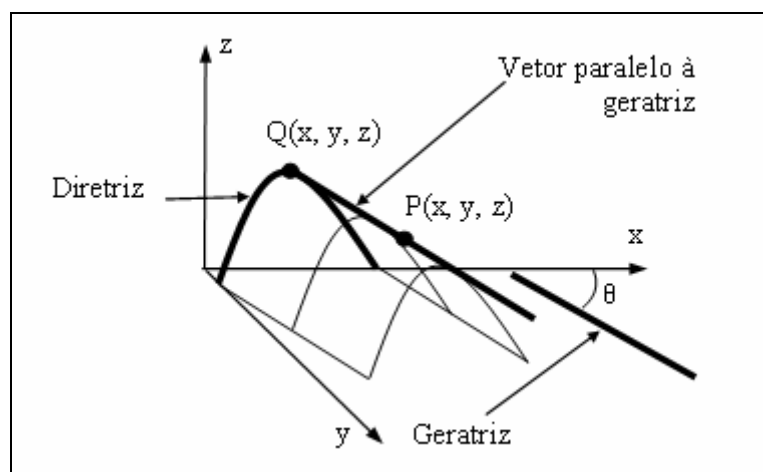


Figura 13 - Superfície cilíndrica parabólica.
Fonte: Bazan et al. (2005).

A idéia desta abordagem está relacionada ao ajuste de uma superfície cilíndrica parabólica em torno da feição reta segmentada. A intersecção de um plano passante pelo eixo médio da superfície cilíndrica, como mostra a Figura 13, resulta em uma parábola que permite a determinação das coordenadas da feição segmentada, com precisão subpixel, por interpolação no entorno do ponto em questão.

2.5 Levantamento das feições lineares no espaço objeto

A determinação das feições de controle (no espaço objeto) pode ser realizada de várias formas, usando equipamentos e técnicas de posicionamento que sejam mais adequadas ao tipo de situação requerida.

O Sistema de Posicionamento Global, mais conhecido por GPS (Global Positioning System), é um sistema de posicionamento por satélite, muito utilizado para determinar posições de estações sobre a superfície da Terra. O posicionamento utilizando GPS pode ser realizado na forma absoluta, relativa ou DGPS (Differential GPS).

No posicionamento absoluto ou por ponto necessita-se de apenas um receptor, e a posição do ponto é determinada em tempo real ou pós-processada, no sistema de referência vinculado ao GPS, ou seja, o WGS 84 (*World Geodetic System – 84*). Este método de posicionamento é bastante utilizado para aplicações de baixa precisão.

No posicionamento relativo, a posição de um ponto é determinada com relação à de outro(s) ponto(s), cujas coordenadas sejam conhecidas. As coordenadas do(s) ponto(s) conhecido(s) devem estar referenciadas ao sistema WGS 84 ou num sistema compatível com esse. Neste tipo de posicionamento deve-se dispor de no mínimo dois receptores, ou utilizar apenas um, e dispor de dados obtidos de uma ou mais estações de referência dos Sistemas de Controle Ativos (SCA). Este tipo de posicionamento é utilizado quando se deseja coordenadas precisas.

No DGPS, um receptor GPS é estacionado numa estação de referência onde são calculadas correções de coordenadas ou de pseudo-distâncias, que são transmitidas para os usuários da estação a ser posicionada. A técnica de DGPS foi desenvolvida visando reduzir os efeitos da disponibilidade seletiva imposta ao GPS no modo absoluto.

De acordo com Monico (2000), vários métodos intermediários surgiram entre o posicionamento relativo estático e o cinemático com uso de GPS. Uma classificação é dada de acordo com:

- Método estático rápido;
- Método semicinemático; e
- Método cinemático.

No método cinemático, o receptor coleta dados enquanto está se deslocando, permitindo estimar as coordenadas de sua trajetória. Quando o receptor é desligado durante o deslocamento de uma estação para outra, trata-se do método estático rápido. Se o receptor tiver de manter sintonia com os satélites durante o deslocamento, mesmo sem estar armazenando as observações, trata-se do método semicinemático (MONICO, 2000).

Como o enfoque desse trabalho é a determinação dos segmentos de reta, será dada ênfase à técnica de posicionamento relativo cinemático.

2.5.1 Posicionamento relativo cinemático

Num posicionamento cinemático a coleta da trajetória é determinada por uma série de pontos que caracterizam as coordenadas desses pontos coletados a cada período de tempo. Esse período é determinado de acordo com a fidelidade com que se queira representar a trajetória, ou seja, o ajuste mais adequado da trajetória.

Segundo Seeber (2003) para muitas finalidades, requer-se a determinação de coordenadas precisas na trajetória de movimento do receptor GPS. Nestes casos, não é aceitável uma perda de sinal sem a possibilidade de recuperar ciclos ou ambigüidades enquanto a antena da plataforma está se movendo. Por isso, são necessários métodos que sejam independentes de técnicas de inicialização estáticas, e que incluam a capacidade de recuperar ciclos e/ou solucionar as ambigüidades durante o movimento. Tais técnicas são chamadas de técnicas de solução da ambigüidade *on the way* ou *on the fly* e podem ser encontradas em (SEEBER e WUBBENA, 1989; ABIDIN e WELLS, 1990).

No posicionamento relativo cinemático a observável fundamental utilizada é a fase da onda portadora, porém o uso da pseudo-distância é muito importante para a solução do vetor de ambigüidades. Os dados deste posicionamento podem ser pós-processados ou determinados em tempo real.

No caso da solução do vetor de ambigüidades, existem duas opções: solucioná-lo antes de iniciar o movimento, ou estimá-lo em conjunto com os dados coletados em movimento; neste caso não deve ocorrer perda de sintonia com os satélites, assim o vetor de ambigüidades permanecerá o mesmo em todo o levantamento (MONICO, 2000).

2.6 Correspondência de Imagens

O processo de correspondência de imagens tem como finalidade a identificação e medição de entidades homólogas em duas ou mais imagens ou entre uma imagem e uma descrição simbólica, e está envolvido na maior parte dos processos fotogramétricos digitais, como a orientação de imagens, aerotriangulação, geração de modelos digitais de terrenos, etc.

Diferentemente da Fotogrametria analógica e analítica, onde o processo de correspondência é realizado por meio de um operador humano, na Fotogrametria digital, a determinação da correspondência é geralmente realizada automaticamente, sendo uma das

tarefas que possibilitam a automação de processos, como por exemplo, a orientação interior de imagens.

O problema de correspondência de imagens, na Fotogrametria digital ainda está longe de ser resolvido automaticamente por completo. Os problemas que mais persistem são oclusões, distorções do relevo, descontinuidades na superfície e diferenças radiométricas não-lineares entre as imagens (CHO et al., 1992).

Geralmente os algoritmos de correspondência são diferenciados com relação ao tipo de primitiva que é usada no processo, e suas classificações variam de acordo com cada autor. Segundo Heipke (1996) os métodos de correspondência possuem dois grupos de primitivas:

- Correspondência baseada em áreas: é associada com a correspondência dos tons de cinza das imagens, ou seja, comparam-se os níveis de cinza de pequenas áreas nas duas imagens e a similaridade é medida por correlação estatística, podendo ser seguida por técnicas de mínimos quadrados. É o método mais usado em Fotogrametria;
- Correspondência baseada em feições: neste método feições ou atributos são extraídos nas imagens para a correspondência. Estas feições ou atributos podem ser locais, tais como pontos, bordas, linhas e regiões, ou globais, como polígonos ou estruturas, que são descrições mais complexas do conteúdo das imagens. Cada entidade é caracterizada por atributos, tais como a posição (coordenadas), orientação e magnitude das bordas (gradientes), comprimento e curvatura de linhas, tamanho e brilho médio de regiões, entre outros. Além dos atributos, podem ser estabelecidas relações entre as feições. Tais relações podem ser geométricas, como o ângulo entre dois lados de polígonos adjacentes ou a distância mínima entre duas bordas; radiométricas, como a diferença entre os tons de cinza ou sua variância entre duas regiões adjacentes; ou ainda topológicas. A correspondência utilizando feições globais é também conhecida como correspondência relacional (*relational matching*).

Para o caso das imagens CBERS, a correspondência entre pontos homólogos nos espaços objeto e imagem, também pode ser realizada usando a

correspondência baseada em área, mas dispondo de uma imagem com georreferenciamento de boa precisão como referência. Esse georreferenciamento pode se feito, por exemplo, usando uma transformação plana 2D com pontos de controle bem distribuídos.

A partir da imagem de referência CBERS, alguns pontos, de preferência próximos ao centro da imagem, podem ser selecionados e o processo de correspondência por área pode ser aplicado considerando os pontos homólogos na outra imagem CBERS considerada (mesma cena, ou seja, mesma órbita-ponto). A escolha de pontos na região central da imagem visa evitar problemas, quando se quer usar uma seqüência de imagens temporais, pois algumas mudanças podem ocorrer com relação à órbita-ponto dessas imagens.

Com a melhora da correção geométrica da imagem CBERS considerada, as feições de controle projetadas para o espaço imagem, teriam pequena rotação e translações comparadas às feições imagem, e diante de um espaço de busca reduzido, a proximidade poderia ser o critério de correspondência entre as feições homólogas.

2.7 Sensores Digitais

Um sensor digital é um arranjo retangular de fotodetectores que capta a energia refletida e a quantifica como uma imagem. Esse dispositivo de aquisição de imagens digitais usa detectores de estado sólido para absorver a energia refletida, ao invés de captá-la por meio de cristais de prata, como na emulsão de filmes (WOLF e DEWITT, 2000).

Os tipos mais comuns de detectores de estado sólido atualmente são o *charge-coupled device* (CCD) e o *Complementary metal-oxide-semiconductor* (CMOS).

O número de variações quanto às configurações CCD é grande, mas o princípio de operação básica é o mesmo.

Um detector CCD armazena uma carga elétrica proporcional à intensidade da luz incidente. Essa carga é então é amplificada e convertida da forma analógica para digital.

Dentre as categorias de sensores digitais, encontram-se as câmaras de quadro, sensores de varredura eletrônica e sensores lineares (*pushbroom*, *tri-linear*) que fazem uso dos detectores CCD.

2.7.1 Câmaras de quadro digitais

Uma câmara digital de quadro tem características geométricas similares a uma câmara de quadro com filme. Ela consiste de um arranjo bi-dimensional de elementos CCD ou CMOS, denominados de sensor *full-frame*. O sensor é montado no plano focal de uma câmara com um único conjunto de lentes. No processo de aquisição, uma imagem exposta considerando todos os CCDs simultaneamente, gera a imagem digital (WOLF e DEWITT, 2000). A Figura 14 ilustra a geometria de uma câmara de quadro digital.

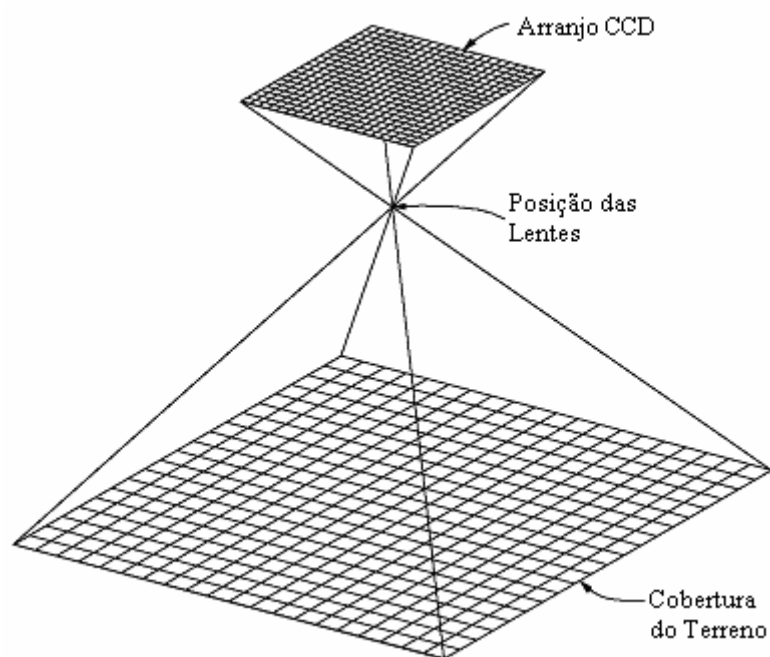


Figura 14 - Geometria de uma câmara de quadro digital.
Fonte: Adaptada de Wolf e Dewitt (2000).

Apesar do uso consolidado que as câmaras métricas de quadro com filme sempre tiveram na Fotogrametria convencional, as câmaras de quadro digital raramente são usadas em plataformas orbitais, devido a algumas desvantagens, como a captura de uma pequena área no terreno.

2.7.2 Sensores de varredura mecânica

Este tipo de sensor geralmente usa um espelho que gira ou oscila na direção transversal à trajetória do veículo.

Para o caso de um *scanner spot* esse método é similar a de um sensor linear exceto que a imagem é formada por um pixel por instante ao invés de uma linha por instante. Com o avanço do veículo, o espelho oscila de lado a lado para adquirir uma única linha de pixels, embora alguns sistemas adquiram um número maior de linhas em cada instante de imageamento (WOLF e DEWITT, 2000). Uma ilustração da geometria de um *scanner spot* é apresentada na Figura 15.

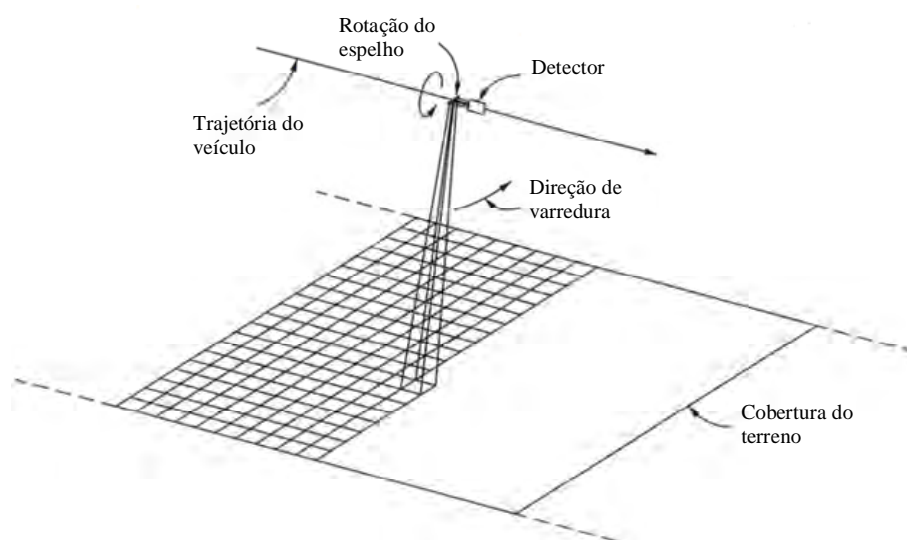


Figura 15 - Geometria de varredura mecânica.
Fonte: Adaptada de Wolf e Dewitt (2000).

Apesar da Figura 15 mostrar as linhas individuais perpendiculares à trajetória do veículo, essas linhas imageadas são levemente distorcidas devido ao movimento longitudinal do veículo durante o deslocamento da trajetória. Este efeito, bem como outras distorções características de sensores de varredura mecânica requerem que sejam aplicadas correções geométricas à imagem bruta.

Além das distorções na formação da cena, de uma linha para outra, também podem ocorrer distorções na concatenação dos pixels. A Figura 16 ilustra um caso desse tipo de situação, com graus elevados de distorções, apenas para fim ilustrativo.

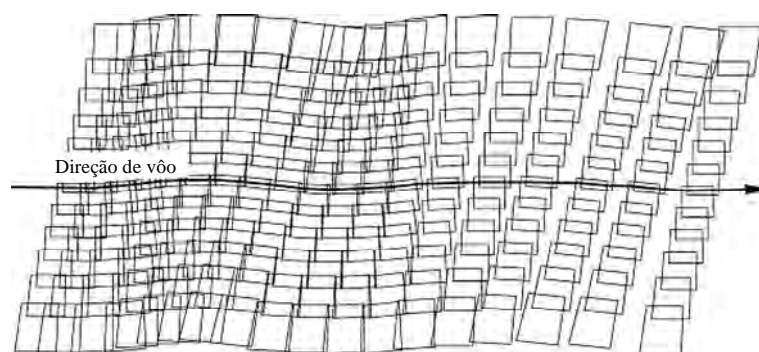


Figura 16 - Distorções na imagem para sistemas de varredura mecânica.
Fonte: Adaptada de Breuer e Albertz (2000).

Segundo Wolf e Dewitt (2000) a estabilidade geométrica de imagens obtidas por sensores de varredura mecânica é na maioria das vezes mais suscetível a efeitos de distorção devido ao movimento irregular do veículo. Desta forma, eles raramente são usados para mapeamento fotogramétrico, e mais destinados a trabalhos com baixa exatidão.

- Câmaras Panorâmicas

As câmaras panorâmicas são mais um exemplo de sensor de varredura mecânica. Na configuração de uma câmara panorâmica, a linha imageada tem sua orientação paralela à direção de voo e, sua varredura ocorre perpendicularmente ao trajeto de voo. Deste modo um amplo campo de visada pode ser imageado (Figura 17).

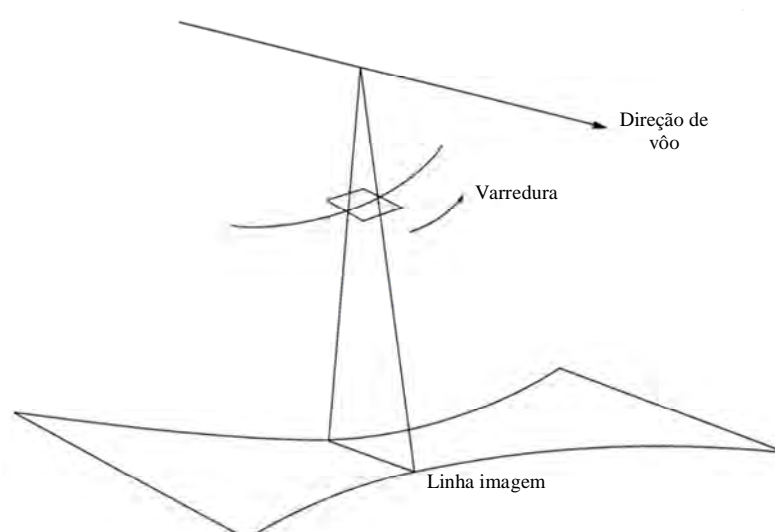


Figura 17 - Geometria de uma câmara panorâmica.
Fonte: Adaptada de Mikhail et al. (2001).

Um “scanner” linear panorâmico possui um sensor linear no plano imagem que é montado com um suporte giratório em um telescópico.

A geometria de câmaras panorâmicas é extremamente complexa, devido a diversos fatores. Dentre eles, tem-se a escala da imagem que muda drasticamente com relação à varredura na direção oblíqua, visto que a distância de um objeto muda com a altura de vôo do nadir para o horizonte.

2.7.3 Sensores lineares

De acordo com Gupta e Hartley (1997), um sensor *pushbroom* consiste de um sistema óptico que projeta uma imagem em um arranjo linear de sensores, tipicamente um arranjo CCD. Em um dado instante, apenas alguns pontos são imageados no plano definido pelo centro perspectivo e a linha que contém o sensor. Este plano é definido como plano de visada instantâneo ou simplesmente plano de visada. A Figura 18 ilustra o conceito de um sensor *pushbroom*.

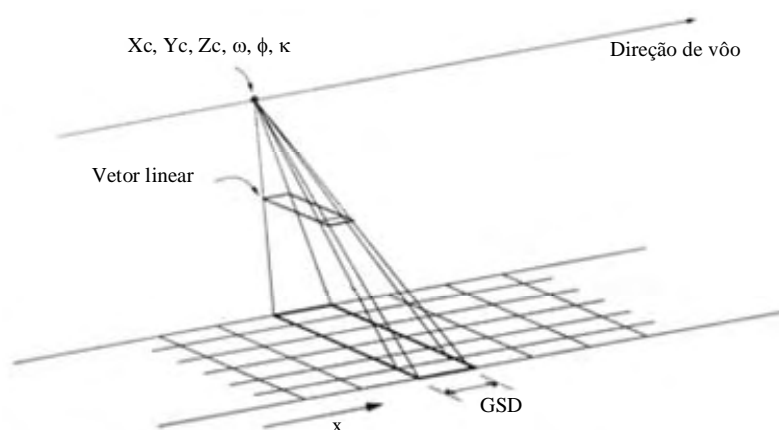


Figura 18 - Esquema de um sensor linear *pushbroom*.
Fonte: Adaptada de Mikhail et al.(2001).

Como o sensor *pushbroom* é montado em uma plataforma que se move, conseqüentemente o plano de visada varre uma região do espaço. O sensor e o plano de visada são aproximadamente perpendiculares à direção da trajetória da plataforma. A magnitude da carga acumulada por cada célula detectora durante um intervalo fixo de tempo, origina o valor de brilho do pixel naquele local. Assim, em intervalos regulares de tempo são capturadas imagens unidimensionais (1D) do plano de visada, e o conjunto destas imagens 1D constitui uma imagem 2D (GUPTA e HARTLEY, 1997).

Segundo Mikhail et al. (2001) a configuração de um sensor *pushbroom* mais comum é a que usa sensores de estado-sólido, visto que os arranjos lineares são mais fáceis de construir do que os arranjos em área e, nenhum rastreamento mecânico é necessário. Esta geometria é usada em câmaras de reconhecimento e também em muitos sensores orbitais, como o satélite SPOT e o sensor CCD do CBERS.

No caso dos sensores *pushbroom* linear não há uma geometria do tipo perspectiva central única e cada linha da imagem é tomada em um instante diferente, e a imagem é formada pelo movimento de varredura, à medida que a plataforma se desloca ao longo de sua trajetória. Como consequência, a cena formada é uma combinação das imagens formadas em diferentes posições do centro perspectivo e, conseqüentemente, diferentes parâmetros de orientação (POE). A Figura 19 ilustra essa situação.

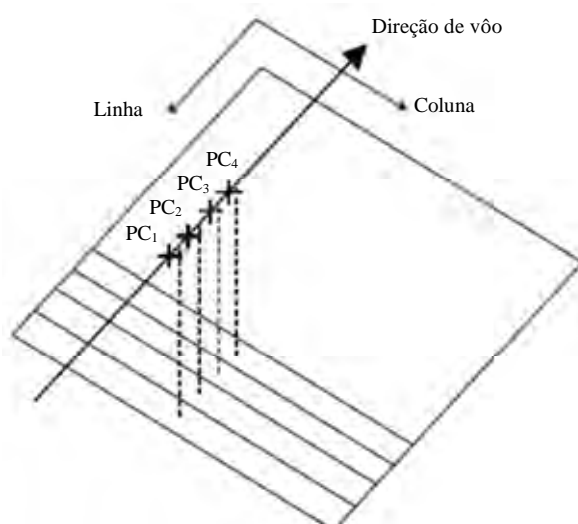


Figura 19 - Cena formada por um *scanner pushbroom*.

Fonte: Adaptada de Habib et al., (2000).

Os sensores lineares *pushbroom* contêm apenas uma linha de CCDs (CCD linear), mas alguns destes sistemas possuem a capacidade de girar ao longo da direção de vôo para rastrear novamente a mesma área de interesse e, desse modo, fornecer imagens estéreo adquiridas a partir da mesma órbita, mas em diferentes direções (*along track*) como é o caso do satélite Ikonos, ou em órbitas vizinhas (*cross track*).

No sistema de varredura linear *pushbroom* a instabilidade de imageamento é mais acentuada em plataformas aéreas, quando comparadas às plataformas espaciais, visto que, durante a trajetória as plataformas aéreas estão mais sujeitas às turbulências atmosféricas, provocando mudanças inesperadas de atitude e posição da plataforma. Como consequência,

com o movimento da plataforma, podem ocorrer distorções na formação da cena, de uma linha para a outra.

Além disso, algumas situações que ocorrem com relação a problemas na aquisição da cena durante a trajetória de vôo, principalmente envolvendo a velocidade, podem causar distorções no processo de geração das imagens, como mostra a Figura 20.

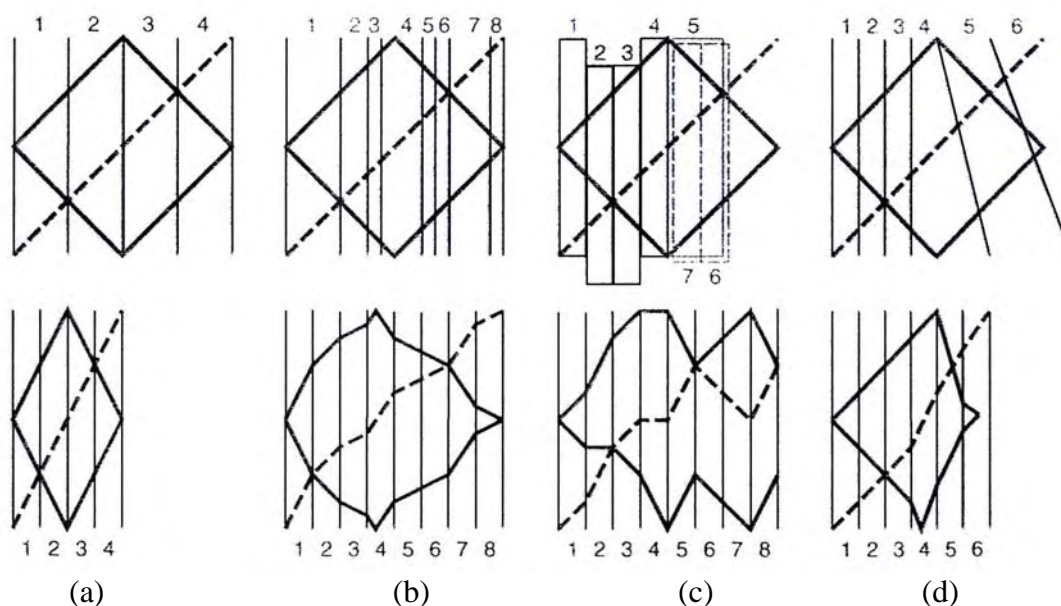


Figura 20 - Ilustração de uma cobertura desigual do terreno por uma câmara linear, onde a parte superior ilustra a projeção da linha no terreno e a parte inferior a linha na imagem.

Fonte: Adaptada de Schenk (1999).

Na Figura 20 (a), apresenta-se a situação em que a velocidade da plataforma é duas vezes maior que a velocidade normal e a área no terreno é recoberta na metade do tempo. A Figura 20 (b) ilustra um exemplo de velocidade irregular, causando uma distorção na imagem. A Figura 20 (c) ilustra dois problemas de rotação com os ângulos ω (rolagem) e φ (arfagem). Considerando uma pequena rotação do ângulo ω e do ângulo φ , com relação ao eixo longitudinal da plataforma, tem-se como consequência, um deslocamento lateral das linhas (linha 2 e 3) e a velocidade pode até mesmo ser negativa (linhas 6 e 7), respectivamente, resultando numa imagem bastante distorcida. A Figura 20 (d) apresenta o efeito de uma rotação em κ (guinada) produzindo também uma imagem distorcida.

Fica claro que, os exemplos apresentados na Figura 20, são bastante exagerados. No entanto, eles servem para mostrar um problema fundamental das câmaras lineares com relação à determinação da orientação exterior de todas as linhas (SCHENK, 1999).

De modo geral, a rigidez geométrica de imagens *pushbroom* linear é fraca, visto que cada linha é uma imagem independente e tem sua própria posição e orientação devido ao movimento da plataforma. Isto pode ser levemente melhorado, com o uso de sensores de navegação como o Sistema de Posicionamento Global (GPS) ou Sistema de Navegação Inercial (INS), giroscópios, sensores de horizonte, sensor solar; câmara estelar e também usando combinações de sensores lineares (MIKHAIL et al., 2001).

- Sensores Tri-lineares *Pushbroom*

De acordo com Schenk (1999) as câmaras *tri-lineares* utilizam em sua configuração três vetores CCD lineares, que são montados no plano focal posicionados para a direção *forward*, *nadir* e *backward*, como ilustra a Figura 21.

Estes sensores lineares são paralelos entre si e orientados perpendicularmente à direção de vôo da aeronave. Com esta configuração é obtida uma tripla cobertura da superfície. Cada vetor linear fornece o imageamento contínuo do terreno, obtendo deste modo, três faixas independentes. O desafio neste tipo de geometria é o problema de associação entre as faixas.

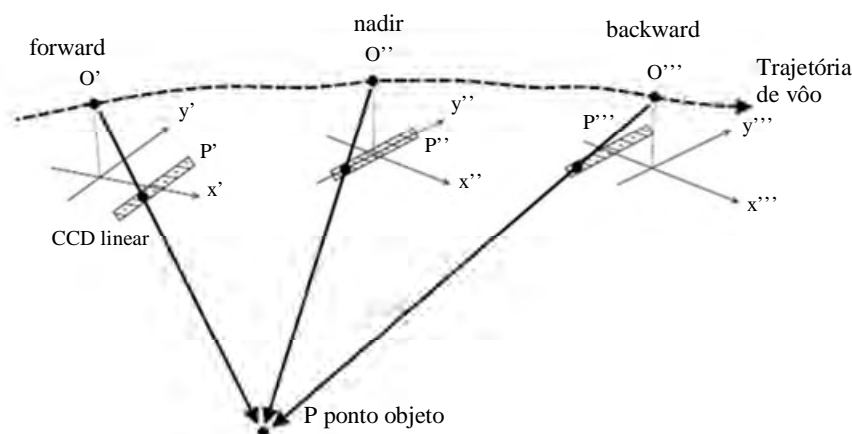


Figura 21 - Princípio da Geometria da câmara *tri-linear*.

Fonte: Adaptada de Fritsch (1997).

Com o resultado do movimento da aeronave, que varre as faixas da superfície do terreno a partir do princípio *pushbroom*, em três faixas independentes em diferentes ângulos, cada objeto no terreno é imageado no mínimo por três vezes. Com esta configuração tem-se a possibilidade da geração de imagens estéreo.

As três linhas adquiridas pelo sensor *tri-linear* podem ser comparadas a três linhas de uma imagem de quadro com os mesmos parâmetros geométricos. Ou seja, os parâmetros de orientação são os mesmos para essas três linhas, capturadas no mesmo instante.

2.8 Geometria do Sensor *Pushbroom*

2.8.1 Modelo de sensor

O modelo de sensor, ou orientação interior, define o sensor ou características de câmara necessárias para a reconstrução dos feixes de raios do espaço objeto a partir dos pontos imagem correspondentes (MIKHAIL et al., 2001).

Dentre essas características inclui-se a distância focal, ou distância principal, a localização do ponto principal no plano imagem, e uma descrição das distorções das lentes.

A Figura 22 ilustra a geometria de ambos os casos, câmara de quadro e sensor *pushbroom* linear, com a representação da distância focal, um dos parâmetros do modelo do sensor.

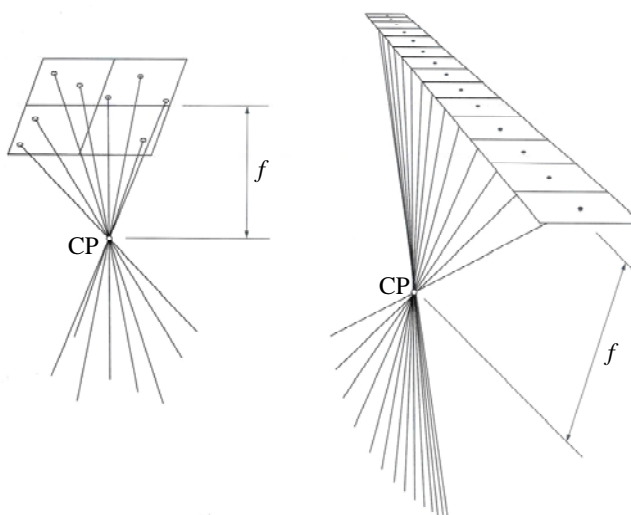


Figura 22 - Modelo de sensor para câmara de quadro (a) e sensor pushbroom (b).
Fonte: Adaptada de Mikhail et al.(2001).

Segundo Mikhail et al, (2001) o ponto principal de autocolimação, é definido pela intersecção do raio de luz perpendicular ao plano da fotografia, antes de passar pelo sistema de lentes.

No caso das câmaras analógicas, a posição deste ponto é especificada pelas coordenadas (x_0 e y_0) no sistema fiducial. Para sensores digitais, estas coordenadas estão normalmente referenciadas ao sistema de coordenadas com origem no centro da imagem (equivalente ao fiducial). Já a distorção das lentes ocorre quando os raios que saem do ponto nodal posterior (no espaço imagem) não são paralelos aos correspondentes no espaço objeto (WOLF e DEWITT, 2000).

Os parâmetros de sensor são determinados durante a calibração da câmara ou do sensor. Estes parâmetros são geralmente determinados em condições ideais de laboratório, mas eles podem ser estimados durante um ajustamento por feixes de raios (auto-calibração) (MIKHAIL et al., 2001), desde que haja redundância suficiente e configuração adequada das estações de exposição e dos pontos de controle.

2.8.2 Modelo de plataforma

O modelo de plataforma, ou orientação exterior, estabelece a posição e orientação de um feixe de raios com relação ao sistema de coordenadas do espaço objeto. Cada feixe de raios requer seis parâmetros independentes, três de posição e três de orientação. No caso de imagens de quadro um feixe de raios representa toda a imagem. Para o caso de sensores lineares, cada linha da cena define um novo feixe de raios, com seus seis parâmetros de orientação exterior (MIKHAIL et al., 2001).

Diversos modelos de plataforma para imagens orbitais podem ser empregados para representar matematicamente o relacionamento entre as coordenadas no espaço imagem e as coordenadas no espaço objeto. Tais modelos podem ser classificados em duas categorias: modelos rigorosos (ou físicos) e modelos não paramétricos (ou generalizados).

Segundo Kim e Dowman (2006) os modelos rigorosos empregam os parâmetros físicos do sensor e da plataforma, como a distância focal, as dimensões dos dispositivos CCDs (modelo do sensor), parâmetros orbitais do satélite ou ângulos de atitude em suas representações matemáticas (modelo de plataforma).

Na maioria das vezes os modelos rigorosos que se utilizam dos parâmetros de posição e orientação do sensor, utilizam as equações de colinearidade modificadas. Nessas equações são incorporados polinômios para modelar a geometria de deslocamento dos sensores *pushbroom* linear.

Outra categoria de modelos rigorosos são os modelos baseados nos parâmetros de órbita do satélite, que se utilizam da posição, vetores de velocidade e ângulos de atitude (*roll*, *pitch* e *yaw*) da plataforma do satélite como parâmetros do modelo (KIM e DOWMAN, 2006).

Os modelos não paramétricos não fazem uso dos parâmetros físicos do sensor e geralmente se utilizam de transformações baseadas apenas em pontos de controle do terreno, como por exemplo, o modelo de funções racionais (TONOLO e POLI, 2003).

2.8.2.1 Modelos rigorosos baseados em parâmetros de órbita

Segundo Kim e Dowman (2006) os modelos orbitais fazem uso dos parâmetros do sistema de referência orbital, que podem ser representados pela inclinação da órbita, ascensão reta do nodo ascendente e anomalia média, ou pela posição e vetores de velocidade do satélite. A Figura 23 representa a configuração do sistema de referência orbital (linhas tracejadas) em relação ao sistema do sensor.

Como o sistema do sensor e o sistema de referência orbital não são alinhados, os ângulos formados entre esses sistemas são considerados os ângulos de atitude, rolagem (*roll*), arfagem (*pitch*) e guinada (*yaw*). Nota-se que os ângulos de atitude representam um conjunto particular de rotações, mas eles são definidos com relação aos eixos de rotação físicos correspondentes. O eixo *roll* é definido pela direção de movimento do satélite, o eixo *yaw* pela direção do vetor CCD e o eixo *pitch* pelo eixo ortogonal aos outros dois eixos.

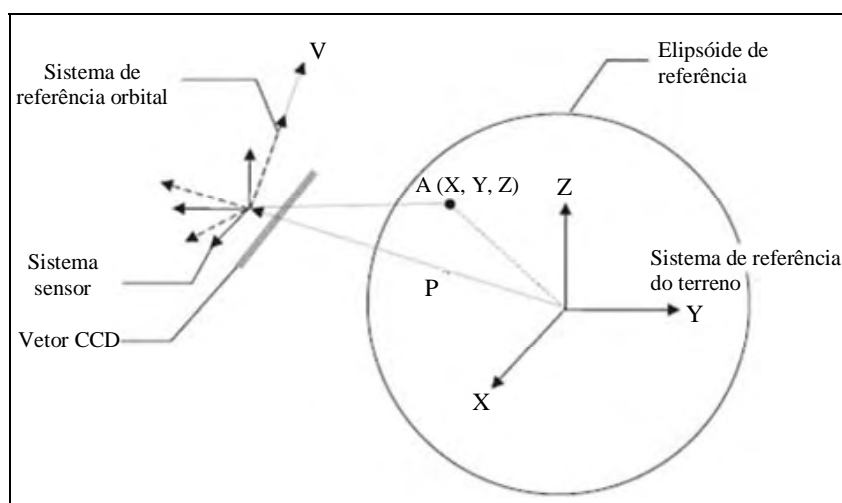


Figura 23 - Configuração do sistema sensor, de órbita e de referência terrestre.
Fonte: Adaptada de Kim e Dowman (2006).

A orientação do satélite com relação ao sistema de referência do terreno é uma função não linear da posição, velocidade e ângulos de atitude do satélite ou dos parâmetros orbitais e ângulos de atitude. Os modelos de posição-orientação simplificam esta relação com apenas três ângulos de rotação. Então, neste sentido, os modelos de posição-orientação não são verdadeiramente modelos físicos (KIM E DOWMAN, 2006).

O modelo de sensor de órbita pode ser representado por uma equação matricial, a qual é expressa por coordenadas cartesianas do sistema de referência do terreno (KIM e DOWMAN, 2006):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \lambda [R_{sensor}^{órbita}]^T [R_{órbita}^{terreno}]^T \begin{pmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{pmatrix} \quad (6)$$

onde:

x, y são as coordenadas de um ponto no sistema imagem/sensor;

X, Y, Z coordenadas de um ponto no referencial de terreno;

X_S, Y_S, Z_S são as coordenadas da posição do satélite no referencial do terreno num dado instante de tempo t ;

$R_{sensor}^{órbita}$ é a matriz de rotação determinada pelos ângulos de atitude;

$R_{órbita}^{terreno}$ é a matriz de rotação determinada pela posição e velocidade do satélite;

λ é o fator de escala, e;

f é a distância focal.

Como a direção de movimento da plataforma é ao longo do eixo x , o valor desta coordenada é igualado a zero (Equação 6) para representar a geometria do sensor *pushbroom* linear.

O símbolo $R_{sensor}^{órbita}$ representa a matriz de rotação do sistema do sensor para o sistema de referência orbital, que pode ser expresso através dos ângulos de atitude; $R_{órbita}^{terreno}$ representa a matriz de rotação do sistema de referência orbital para o sistema de referência do terreno, que pode ser expresso pela posição e velocidade do satélite ou através dos parâmetros orbitais.

Vale ressaltar que a representação matemática exata de $R_{sensor}^{órbita}$ e $R_{órbita}^{terreno}$ pode variar para diferentes satélites. A matriz de rotação $R_{sensor}^{órbita}$ depende da ordem de rotação e da

definição dos eixos de rotação. Para o caso do satélite KOMPSAT-1 ela pode ser expressa como a matriz de rotação transposta, determinada pelos ângulos *roll*, *pitch* e *yaw* (KIM e JEUN, 2002):

$$R_{sensor}^{órbita} = \begin{pmatrix} \cos \Psi \cos P & \cos \Psi \sin P \sin R + \sin \Psi \cos R & -\cos \Psi \sin P \cos R + \sin \Psi \sin R \\ -\sin \Psi \cos P & -\sin \Psi \sin P \sin R + \cos \Psi \cos R & \sin \Psi \sin P \cos R + \cos \Psi \sin R \\ \sin P & -\cos P \sin R & \cos P \cos R \end{pmatrix} \quad (7)$$

onde:

R , P e Ψ representam os ângulos *roll*, *pitch* e *yaw*;

$R_{sensor}^{órbita} = R(\Psi) \cdot R(P) \cdot R(R)$ representa a seqüência de rotações (transformação ativa).

Similarmente, a matriz $R_{órbita}^{terreno}$ depende da definição exata do sistema de referência orbital. Esta matriz pode ser representada por parâmetros orbitais de inclinação, ascensão reta do nodo ascendente e a anomalia média. Kim e Jeun (2002) representaram a órbita em função da posição e vetores de velocidade do satélite, por:

$$R_{órbita}^{satélite} = \begin{pmatrix} \frac{V_X}{L_V} & \frac{-Y_S V_Z + V_Y Z_S}{L_P L_V} & -\frac{X_S}{L_P} \\ \frac{V_Y}{L_V} & \frac{-Z_S V_X + V_Z X_S}{L_P L_V} & -\frac{Y_S}{L_P} \\ \frac{V_Z}{L_V} & \frac{-X_S V_Y + V_X Y_S}{L_P L_V} & -\frac{Z_S}{L_P} \end{pmatrix} \quad (8)$$

onde:

V_X , V_Y , V_Z são as componentes do vetor velocidade;

L_P a magnitude do vetor posição; e

L_V a magnitude do vetor velocidade.

Os parâmetros de posição, velocidade do satélite, tempo t (ou a coordenada imagem x) e a atitude são modelados como polinômios de segundo grau, para o caso do satélite KOMPSAT-1 pela Equação 9 (KIM e JEUN, 2002).

$$\begin{aligned}
X_s &= X_0 + a_1t + b_1t^2 \\
Y_s &= Y_0 + a_2t + b_2t^2 \\
Z_s &= Z_0 + a_3t + b_3t^2 \\
V_x &= V_{x0} + a_4t + b_4t^2 \\
V_y &= V_{y0} + a_5t + b_5t^2 \\
V_z &= V_{z0} + a_6t + b_6t^2 \\
R &= R_0 + a_7t + b_7t^2 \\
P &= P_0 + a_8t + b_8t^2 \\
\Psi &= \Psi_0 + a_9t + b_9t^2
\end{aligned} \tag{9}$$

onde:

X_0, Y_0, Z_0 são as coordenadas da posição do satélite no referencial do terreno no instante $t=0$;

V_{x0}, V_{y0}, V_{z0} são as componentes do vetor velocidade no instante $t=0$;

R_0, P_0 e Ψ_0 representam os ângulos *roll*, *pitch* e *yaw* no instante $t=0$;

$a_1, a_2, \dots, b_8, b_9$ são os coeficientes polinomiais, e;

t é um dado instante de tempo.

Os modelos de órbita têm sido desenvolvidos e usados nas comunidades de sistemas orbitais, que têm acesso à informação sobre a órbita do satélite e seu sistema de controle de atitude.

Nesse modelo um conjunto específico de incógnitas pode ser determinado entre os 27 parâmetros. Alguns exemplos podem ser encontrados em Salamonowicz (1986) e Radhadevi et al (1998).

2.8.2.2 Modelos rigorosos baseados em posição-rotação

De acordo com Kim e Dowman (2006) a colinearidade é uma das propriedades fundamentais de qualquer modelo geométrico de imageamento, e as equações de colinearidade têm sido usadas para a modelagem de imagens orbitais.

Como exemplo Gagan (1987), Gagan e Dowman (1988) e Kratky (1989) modificaram as equações de colinearidade, as quais foram adaptadas para considerar a geometria das imagens *pushbroom* linear (Equação 10).

Analisando a Figura 24, nota-se que a direção de movimento da plataforma é ao longo do eixo x , e que o valor da coordenada para x é igualado a zero (Equação 10),

como no caso do modelo de órbita, para representar a geometria da imagem *pushbroom* linear.

O valor da coordenada y é calculado a partir da coordenada coluna da imagem e da configuração de CCDs dada pela orientação interior. Os valores r_{11} até r_{33} são coeficientes da matriz de rotação, utilizados para alinhar o sistema do sensor com o sistema de referência terrestre. Este modelo usa a posição do satélite (X_S, Y_S, Z_S) e os ângulos de rotação ω (correspondente ao ângulo roll), ϕ (correspondente ao ângulo pitch) e κ (correspondente ao ângulo yaw) como os parâmetros de orientação exterior (KIM e DOWMAN, 2006).

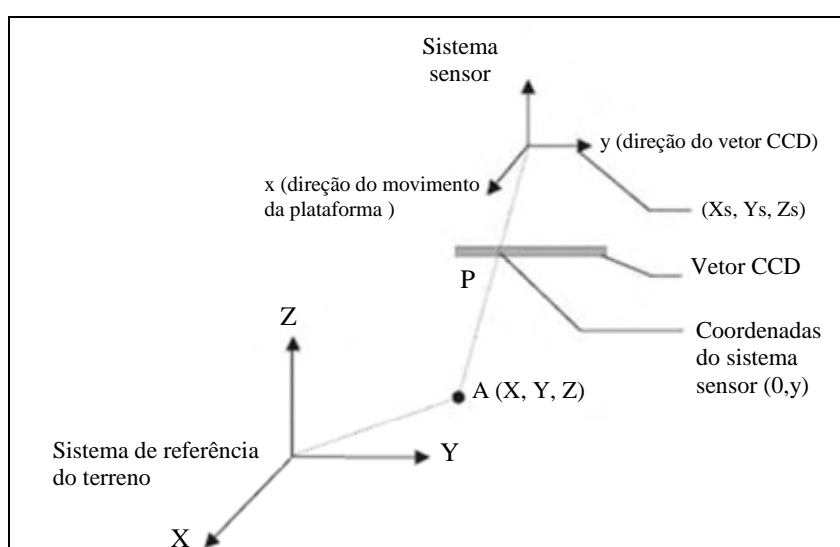


Figura 24 - Configuração do sistema sensor *pushbroom*, de órbita e de referência do terreno.
Fonte: Adaptada de Kim e Dowman (2006).

A representação de um modelo rigoroso de posição-orientação pode ser estabelecida a partir da seguinte matriz (KIM e DOWMAN, 2006):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \lambda R^T \begin{pmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{pmatrix} \quad (10)$$

onde:

x, y são as coordenadas de um ponto no sistema imagem/sensor;

X, Y, Z coordenadas de um ponto no referencial de terreno;

X_S, Y_S, Z_S são as coordenadas da posição do satélite no referencial do terreno num dado instante de tempo t ;

R^T é a matriz de rotação transposta determinada pelos ângulos de atitude, e;

λ é um fator de escala.

O relacionamento entre os parâmetros de orientação exterior e o tempo t (que também pode ser considerado como coordenada x , a menos de um fator de escala) para cada linha imageada, pode ser determinado a partir de polinômios de segunda ordem. As diferenças de escala entre x e y serão absorvidas por este polinômio.

Algumas pesquisas realizadas por Gugan (1987), Gugan e Dowman (1988), Kratky (1989) introduziram esse tipo de modelagem da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 X_s &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\
 Y_s &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\
 Z_s &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\
 \kappa_s &= \kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2 \\
 \phi_s &= \phi_0 + a_5 t + b_5 t^2 \\
 \omega_s &= \omega_0 + a_6 t + b_6 t^2
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

onde:

X_0, Y_0, Z_0 são as coordenadas da posição do satélite no referencial do terreno no instante $t=0$;

X_s, Y_s, Z_s são as coordenadas da posição do satélite no referencial do terreno num dado instante de tempo t ;

$\kappa_0, \phi_0, \omega_0$ são os ângulos de rotação no instante $t=0$.

$\kappa_s, \phi_s, \omega_s$ são os ângulos de rotação num dado instante de tempo t .

$a_1, a_2, \dots, b_5, b_6$ são os coeficientes polinomiais.

t é um dado instante de tempo.

Entre os 18 coeficientes ilustrados na Equação 11, um conjunto específico de coeficientes pode ser determinado como incógnitas através do processo de ajustamento por feixes (GUGAN e DOWMAN, 1988; ORUN e NATARAJAN, 1994).

Tendo em vista que os modelos baseados em posição-rotação serão os usados neste trabalho, uma descrição mais detalhada sobre o assunto será apresentada na Seção 2.10.

2.9 Modelos não Paramétricos (ou modelos generalizados)

Geralmente, dados auxiliares como posição, vetores de velocidade e ângulos de atitude da plataforma do satélite e mesmo o modelo do sensor (distância focal calibrada, coordenadas do ponto principal, distorções das lentes), não são fornecidos em conjunto com as imagens orbitais. Por esta razão, meios alternativos de modelar a câmara e a plataforma necessitam ser empregados, como os modelos não paramétricos.

Muitas abordagens relacionadas a modelos não paramétricos foram descritas em Valadan e Sadeghian (2003); Sadeghian e Delavar (2003); Dowman e Tao (2002); Hanley e Fraser (2001); Tao e Hu (2002). Eles não requerem parâmetros de orientação interior ou informações de efemérides da órbita.

Os métodos de orientação baseados em modelos não paramétricos, como funções de polinômios racionais, projeções afins e Transformação Linear Direta (DLT) são principalmente usados para imagens orbitais de alta resolução (POLI, 2004). Eles podem ser uma alternativa quando os modelos do sensor e da plataforma não são fornecidos pelos provedores das imagens ou quando estas informações não estão disponíveis com precisão suficiente.

- Modelo de polinômios racionais

O modelo de polinômios racionais possibilita um relacionamento direto entre as coordenadas de imagem (x, y) e as coordenadas 3D do ponto no espaço objeto (X, Y e Z) por relações polinomiais, como mostram as Equações 12 (BOCCARDO et al., 2004).

$$\begin{aligned} x &= \frac{P_a(X, Y, Z)}{P_b(X, Y, Z)} \\ y &= \frac{P_c(X, Y, Z)}{P_d(X, Y, Z)} \end{aligned} \quad (12)$$

onde: P_a, P_b, P_c e P_d são usualmente polinômios de grau máximo igual a 3, correspondendo a 20 coeficientes.

Esses polinômios podem ser expressos, como no caso de P_a , pela Equação 13.

$$P_a(X, Y, Z) = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4X^2 + a_5XY + \dots + a_{17}Y^2Z + a_{18}YZ^2 + a_{19}Z^3 \quad (13)$$

As Equações (12) são conhecidas na literatura como *Upward* RFM (Rational Function Model) e possibilitam que as coordenadas da imagem sejam obtidas a partir das coordenadas 3D de um ponto de apoio. Para proceder à estimação dos parâmetros de transformação a_i , b_i , c_i e d_i ($i=0, \dots, 19$), a partir de pontos de apoio e suas correspondentes coordenadas imagem, é necessário utilizar o método dos mínimos quadrados, nas Equações (12) linearizadas (BOCCARDO et al., 2004). Trabalhos recentes indicam que esta técnica não produz bons resultados em todas as situações (JACOBSEN, 2007). Normalmente, o produtor de imagens gera os polinômios a partir dos dados de efemérides e não indiretamente a partir de pontos de controle. Jacobsen (2007) mostra que é mais confiável apenas corrigir estes polinômios com poucos pontos de controle do que estimá-los indiretamente.

2.10 Modelos de orientação usando abordagem rigorosa

2.10.1 Modelos rigorosos para imagens orbitais

Uma gama de estudos relacionados à orientação de imagens orbitais, usando modelos de sensores rigorosos, tem sido realizada. Dentre eles, alguns serão descritos a seguir.

Gugan (1987) descreveu um modelo geométrico rigoroso para determinar os parâmetros de orientação exterior de imagens SPOT. Ainda em 1987, Konecny et al. (1987) propuseram um modelo com seis parâmetros de orientação exterior para cada imagem da cena SPOT, os quais representavam o movimento uniforme da plataforma, e oito parâmetros adicionais que representavam a diferença entre o movimento uniforme aproximado e o movimento uniforme real, totalizando quatorze parâmetros a serem estimados.

Gugan e Dowman (1988) realizaram um estudo usando modelos geométricos rigorosos, sobre a precisão e completeza do mapeamento topográfico a partir de imagens SPOT. Os experimentos foram realizados com estéreo-modelos.

Kratky (1989) propôs um modelo orbital com 22 parâmetros incógnitos para um estéreo par. Neste modelo, perturbações orbitais potenciais foram levadas em consideração, além de quatro parâmetros incógnitos como parâmetros de orientação interior.

Westin (1990) propôs um modelo orbital simplificado, que considera uma órbita circular ao invés de uma órbita elíptica. Os dados usados foram derivados de efemérides do satélite SPOT, onde sete parâmetros incógnitos foram necessários para cada imagem SPOT. O'Neil e Dowman (1991) propuseram um modelo no qual dados auxiliares são usados a fim de estabelecer as orientações relativas. Então, apenas três pontos de apoio eram necessários para estabelecer a orientação exterior.

Chen e Lee (1993) realizaram um estudo sobre a precisão geométrica de imagens *pushbroom* lineares, usando um modelo rigoroso, para a obtenção de ortofotos a partir de imagens SPOT. Radhadevi e Ramachandran (1994) descreveram um método para modelagem do imageamento do satélite de SPOT usando um único ponto de controle e informações planimétricas adicionais extraídas no terreno. A posição do satélite é obtida com o uso das equações de colinearidade. A órbita inicial é obtida dos dados de efemérides e o refinamento dos dados é feito usando a solução pelo MMQ. Depois de refinar a posição do satélite, as coordenadas planimétricas de pontos no espaço objeto podem ser calculadas usando as equações de colinearidade.

Fritsch e Stallman (2000) apresentaram um modelo baseado em uma extensão de um modelo desenvolvido por Kratky para o satélite SPOT. A solução geométrica combina o princípio rigoroso da colinearidade com injunções adicionais de uma órbita elíptica. Os parâmetros de atitude são modelados por um modelo polinomial linear ou quadrático. O número total de incógnitas é de 12 por imagem.

Bang e Cho (2001) realizaram um estudo onde foram desenvolvidos dez modelos diferentes de sensores para imagens do satélite KOMPSAT-EOC. Os modelos de sensores do satélite foram desenvolvidos com a extensão das equações de colinearidade, e o comportamento de cada modelo de sensor foi investigado. Os modelos de plataforma do satélite foram representados pelos seis parâmetros de orientação exterior usando funções de 1ª, 2ª e 3ª ordem. Entre eles, parâmetros de rotação ω e φ foram considerados como constantes devido à alta correlação com os parâmetros de posição.

Dowman e Michalis (2003) apresentaram uma pesquisa sobre um modelo rigoroso genérico para sensores orbitais estéreo "*along-track*". O modelo faz uso das equações de colinearidade em combinação com parâmetros de dinâmica orbital. As equações de colinearidade foram modificadas, com relação à característica dinâmica do sensor *pushbroom* e ao número de parâmetros de orientação exterior. Usando o mesmo modelo, Michalis e Dowman (2004) realizaram a geração de um modelo de elevação de terreno (DEM) a partir de imagens SPOT5-HRS.

Um estudo comparativo entre os modelos físicos de posição-orientação e modelo de órbita, realizado por Kim e Dowman (2006), evidenciou que, em termos de precisão do ajustamento por feixes de raios, os dois tipos de modelo produziram resultados similares e podem ser usados para aplicações de mapeamento, embora os modelos de órbita tenham produzido melhores resultados em termos de precisão na estimação dos POEs.

2.10.2 Modelos Rigorosos

Como visto, os modelos rigorosos refletem a realidade física da geometria de visada e tentam corrigir todas as possíveis distorções geradas durante a formação da imagem. Em suas formulações, os modelos físicos levam em consideração vários tipos de distorções relativas à geometria global de visada, tais como:

- distorções causadas pela plataforma (posição, velocidade e orientação);
- distorções relativas ao sensor (ângulos de orientação, IFOV, tempo de integração de detecção do sinal);
- distorções relativas ao terreno (geóide-elipsóide, incluindo o relevo), e;
- deformações relativas à projeção cartográfica (elipsóide-plano cartográfico).

Na maioria dos casos, os modelos rigorosos são baseados em equações de colinearidade, que são estendidas a fim de descrever a geometria específica dos sensores *pushbroom*, e são desenvolvidas partindo-se do princípio de que um ponto no espaço imagem, seu homólogo no espaço objeto e o centro perspectivo da imagem, são colineares. A Figura 25 ilustra a condição de colinearidade dos pontos P , p e CP_i .

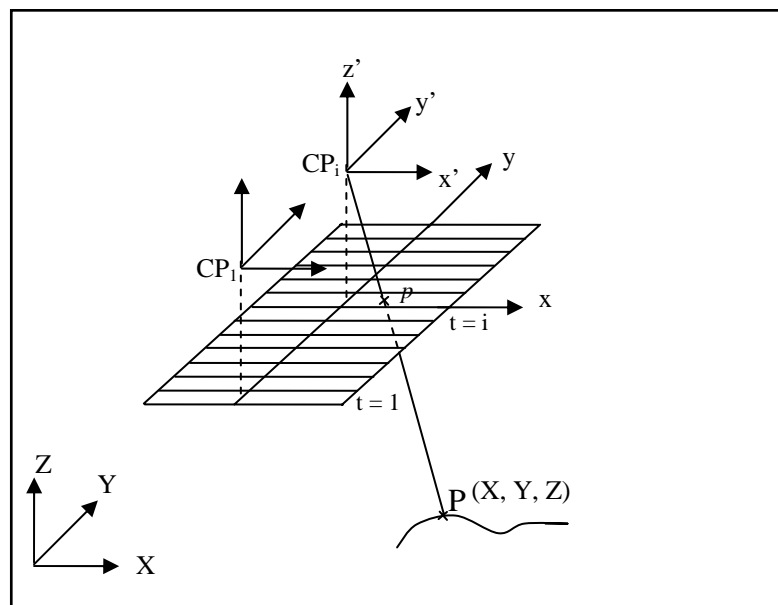


Figura 25 - Condição de Colinearidade.
Fonte: Adaptada de Wolf e Dewitt (2000).

As modificações incorporadas às equações de colinearidade, considerando a geometria *pushbroom*, estão relacionadas com a aquisição da cena, visto que a cada linha varrida na cena, um conjunto de parâmetros de orientação (X_s , Y_s , Z_s , ω_s , ϕ_s , κ_s) é necessário para o modelo da plataforma.

2.10.2.1 Modelo por feixes independentes modificado

Devido à instabilidade básica do sistema dinâmico de imageamento de um sensor *pushbroom* linear, como é o caso do sistema SPOT, não é possível teoricamente encontrar a orientação exata de uma imagem, como no caso da Fotogrametria aérea convencional (GUGAN, 1987).

Por essa razão, diversas pesquisas têm sido realizadas, a fim de encontrar uma orientação com um grau aceitável de precisão para as imagens orbitais. Gugan (1987) utilizou polinômios de segunda ordem em todos os parâmetros de orientação exterior, que permitem determinar mudanças não lineares na posição e atitude do satélite. A Equação 14 mostra esses polinômios.

$$\begin{aligned}
X_s &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\
Y_s &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\
Z_s &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\
\kappa_s &= \kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2 \\
\phi_s &= \phi_0 + a_5 t + b_5 t^2 \\
\omega_s &= \omega_0 + a_6 t + b_6 t^2
\end{aligned} \tag{14}$$

onde,

$X_0, Y_0, Z_0, \omega_0, \phi_0, \kappa_0, a_1 \dots a_6$ e $b_1 \dots b_6$ são parâmetros a serem determinados, dos quais: $X_0, Y_0, Z_0, \omega_0, \phi_0, \kappa_0$ são as coordenadas do CP do satélite e os ângulos de atitude, no referencial do terreno, no instante $t=0$ e $a_1 \dots a_6$ e $b_1 \dots b_6$ são coeficientes polinomiais;

$X_s, Y_s, Z_s, \omega_s, \phi_s, \kappa_s$ são as coordenadas do CP do satélite e os ângulos de atitude, no referencial do terreno num dado instante de tempo t , calculados em função dos parâmetros e de t ;

t é a diferença de tempo entre as posições do satélite no instante $O(X_0, Y_0, Z_0)$ e $S(X_s, Y_s, Z_s)$, para cada linha imageada; este parâmetro normalmente é associado à linha da imagem;

Segundo Orun e Natarajan (1994) essas equações contendo 18 incógnitas não fornecem um conjunto prático de parâmetros, porque em um sensor *pushbroom* linear, ao contrário da imagem de quadro, certos parâmetros são altamente correlacionados entre si, conduzindo a uma solução muito instável.

A Figura 26 apresenta o efeito de pequenas mudanças nos seis parâmetros de orientação exterior, numa fotografia de quadro e num sensor *pushbroom*.

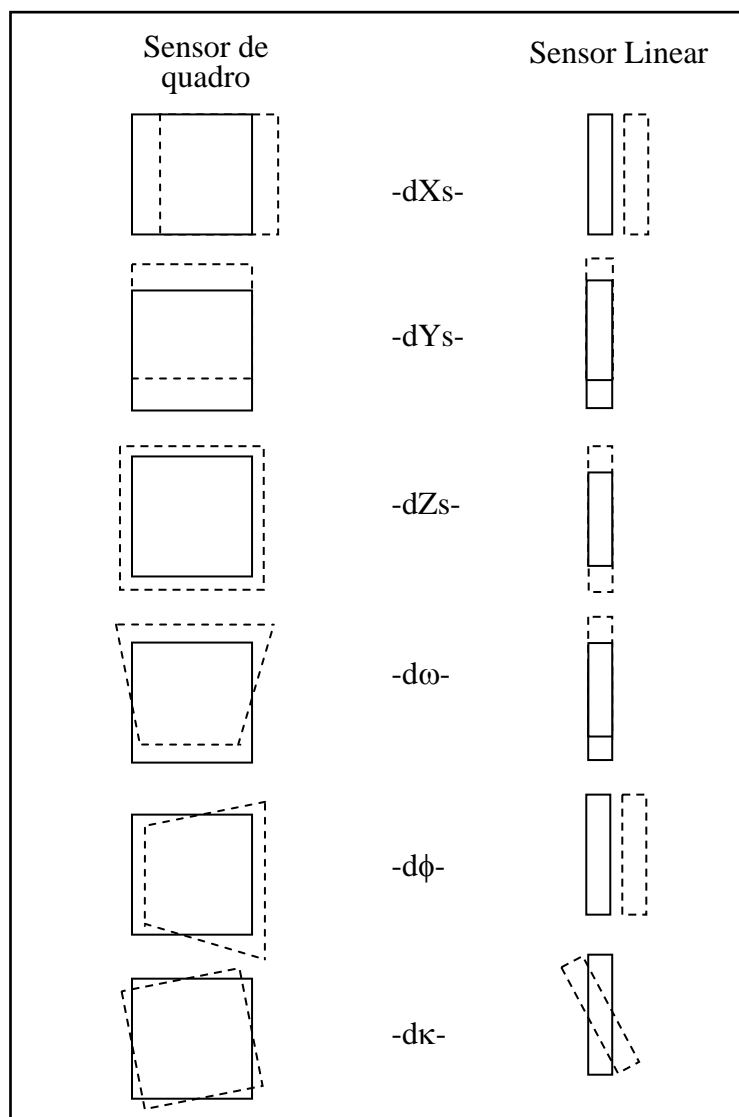


Figura 26 - O efeito de pequenas mudanças nos parâmetros para a fotografia e vetor linear.
 Fonte: Adaptada de Orun e Natarajan (1994).

De modo geral, percebe-se na Figura 26 que as variações nos seis parâmetros de orientação exterior, causam diferentes efeitos no sensor de quadro e no sensor linear.

No sensor linear uma pequena mudança em ω tem o mesmo efeito que uma pequena mudança em Y_s ; da mesma forma, pequenas mudanças em ϕ não são muito diferentes de pequenas mudanças em X_s . Ou seja, como os efeitos destes movimentos são muito semelhantes, sua determinação indireta é instável, devido à alta correlação. Por isso, é evidente a necessidade de eliminar ω ou Y e ϕ ou X do conjunto de parâmetros e, assim obter as equações com 12 parâmetros incógnitos para cada imagem, como proposto por Orun e Natarajan, (1994).

A Equação 15 apresenta o conjunto de doze parâmetros (ORUN e NATARAJAN, 1994):

$$\begin{aligned} X_s &= X_0 + a_1t + b_1t^2 \\ Y_s &= Y_0 + a_2t + b_2t^2 \\ Z_s &= Z_0 + a_3t + b_3t^2 \\ \kappa_s &= \kappa_0 + a_4t + b_4t^2 \end{aligned} \quad (15)$$

Desta forma, qualquer mudança em ω e ϕ pode ser automaticamente absorvida por Y e X, respectivamente.

Com o efeito dessas mudanças a matriz de rotação R (representando as rotações de ω , κ do sistema de coordenadas fotogramétrico em relação ao sistema de coordenadas do terreno) é representada considerando essas simplificações e considerando, ainda, $\phi=0$:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \kappa_s & \cos \omega \cdot \text{sen} \kappa_s & \text{sen} \omega \cdot \text{sen} \kappa_s \\ -\text{sen} \kappa_s & \cos \omega \cdot \cos \kappa_s & \text{sen} \omega \cdot \cos \kappa_s \\ 0 & -\text{sen} \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (16)$$

onde:

$R = R(\kappa) \cdot R(\phi) \cdot R(\omega)$ representa a seqüência de rotações (transformação ativa).

Os elementos κ_0 , a_4 e b_4 , bem como os demais parâmetros, são determinados em um ajustamento por feixes de raios, para um ângulo de inclinação do espelho específico, ω_i , do satélite quando a imagem é adquirida.

Na Equação 16, o ângulo ϕ foi considerado nulo, porém, esta simplificação não pode ser generalizada para todos os satélites, visto que, como no caso do satélite Ikonos, este ângulo varia para fazer a cobertura estereoscópica *along-track* e esta variação não pode ser desprezada.

Tendo em vista que cada vetor linear tem seu próprio centro perspectivo e não tem dimensão na direção x , a coordenada x_i na Equação 17 pode ser fixada como zero. Além disso, uma vez que a estimação da diferença de tempo (t) é função linear da linha da imagem (x), pode-se admitir que x_i (Equação 17) substitui a variação de tempo t , e as mudanças em unidades (fator de escala entre t e x_i) serão absorvidas pelos coeficientes a e b da Equação 15.

Assim, a equação de colinearidade para imagens orbitais será:

$$0 = x_i = -f \frac{r_{11}(X_i - X_s) + r_{12}(Y_i - Y_s) + r_{13}(Z_i - Z_s)}{r_{31}(X_i - X_s) + r_{32}(Y_i - Y_s) + r_{33}(Z_i - Z_s)} \quad (17)$$

$$y_i = -f \frac{r_{21}(X_i - X_s) + r_{22}(Y_i - Y_s) + r_{23}(Z_i - Z_s)}{r_{31}(X_i - X_s) + r_{32}(Y_i - Y_s) + r_{33}(Z_i - Z_s)} \quad (18)$$

onde:

$$\begin{aligned} X_s &= X_0 + a_1 x_i + b_1 x_i^2 \\ Y_s &= Y_0 + a_2 x_i + b_2 x_i^2 \\ Z_s &= Z_0 + a_3 x_i + b_3 x_i^2 \end{aligned} \quad (19)$$

e x_i é a linha da imagem.

Expandindo a matriz de rotação mostrada na Equação (16) e substituindo os elementos das Equações (15):

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\kappa_0 + a_4 x_i + b_4 x_i^2) & \cos \omega \sin(\kappa_0 + a_4 x_i + b_4 x_i^2) & \sin \omega \sin(\kappa_0 + a_4 x_i + b_4 x_i^2) \\ -\sin(\kappa_0 + a_4 x_i + b_4 x_i^2) & \cos \omega \cos(\kappa_0 + a_4 x_i + b_4 x_i^2) & \sin \omega \cos(\kappa_0 + a_4 x_i + b_4 x_i^2) \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (20)$$

Algumas simulações para imagens SPOT foram realizadas por Orun e Natarajan (1994), que fizeram algumas considerações sobre o uso dessas equações, a saber:

- Ao contrário de simulações para câmaras de quadro (*frame*), onde as foto-coordenadas podem ser geradas diretamente das equações de colinearidade, às quais podem ser adicionados erros randômicos normalmente distribuídos, no caso da imagem SPOT, a coordenada imagem x não aparece no lado esquerdo da Equação 17 (considerada zero) e deve ser determinada iterativamente usando as Equações 17, 19 e 20;
- Em certas simulações com a imagem SPOT, especialmente com pequenos ângulos de inclinação do espelho (e por isso, uma razão base-altura fraca), os autores notaram instabilidades com um grande número de iterações. Isto talvez seja uma indicação de fragilidade da

geometria de varredura linear em circunstâncias desfavoráveis comparadas com a fotogrametria convencional;

- A possibilidade de super-parametrização é reconhecida, da mesma maneira que não é possível recuperar ω e Y nem ϕ e X simultaneamente. Pode também (sob certas condições), não ser possível recuperar todos os parâmetros da forma polinomial do movimento do satélite (a_1, \dots, b_4) (Equações 19 e 20) devido à alta correlação entre eles. Este é o mesmo problema que ocorre no ajustamento por feixes de raios na aerotriangulação onde os parâmetros adicionais destinados ao modelo de distorções sistemáticas da imagem podem ser altamente correlacionados. No caso das simulações com imagens SPOT, os parâmetros a_3 e b_3 (Equação 17) foram eliminados por terem alta correlação. Porém, os resultados gerais não foram afetados com a execução desta técnica.

2.10.3 Modelos Rigorosos usando Feições Retas

2.10.3.1 Contextualização histórica

A maioria das abordagens de orientação de imagens usando os princípios fotogramétricos utiliza pontos para relacionar o espaço imagem e o espaço objeto. O uso de pontos como controle de campo funciona efetivamente para a orientação exterior na Fotogrametria tradicional e também na Fotogrametria orbital. Entretanto, não é fácil a identificação automática de pontos na cena, uma vez que um ponto é uma entidade abstrata, sendo necessário recorrer a alvos pré-sinalizados, ou feições naturais ou antrópicas.

O problema é que pontos não existem fisicamente em uma imagem e, conseqüentemente, é difícil realizar a extração desse tipo de informação. Pontos de controle são, na realidade, alvos contidos na cena, e suas coordenadas referem-se ao centróide desses alvos. Desta forma, a tarefa mais complexa é justamente a identificação automática destes alvos (SCHENK, 1999). O uso de feições retas é atrativo, visto que, em geral, feições retas são mais fáceis de serem identificadas na imagem, tanto visualmente, quanto automaticamente, além de serem bastante comuns em ambientes artificiais. Além disto, não existe a necessidade de correspondência entre pontos no espaço imagem e no espaço objeto.

Porém, na orientação automática de uma imagem usando feições lineares podem ocorrer alguns problemas, como o estabelecimento da correspondência entre as feições extraídas e as feições de controle, desde que existam diferenças originadas da projeção das feições de controle 3D nas imagens. Além disso, a determinação dos parâmetros de orientação exterior da imagem é dificultada devido ao uso de modelos mais complexos.

Mulawa e Mikhail (1988) apresentaram um modelo que usa feições lineares e seções cônicas. Nesse trabalho uma observação de um ponto P da reta L pode ser representada por uma única equação de condição, se não forem incluídos parâmetros adicionais. A geometria de uma linha reta no espaço objeto é representada na Figura 27.

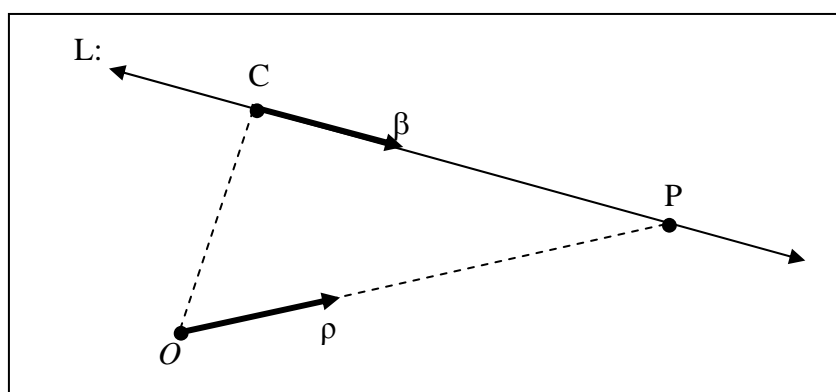


Figura 27 - Geometria de uma linha reta no espaço objeto.
Fonte: Adaptado de Mulawa e Mikhail (1988).

onde:

C é o centro da linha L ;

β é a direção da linha L ;

P é um ponto qualquer na linha L , definido pela intersecção entre ρ e L ;

ρ é o vetor diretor observado no ponto P da linha L (vetor de visada), e;

O é o centro perspectivo.

O vetor diretor ρ do raio fotogramétrico (vetor de visada), o vetor de direção β da linha L , e o vetor diferença formado pelo centro perspectivo O e o centro C da linha L devem ser coplanares (MULAWA e MIKHAIL, 1988):

$$((\rho \cdot \beta) * (C - O)) = 0 \quad (21)$$

Pode-se notar que esta representação é similar à equação de coplanaridade usada em Fotogrametria para feições do tipo “pontos”. Neste caso, o centro C e a direção β

agem como uma câmara que pode visar somente numa direção. Essa é uma forma interessante para representar a equação de condição. O ponto de intersecção P não faz parte da Equação 21 porque a relação de coplanaridade assegura essa geometria sem necessitar das coordenadas do ponto P na linha L . A Equação 21 permite a determinação de descritores primários $L: \{C, \beta\}$ sem a necessidade de determinar os pontos de intersecção P na linha L .

Uma vez que a relação de coplanaridade é representada por um único raio fotogramétrico, um sistema de indexação permite diversos pontos de intersecção P na linha L bem como diversas câmaras O e diversas linhas L .

Muitos trabalhos além deste, baseados em equações de condição ou em outros métodos, foram desenvolvidos desde então, usando feições lineares como controle de campo, e em alguns casos, usando também a combinação entre linhas retas e pontos. Um breve histórico será apresentado na seqüência.

Alguns autores como Masry (1981), Lugnani (1980), Tommaselli e Lugnani (1988), desenvolveram modelos matemáticos que relacionam feições retas no espaço-imagem e no espaço-objeto, nos quais foi comprovada a eficiência na aplicação desse tipo de feição.

Liu et al. (1990) apresentaram um método para determinação da localização da câmara de quadro usando linhas retas 2D e 3D ou pontos correspondentes. O cálculo da matriz de rotação e do vetor de translação da câmara é realizado em separado. A matriz de rotação é determinada por um algoritmo não linear usando oito ou mais linhas correspondentes. O cálculo do vetor de translação da câmara é baseado em equações lineares usando três ou mais linhas correspondentes, ou através de dois ou mais pontos correspondentes. Foi observado que bons resultados podem ser obtidos mesmo na presença de ruídos se um número maior do que o mínimo de correspondências for usado.

Kubik (1991) realizou um estudo sobre orientação relativa e absoluta de fotografias aéreas usando feições lineares para estabelecer o relacionamento entre os espaços imagem e objeto. Mostrou-se que é possível realizar a orientação relativa e absoluta usando feições retas ao invés de pontos isolados, evidenciando uma grande importância prática na medição automática, visto que não há a necessidade de correspondência entre pontos homólogos.

Heikkinen (1994) introduziu um método combinando informações de uma base de dados para determinar a orientação exterior de imagens aéreas e criar novas informações extraídas através de métodos semi-automáticos em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). O método baseou-se no uso de equações da forma paramétrica para linhas e curvas no espaço objeto. Relações geométricas entre feições 3D paramétricas e feições

imagem foram construídas para cada tipo de feição (linhas, círculos, elipse, etc.). A estimação dos parâmetros de orientação exterior da câmara foi dada por uma equação de condição, a partir de três vetores: o vetor diretor da linha, o vetor entre o ponto central da linha e o centro de projeção, e o vetor direção do feixe. A condição é satisfeita se os três vetores forem coplanares. Um mínimo de três linhas de controle não paralelas era requerido para a solução do processo de estimação.

Habib e Kelley (2001) apresentaram uma abordagem para resseção espacial de fotografias aéreas usando a transformada de Hough modificada. A transformada de Hough modificada foi utilizada para realizar a estimação de um modelo matemático que relacionava entidades entre dois conjuntos de dados. Nesta abordagem não era requerida a correspondência completa entre as entidades, visto que, com a estimação dos parâmetros, a correspondência era implicitamente determinada. As equações de colinearidade foram, então, usadas para relacionar as feições (pixels) de borda extraídas na imagem digital com pontos no espaço objeto obtidos ao longo das feições lineares. A partir do resultado desta técnica, os seis parâmetros de orientação eram estimados e em seguida era estabelecida a correspondência entre as feições no espaço imagem e objeto.

Uma abordagem para a determinação da orientação exterior de fotografias aéreas e à curta distância, através de um modelo de ajuste de segmentos lineares a pixels de borda, foi apresentada por Wang e Tseng (2002). Os segmentos de linhas, usados como controle, foram projetados com as equações de colinearidade na imagem, com base na orientação aproximada da imagem, e ajustados aos pixels de borda, que eram extraídos da imagem. A orientação era concluída quando os segmentos de linha projetados obtinham um ajuste ótimo aos pixels de borda.

Lee e Bethel (2004) fizeram uso de feições lineares para a restituição de imagens hiper-espectrais de câmaras aéreas lineares. Na etapa de extração, as linhas eram determinadas aproximadamente de modo manual, e refinadas com o uso da programação dinâmica. As linhas extraídas eram então usadas como dados de controle ou como injunções. Na modelagem das feições a forma paramétrica foi usada para expressar pontos ao longo da linha, e o modelo de sensor foi baseado nas equações de colinearidade.

Além destes, muitos outros trabalhos foram desenvolvidos usando modelos de orientação com linhas retas. Na seqüência é apresentado um modelo usando linhas retas baseado em planos equivalentes.

2.10.3.2 Modelo de planos equivalentes

O modelo matemático utilizado para o processo de resseção espacial de fotografias aéreas desenvolvido por Tommaselli (1988) também utiliza linhas retas para relacionar o espaço objeto e o espaço imagem. O modelo foi, posteriormente, revisado para considerar uma interpretação geométrica baseada no paralelismo dos vetores normais (Tommaselli, 1993).

O modelo baseia-se no paralelismo de dois planos, e conseqüentemente, de seus vetores normais. O primeiro plano é denominado *plano de interpretação no espaço imagem*, o qual é formado por uma linha reta no espaço imagem e o centro perspectivo da câmara, e o segundo denominado de *plano de interpretação no espaço objeto*, que é formado pela linha reta correspondente no espaço objeto e o centro perspectivo. A Figura 28 ilustra os vetores normais aos dois planos de interpretação.

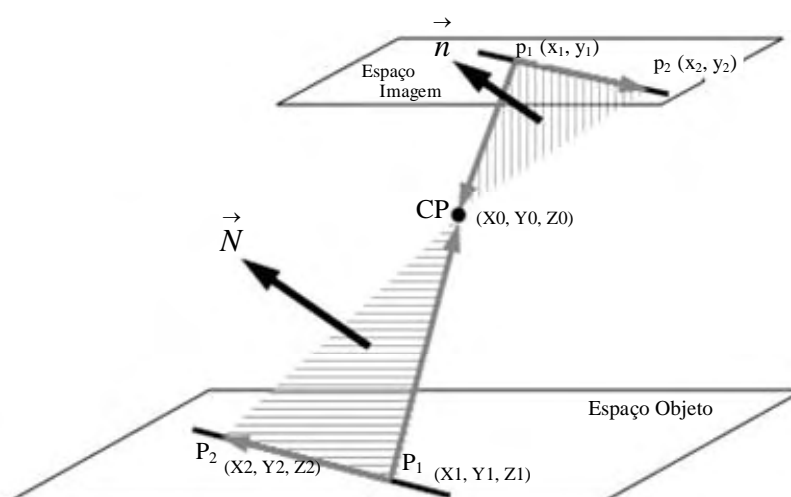


Figura 28 - Vetores normais em relação aos planos de interpretação no espaço imagem e objeto.

Fonte: Tommaselli (1993); Telles (2004).

onde:

\vec{n} é o vetor normal ao plano de interpretação no espaço imagem;

\vec{N} é o vetor normal ao plano de interpretação no espaço objeto.

As linhas retas na imagem, como mostra a Figura 29, são descritas por suas coordenadas polares e a linha reta correspondente no espaço objeto é descrita por suas

coordenadas cartesianas tridimensionais e seus cossenos diretores, ou pelo vetor diferença entre dois pontos conhecidos.

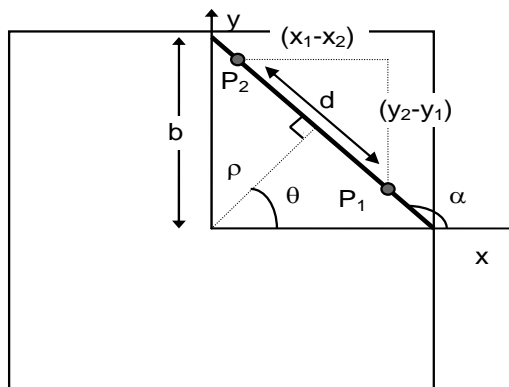


Figura 29 - Elementos das representações normal e paramétrica da linha reta.
Fonte: Tommaselli e Tozzi (1996).

Dados dois pontos na imagem, cujas coordenadas são (x_1, y_1) e (x_2, y_2) , pode-se expressar as seguintes relações trigonométricas (Tommaselli, 1993):

$$\cos \theta = (y_2 - y_1)/d \quad (22)$$

$$\sen \theta = (x_1 - x_2)/d \quad (23)$$

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (24)$$

$$\rho = -(x_2 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_2)/d \quad (25)$$

O modelo parte do princípio que aplicadas as devidas rotações no espaço, os planos de interpretação, e conseqüentemente seus vetores normais (nos espaços imagem e objeto) são paralelos. Deve-se salientar que os erros sistemáticos na imagem devem ser previamente corrigidos.

O desenvolvimento do modelo partiu da definição de dois pontos $p_1 = (x_1, y_1, f)$ e $p_2 = (x_2, y_2, f)$ na imagem. O vetor diretor formado pelos dois pontos e a origem do sistema define o plano de interpretação no espaço imagem. A Equação 26 representa o plano de interpretação no espaço imagem, que passa pelos pontos p_1 , p_2 e a origem do sistema.

$$-f \cdot (y_2 - y_1) \cdot x - f \cdot (x_1 - x_2) \cdot y - (x_2 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_2) \cdot z = 0 \quad (26)$$

Dividindo a Equação 26 pela distância (d) entre os pontos e considerando as relações trigonométricas 22 e 23, a equação do plano resulta em:

$$-f \cdot \cos \theta \cdot x - f \cdot \sin \theta \cdot y + \rho \cdot z = 0 \quad (27)$$

O vetor normal ao plano de interpretação no espaço imagem é dado pela Equação 28:

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} f \cdot \cos \theta \\ f \cdot \sin \theta \\ -\rho \end{bmatrix} \quad (28)$$

No espaço objeto, a representação paramétrica da reta é apresentada por:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix} \quad (29)$$

onde:

X_p , Y_p e Z_p : são coordenadas de um ponto qualquer da reta;

l , m e n : são os cossenos diretores da reta, que podem ser calculados a partir da diferença de coordenadas entre dois pontos conhecidos pertencentes à reta;

λ : é um fator de escala.

O vetor normal ao plano de interpretação no espaço objeto foi definido pelo produto vetorial entre o vetor formado pelos cossenos diretores da reta e o vetor diferença entre as coordenadas do centro perspectivo e o ponto na reta. A Equação 30 apresenta a formulação do vetor normal no espaço objeto.

$$\vec{N} = \begin{bmatrix} -n \cdot (Y_c - Y_1) + m \cdot (Z_c - Z_1) \\ n \cdot (X_c - X_1) - l \cdot (Z_c - Z_1) \\ -m \cdot (X_c - X_1) + l \cdot (Y_c - Y_1) \end{bmatrix} \quad (30)$$

Para que os vetores sejam paralelos basta aplicar a matriz de rotação ao vetor normal no espaço objeto. Como os vetores são paralelos, suas normas são diferentes e deve-se considerar também um fator de escala λ , da seguinte forma:

$$\vec{n} = \lambda \cdot R \cdot \vec{N} \quad (31)$$

O desenvolvimento da Equação 31, considerando as Equações 28 e 30 (vetor normal no espaço imagem e vetor normal no espaço objeto), resulta em três equações. Para eliminar o termo λ , as duas primeiras equações foram divididas pela terceira. Na divisão, foi realizada uma simplificação substituindo o termo $-\cot g\theta$ pelo parâmetro a (coeficiente angular) e o termo $\rho/\text{sen}\theta$ pelo parâmetro b (coeficiente linear).

Com o objetivo de evitar divisões por zero, foram admitidas duas classes de retas: aproximadamente horizontais e verticais. Estas classes são referenciadas de forma diferente e, portanto, utilizam grupos de equações diferentes representadas, respectivamente, pelas equações:

$$y = ax + b \quad (32)$$

$$x = a^*y + b^* \quad (33)$$

Deste modo, o modelo matemático dos planos equivalentes resulta em dois pares de equações. As equações para retas com $45^\circ < \theta \leq 135^\circ$ ou $225^\circ < \theta \leq 315^\circ$:

$$a = -\frac{r_{11} \cdot n_x + r_{12} \cdot n_y + r_{13} \cdot n_z}{r_{21} \cdot n_x + r_{22} \cdot n_y + r_{23} \cdot n_z} \quad (34)$$

$$b = -f \cdot \frac{r_{31} \cdot n_x + r_{32} \cdot n_y + r_{33} \cdot n_z}{r_{21} \cdot n_x + r_{22} \cdot n_y + r_{23} \cdot n_z}$$

As equações para retas com $315^\circ < \theta \leq 45^\circ$ ou $135^\circ < \theta \leq 225^\circ$:

$$a^* = -\frac{r_{21} \cdot n_x + r_{22} \cdot n_y + r_{23} \cdot n_z}{r_{11} \cdot n_x + r_{12} \cdot n_y + r_{13} \cdot n_z} \quad (35)$$

$$b^* = -f \cdot \frac{r_{31} \cdot n_x + r_{32} \cdot n_y + r_{33} \cdot n_z}{r_{11} \cdot n_x + r_{12} \cdot n_y + r_{13} \cdot n_z}$$

onde:

r_{ij} são os elementos da matriz de rotação.

Posteriormente foram acrescentados ao modelo, alguns parâmetros de orientação interior: as coordenadas do ponto principal (x_0 e y_0) e um fator de escala d_s no eixo x (TOMMASELLI, 1999). A distância focal faz parte do modelo dos planos equivalentes para resseção espacial, embora não seja tratada como incógnita. Os outros parâmetros de orientação interior são corrigidos previamente. Além disso, uma modificação no modelo

original foi realizada por Telles e Tommaselli (2005), tendo como principal diferença, a utilização das coordenadas de dois pontos na imagem para a modelagem geométrica da reta, que era anteriormente representada pela forma paramétrica.

CAPÍTULO III

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Os materiais utilizados para o desenvolvimento do trabalho são listados a seguir:

1. Imagens CBERS-2, órbita 159 e ponto 125, a qual compreende à região do município de Presidente Prudente, cedidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE;
2. *Software* SPRING (Sistema de Processamento da Informação Georreferenciada), versão 4.01Beta;
3. *Software* MicroStation V8;
4. Compilador C++ *Builder*, versão 6;
5. Cartas Topográficas 1:10.000 (IGC) e 1:50.000 (IBGE);
6. Receptor GPS da marca *Topcon HIPER GGD*;
7. *Software* de processamento *Trimble TGO (Trimble Geomatics Office)*;
8. *Software* Halcon 7.1;
9. *Biblioteca de classes e funções UPTK (Unesp Photogrammetric Tool Kit)*.

3.2 Metodologia

O objetivo deste estudo é a correção geométrica de imagens orbitais, em especial imagens CBERS, o qual foi subdividido em algumas etapas. A primeira delas é a definição da área de interesse, e a aquisição da imagem CBERS referente à área escolhida. Além disso, a escolha da fonte de informação de controle que esteja acessível e seja adequada

ao projeto, como mapas topográficos ou levantamento de campo, também é essencial. Neste trabalho optou-se pela realização de levantamento de campo, visto que os mapas existentes com precisão adequada não compreendiam toda a área selecionada. A coleta de campo foi realizada com objetivo de determinar as coordenadas dos vértices ao longo dos eixos das rodovias que compreendem a cena CBERS usada.

Dispondo das informações necessárias ao trabalho, três etapas subsequentes foram definidas: a escolha do método de correspondência das feições homólogas; a escolha do método de extração das feições de interesse; e o desenvolvimento dos modelos de orientação exterior.

Para o processo de correspondência, a proposta inicial se baseava na projeção dos vértices das retas levantadas em campo para o espaço imagem, usando os dados de efemérides fornecidos com a imagem e, então, a localização e correspondência das retas projetadas com as retas extraídas, seria realizada pelo critério de proximidade.

O problema nesta estratégia era que o georreferenciamento com dados de efemérides da imagem deveria ser preciso, o que não ocorre com as imagens CBERS. Para minimizar este problema foi estudada uma alternativa, que seria a localização de alguns pontos de controle na região central da imagem por correspondência baseada em área, seguida do cálculo de uma transformação Afim 2D. Esta técnica exigiria a definição de uma imagem de referência com georeferenciamento preciso. Com esta transformação preliminar, os vértices das retas no espaço objeto seriam projetados para a imagem em uma região muito próxima à reta na imagem, o que garantiria a extração de retas muito próximas, resolvendo-se o problema de correspondência. Assim, o método de determinação de correspondência se restringiria à seleção da reta no espaço imagem mais próxima à reta projetada. Esta estratégia não foi inteiramente implementada, visto que o processo de correspondência por área não apresentou resultados satisfatórios nos primeiros experimentos realizados.

A partir dos vértices projetados, cada reta foi extraída individualmente com a transformada de Hough, sendo, posteriormente executado um processo de refinamento para a determinação das coordenadas com precisão subpixel.

Quanto aos modelos de orientação, foram estudados três modelos rigorosos, que fazem uso dos parâmetros físicos da geometria de aquisição da cena, para a orientação de imagens de tipo *pushbroom* linear. Dois desses modelos utilizam feições retas para relacionar os espaços objeto e imagem. O terceiro usa o modelo de colinearidade com pontos de controle de campo, o qual foi implementado, para comparação com os modelos usando feições retas.

Para avaliação comparativa dos modelos, foi realizado o cálculo dos parâmetros de orientação exterior usando os modelos matemáticos com feições retas, bem como o modelo de colinearidade com pontos, e a qualidade final foi avaliada com pontos de verificação independentes.

Com o intuito de melhorar a compreensão das etapas descritas, um fluxograma contendo um esquema dos principais passos relacionados ao trabalho é apresentado na Figura 30.

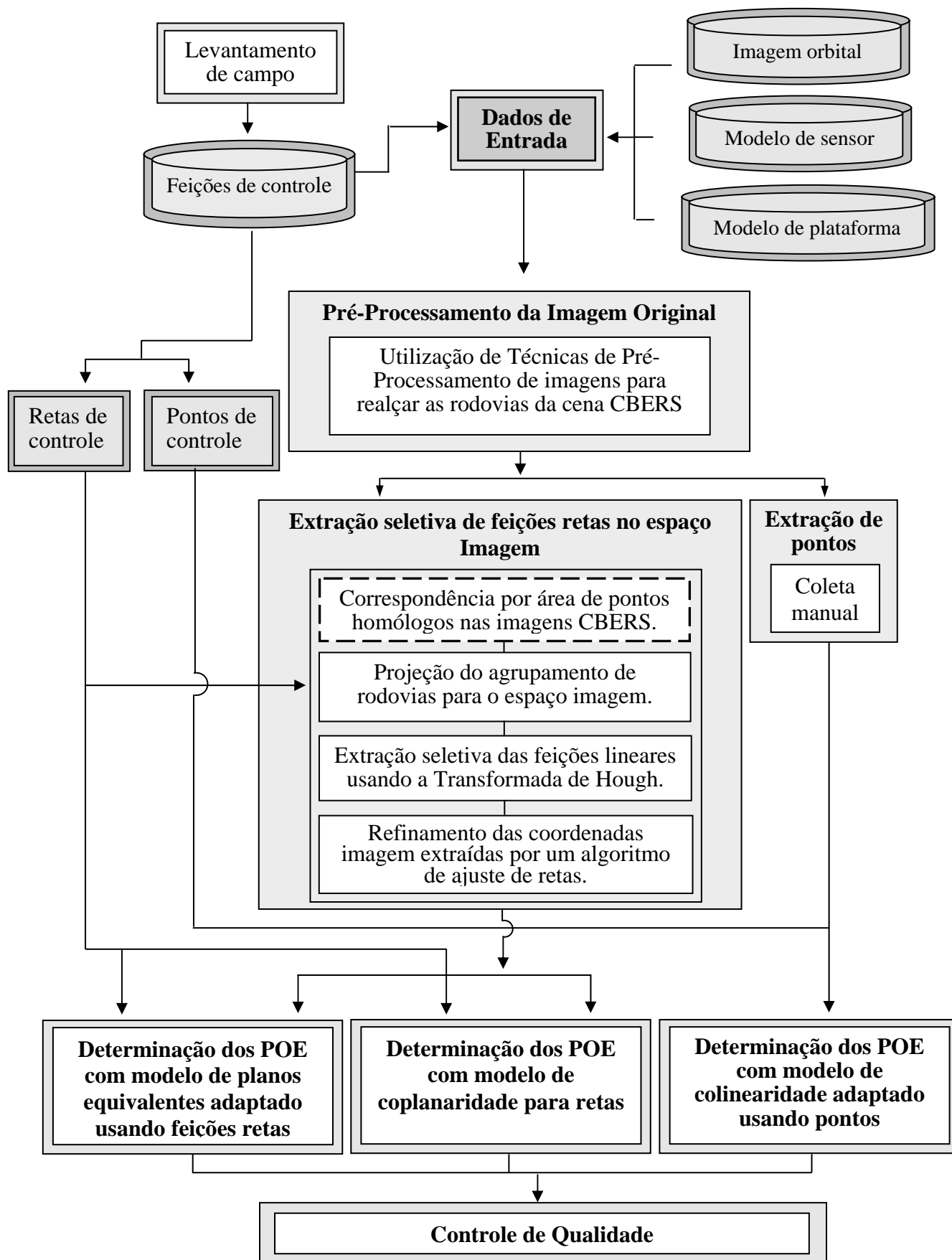


Figura 30 – Fluxograma do estudo realizado com processos para orientação automática.

3.2.1 Dados de entrada

Os dados de entrada utilizados no trabalho são imagens orbitais CBERS do sensor CCD nível 1, modelo do sensor (distância focal e tamanho do pixel), modelo de plataforma aproximado (Posição aproximada da plataforma (efemérides), e um arquivo de coordenadas (E, N, h) com os vértices de feições correspondentes às rodovias, compreendendo a região de estudo levantadas por GPS.

As imagens CBERS cedidas gratuitamente pelo INPE foram coletadas em 14 de dezembro de 2005 e correspondem à órbita 159 e ponto 125 (Latitude: $-21^{\circ} 47' 30,84''$, Longitude: $-51^{\circ} 34' 13,08''$ e Latitude: $-22^{\circ} 57' 20,52''$, Longitude: $-50^{\circ} 43' 23,52''$), onde está localizada a cidade de Presidente Prudente, contida na área de estudo deste trabalho. Essa região foi escolhida, devido a fatores práticos, como a facilidade para realizar um levantamento de campo menos oneroso e mais rápido.

As imagens CBERS utilizadas foram adquiridas pelo sensor CCD, do satélite CBERS 2, nos canais multiespectrais 1, 2, 3 e 4, e na banda pancromática (canal 5), e foram disponibilizadas em dois modos: o primeiro (nível 2) com georreferenciamento aproximado no Datum SAD-69, e o segundo (nível 1) sem o georeferenciamento aproximado, apenas com uma correção radiométrica.

As imagens com georreferenciamento aproximado foram úteis para facilitar no planejamento e levantamento dos eixos das rodovias. Nesta etapa uma Carta Topográfica da região na escala 1:50.000 também foi utilizada com a mesma finalidade.

Como o trabalho visava o cálculo indireto dos POE que permitem a realização da correção geométrica em imagens orbitais, foram utilizadas as imagens CBERS sujeitas apenas à correção radiométrica.

Apesar das imagens CBERS, no modo básico (nível 2), serem distribuídas com um georreferenciamento aproximado (em formato GEOTIF), essa aproximação, no entanto, apresenta erros de translação da ordem de quilômetros, devido aos problemas relacionados com os sensores embarcados, que neste caso são giroscópios, sensores de horizonte e sensor solar.

A fim de avaliar esse erro posicional, foi realizada a sobreposição de uma composição colorida (composta pelas cores RBG (*Red, Blue, Green*) associadas aos canais 2 (região do verde), 3 (região do vermelho) e 4 (região do infra-vermelho próximo),

respectivamente) com uma base cartográfica digital do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC) na escala de 1:10.000, usando o *software MicroStation*.

As Cartas Topográficas digitais, usadas no processo de sobreposição, foram úteis para a quantificação da acurácia do georreferenciamento das imagens, mas não foram utilizadas como controle de campo na etapa de levantamento das rodovias, visto que compreendiam apenas uma pequena área da região de interesse e as informações altimétricas não estavam disponíveis.

Como as imagens CBERS são referenciadas ao Datum SAD-69 e a base cartográfica (escala 1:10.000) ao Datum Córrego Alegre, houve a necessidade de uma transformação de Datum para a realização da sobreposição dessas informações.

A Figura 31 ilustra um trecho da imagem CBERS, onde as feições espaciais estão sobrepostas à composição colorida.

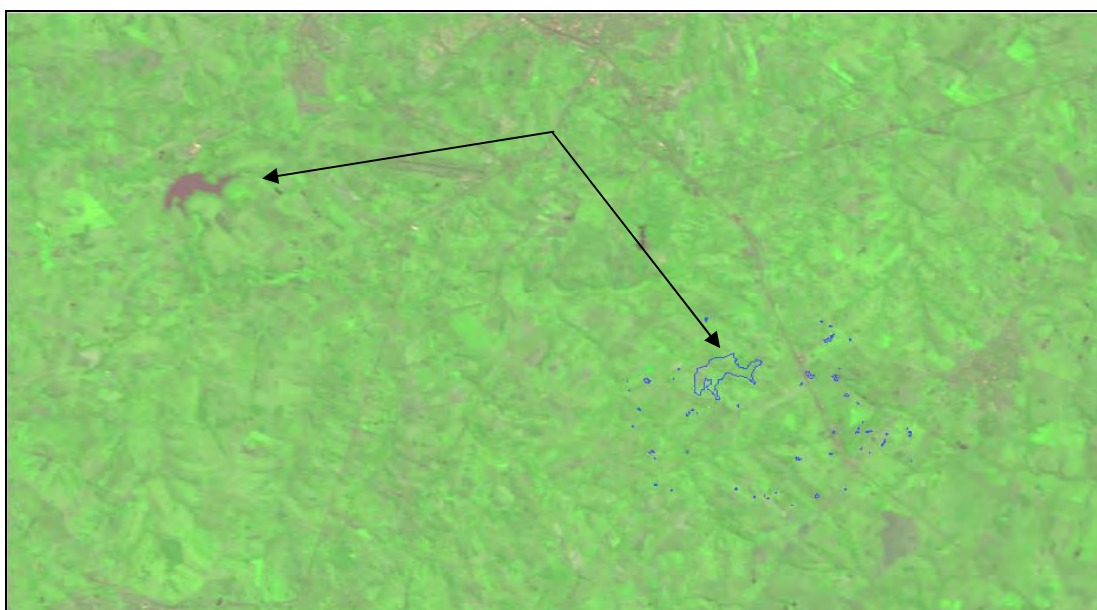


Figura 31 – Imagem ilustrando a sobreposição da composição colorida da cena CBERS e do vetor com o nível lagos.

A Figura 31 apresenta a sobreposição da imagem com os vetores extraídos da carta, da qual apenas o nível lagos foi ativado. A ilustração isolada desse nível foi realizada para facilitar a análise visual do deslocamento existente entre as duas bases de informação. No arquivo vetorial, a represa da Cica (localizada próxima ao bairro Ana Jacinta no município de Presidente Prudente) é uma feição bem definida e de maior extensão, podendo assim ser identificada mais facilmente.

Analisando a Figura 31 pode-se verificar visualmente, que existe de fato, um deslocamento considerável entre as duas bases (imagem/vetor), apresentando-se principalmente como translações nas direções E e N, e que os erros em rotação são pequenos e pouco perceptíveis. Além da análise visual, uma análise estatística (Tabela 2) foi feita através do erro médio (EM) das discrepâncias nas coordenadas de seis pontos determinados em ambas as bases (imagem/vetor). Apesar dos pontos escolhidos não serem bem definidos (Figura 32), a análise foi feita para verificar apenas um deslocamento aproximado entre a imagem e a base cartográfica.



Figura 32 - Pontos escolhidos para a análise estatística.

Tabela 2 - Coordenadas dos seis pontos e o erro médio em E e N.

<i>Ponto</i>	Coord. E – Imagem (m)	Coord. E – Carta 1:10000 (m)	Discrep. E (m)	Coord. N – Imagem (m)	Coord. N – Carta 1:10000 (m)	Discrep. N (m)
01	438458,29	450568,87	12110,58	7551203,76	7546611,34	4592,42
02	438630,16	450660,80	12030,64	7551571,48	7547130,93	4440,54
03	439773,66	451368,25	11594,59	7551567,48	7546983,05	4584,43
04	439473,50	451512,14	12038,63	7551995,15	7547526,62	4468,52
05	438798,03	450884,63	12086,59	7552091,07	7547714,48	4376,59
06	438106,57	450109,236	12002,66	7551219,75	7546711,26	4508,49
-	-	-	EM E	-	-	EM N
-	-	-	11977,281	-	-	4495,165

Como pode ser observado na Tabela 2, o erro médio na direção E é de aproximadamente 12 km, e na direção N de aproximadamente 5 km. Como já foi mencionado, este deslocamento é causado por erros derivados dos sensores embarcados no satélite e neste caso, correções geométricas com os elementos de efemérides não são eficazes.

3.2.1.1. Pré-Processamento

A etapa de pré-processamento foi realizada com técnicas de realce de imagens, existentes no *software* HALCON 7.1, visando destacar as feições de interesse, no caso as rodovias contidas na região de estudo, para facilitar a etapa subsequente de extração de feições.

O *software* HALCON é um conjunto de ferramentas em um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) para Visão Computacional. Neste sistema existe a possibilidade de aplicações de funções pré-existentes, bem como implementações de rotinas, visando resolver tarefas de análise de imagens.

A fonte de informação usada tanto na etapa de pré-processamento, como na etapa de extração, foi a banda 4 correspondente à região do infra-vermelho próximo, ao invés da composição colorida das imagens CBERS. Isto se deve ao fato de que nos algoritmos envolvidos no processo de extração, principalmente para a transformada de Hough, o uso de imagens em tons de cinza é mais adequado. A banda 4 foi escolhida por apresentar a informação de interesse com maior destaque na cena, quando comparada às outras bandas do espectro disponíveis (bandas 1, 2 e 3).

Alguns índices para realce foram estudados, considerando os padrões repetitivos em todas as bandas do espectro referentes ao satélite CBERS, como os níveis de brilho das rodovias. No entanto os resultados não foram satisfatórios e, portanto, não foram utilizados nos experimentos.

A banda 4 utilizada nos experimentos é oriunda do processamento em Nível 1, visto que nesse nível a correção geométrica com dados de efemérides, ainda não foi aplicada.

As imagens CBERS distribuídas gratuitamente aos usuários pelo INPE em formato GEOTIFF, são processadas em Nível 2, com a aplicação de uma correção geométrica de sistema, sobre a imagem em Nível 1, mas com dados de plataforma e sem uso de pontos de controle.

Como o intuito desse trabalho é determinar os parâmetros de orientação exterior visando uma correção geométrica na imagem, foram utilizadas as imagens CBERS em Nível 1. Assim, quando for citada a banda 4 no corpo do texto, fica subentendido que é a imagem com processamento em Nível 1.

A fim de realçar as informações de interesse na cena, duas técnicas simples de pré-processamento foram usadas: a filtragem e a operação de contraste.

As técnicas de filtragem baseadas em níveis de brilho não dependem apenas do nível de cinza de um dado pixel, mas também dos valores dos níveis de cinza dos pixels vizinhos. As técnicas aplicadas objetivam a suavização dos detalhes da imagem, e a minimização dos ruídos, bem como a manipulação de contraste, visando aumentar a discriminação visual entre os objetos presentes na cena.

O pré-processamento da banda 4 foi realizado pelo operador '*emphasize*' disponível no *software* HALCON 7.1. O operador '*emphasize*' tem como finalidade realçar as áreas de alta frequência da imagem (bordas).

O primeiro procedimento realizado por esse operador é uma filtragem com um filtro passa baixa, através da função média ('*mean_image*'). Essa função realiza a suavização usando a média dos valores de brilho em uma máscara da imagem de entrada. Sua finalidade é atenuar as altas frequências, correspondentes às transições abruptas da cena, e minimizar a presença de ruídos.

A partir dos valores obtidos com a suavização, o realce é feito usando os valores originais (*orig*) da imagem de entrada, um fator de intensidade (*factor*) e os valores suavizados (*mean*), pela fórmula: $res = round((orig - mean) * factor) + orig$. O tamanho da máscara usada nesse processamento para a etapa de suavização foi de 9x9, e o fator de amplificação do contraste foi definido pelo maior valor sugerido na função (valor 2,0).

Um trecho da imagem original e o resultado do processamento são apresentados nas Figuras 33a e 33b, respectivamente.

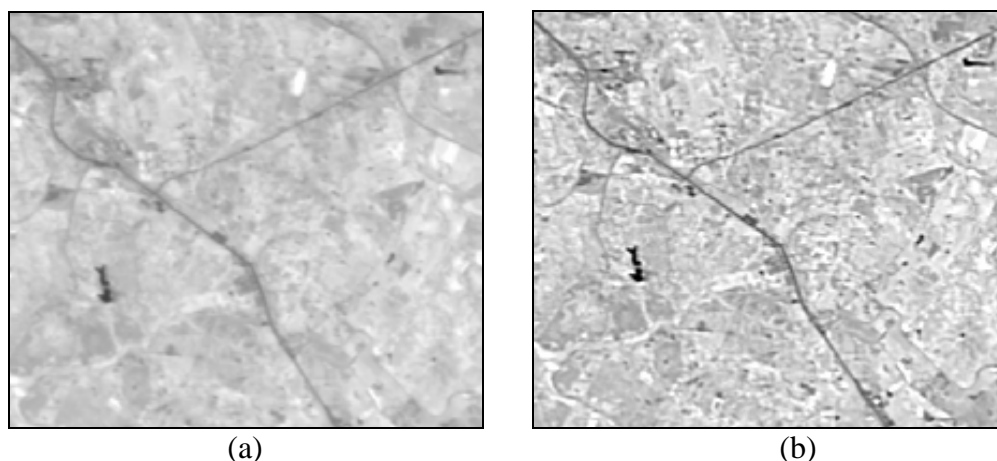


Figura 33 - Imagem ilustrando um trecho da cena da banda 4 (a), e trecho da cena pré-processada (b).

Analisando visualmente o resultado obtido com o processo de realce (Figura 33b) verifica-se que, de modo geral, as feições de interesse foram realçadas com tons de cinza mais escuros. Como este processo utiliza somente os níveis de cinza da imagem, é natural que outras feições, que tenham níveis de cinza próximos aos das rodovias também sejam realçadas.

O resultado apresenta-se satisfatório, embora a tonalidade dos segmentos das rodovias possua uma variação de uma região para outra. Devido a isso, um intervalo de valores de brilho foi utilizado na etapa de limiarização, ao invés de um valor único para o limiar da função.

3.2.1.2 Levantamento dos eixos das Rodovias

A área em que foi realizada a coleta dos eixos das rodovias compreende parte de dois estados, o Estado de São Paulo e o Estado do Paraná, a qual foi definida de acordo com a região de cobertura da imagem CBERS.

A etapa de levantamento dos eixos das rodovias foi precedida de um planejamento dos aspectos fundamentais para a realização da coleta em campo.

Nesse planejamento foram consideradas as seguintes questões:

- o melhor trajeto;
- o método de posicionamento a ser adotado, e;
- o equipamento a ser utilizado.

Como a região de interesse para o levantamento dos dados é de grande extensão, o melhor trajeto foi considerado a fim de evitar um levantamento oneroso. Desta forma, o melhor trajeto foi estabelecido considerando os trechos que não necessitariam ser revisitados, e a passagem mínima pelos trechos que seriam úteis para a coleta de outros trechos. Assim, quatro sub-regiões foram definidas de modo a considerar essas questões. A Figura 34 apresenta os mapas rodoviários da região de estudo.

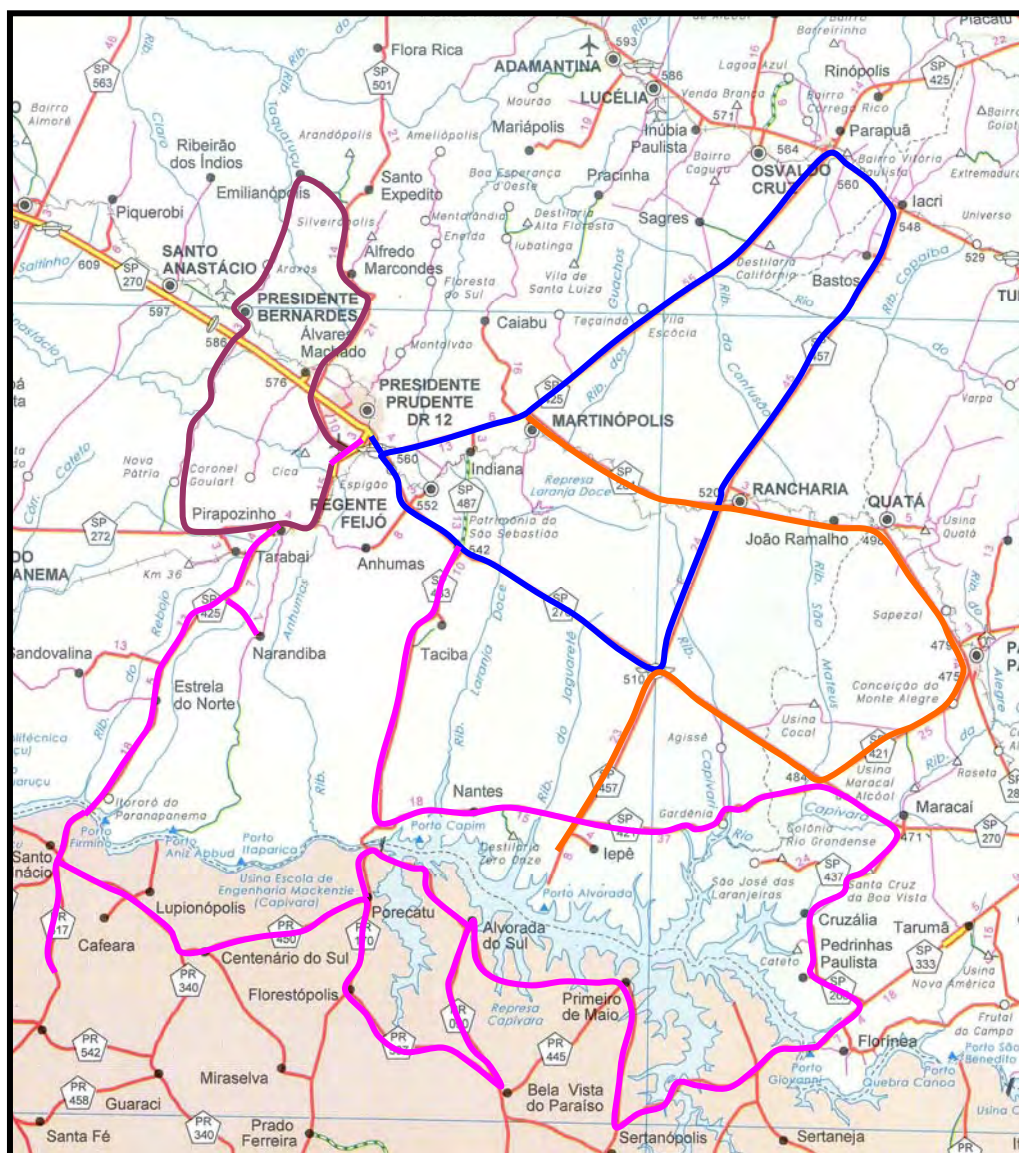


Figura 34 - Trecho do mapa rodoviário do Estado de São Paulo com as sub-regiões usadas no levantamento.

Fonte: Departamento de Estradas de Rodagem (DER), edição 2001.

O método de posicionamento adotado para o levantamento dos eixos das rodovias foi o relativo cinemático, e como nesse método é necessário o uso de pelo menos dois receptores, a estação GPS PPTE localizada em Presidente Prudente, pertencente a Rede

Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) foi utilizada como receptor base, e o outro receptor, considerado como móvel, foi o receptor da marca *Topcon HIPER GGD*.

Este receptor foi escolhido por dois motivos: primeiro por fazer parte do acervo do laboratório de Geodésica da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) de Presidente Prudente, e segundo por ser um receptor de dupla frequência, possuindo as portadoras L1 e L2, e assim, permitir o uso em maiores distâncias com relação à base.

O receptor móvel foi colocado num veículo da FCT de Presidente Prudente, no qual há um suporte para a antena do receptor. O veículo se deslocou com uma velocidade média de 80 a 100 km por hora. A coleta das observações foi realizada de 3 em 3 segundos, e nas curvas a velocidade era diminuída para que mais pontos fossem coletados, visando uma melhor representação da curva.

Os dados coletados pelo receptor móvel foram pós-processados com os dados da base coletados pelo receptor da estação GPS da RBMC usando o *software TGO*. Após serem analisados os relatórios de processamento, correspondentes aos segmentos das rodovias, o arquivo com os dados foi exportado para o *software MicroStation V8*, onde foi feita a edição dos dados.

A Figura 35 ilustra a nuvem de pontos das rodovias coletadas em campo, sobreposta à imagem CBERS.

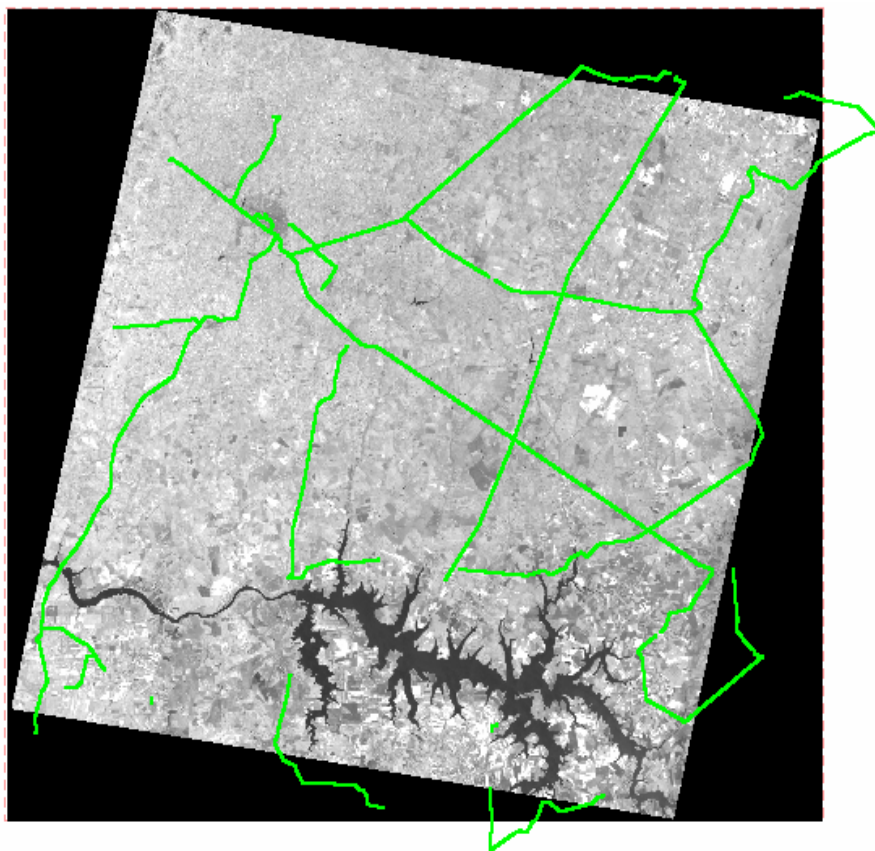


Figura 35 - Imagem da sobreposição dos eixos das rodovias coletados (em verde) e imagem da banda 4 CBERS.

Alguns segmentos de rodovias foram retirados do arquivo de dados, principalmente da parte inicial da imagem (região do Estado do Paraná) por apresentarem erros elevados no pós-processamento, devido provavelmente a problemas relacionados às perdas de sinais.

3.2.2 Extração de feições

Inicialmente o processo de extração de feições foi concebido para ser automático. No entanto, devido às restrições ao escopo deste trabalho e aos problemas com as imagens CBERS, a correspondência de alguns pontos do espaço objeto com seus homólogo no espaço imagem, teve que ser estabelecida manualmente, tornando assim o processo semi-automático. Esta etapa poderá ser automatizada em trabalhos futuros.

Neste processo, algumas funções, como a transformada de Hough, foram desenvolvidas, tendo como entrada a imagem de rodovias pré-processada (Figura 34).

O conjunto de rodovias usado como controle de campo é ilustrado na Figura 36.

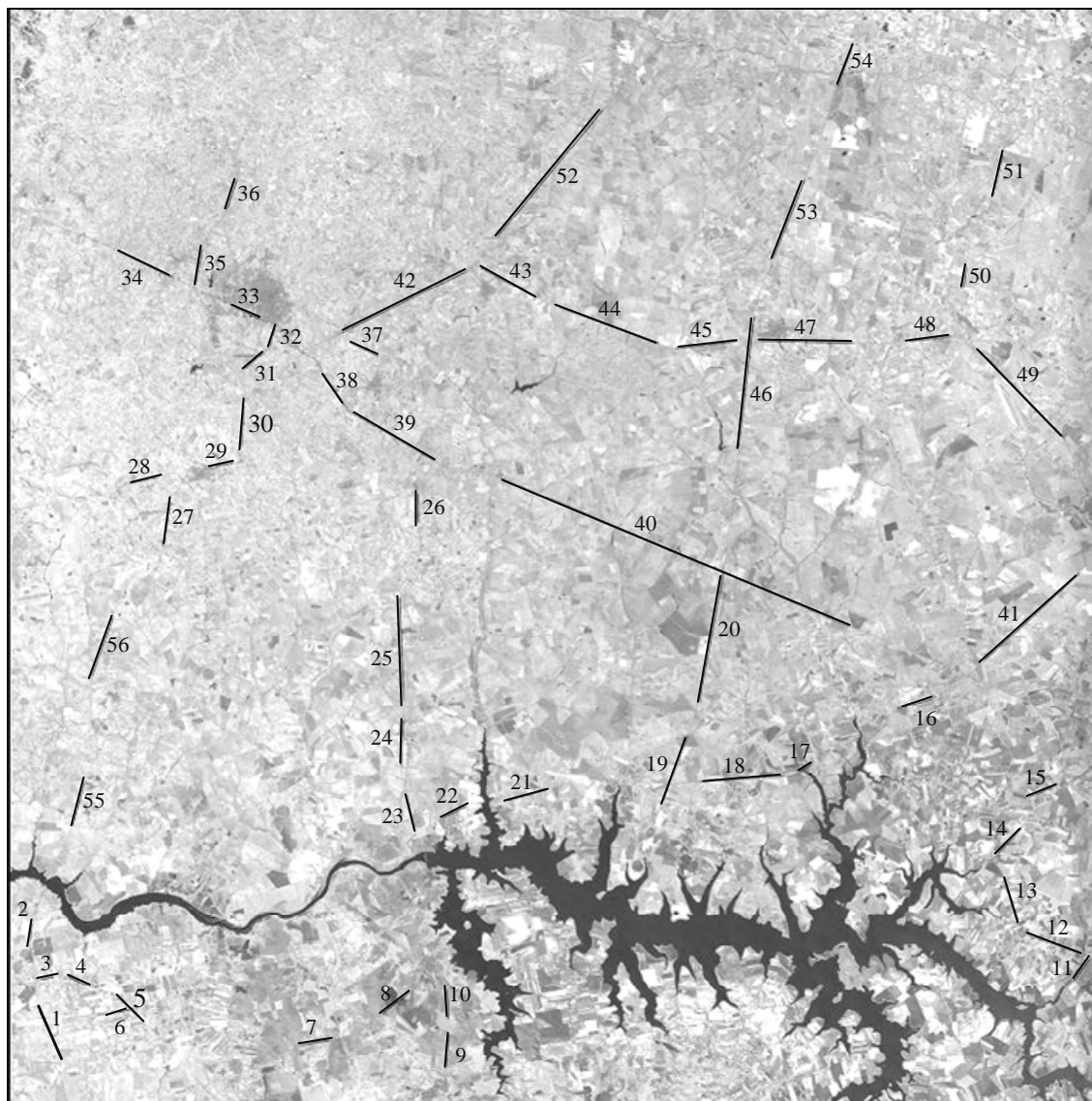


Figura 36 - Imagem CBERS com os eixos de rodovias usados como controle de campo para os experimentos.

Como ilustrado no fluxograma (Figura 30), na etapa de extração, alguns passos são necessários para a determinação das coordenadas imagem de pontos pertencentes às retas.

O primeiro passo é a identificação de alguns pontos de controle para melhorar a precisão do georreferenciamento da imagem, (para o caso da imagem CBERS). A estratégia de correspondência proposta tinha como finalidade utilizar 5 pontos na região central de uma imagem de referência CBERS, com georreferenciamento preciso (escolhidos na região central para garantir que sempre apareçam em qualquer cena na mesma órbita-

ponto) a fim de melhorar a correção geométrica da imagem CBERS considerada. Como os resultados obtidos com esta função de correspondência por área não foram efetivos, esta etapa foi realizada manualmente. Foram escolhidos 15 pontos do arquivo de feições coletadas com GPS e seus homólogos na imagem CBERS, para determinar os parâmetros da transformação Afim 2D.

A transformação Afim 2D foi usada para projetar as coordenadas dos vértices de cada reta do espaço objeto para o espaço imagem, e assim, limitar a região dos processamentos para extração das retas contidas na imagem CBERS. A figura 37 ilustra os passos do processo.

É importante ressaltar que se a imagem orbital possuir um bom georreferenciamento, a transformada de Hough pode ser usada diretamente, sem realizar a etapa de correspondência dos pontos na região central da imagem, que visa apenas melhorar o georreferenciamento da imagem. Caso este georreferenciamento seja suficientemente preciso, as feições do espaço objeto projetadas para o espaço imagem estariam muito próximas às feições correspondentes a serem extraídas na imagem, o que reduziria significativamente o espaço de busca. Quando não ocorre esta situação, como no caso das imagens CBERS, deve-se tentar melhorar o georreferenciamento. Uma outra alternativa seria realizar a correspondência relacional entre as linhas retas no espaço objeto projetadas para o espaço imagem e as linhas retas extraídas na imagem. Isto poderia ser feito numa pirâmide de imagens, usando apenas o nível de resolução mais baixo, como uma forma de “casar” o conjunto das retas levantadas em campo com o conjunto extraído na imagem. Depois, bastaria fazer o refinamento na imagem de maior resolução.

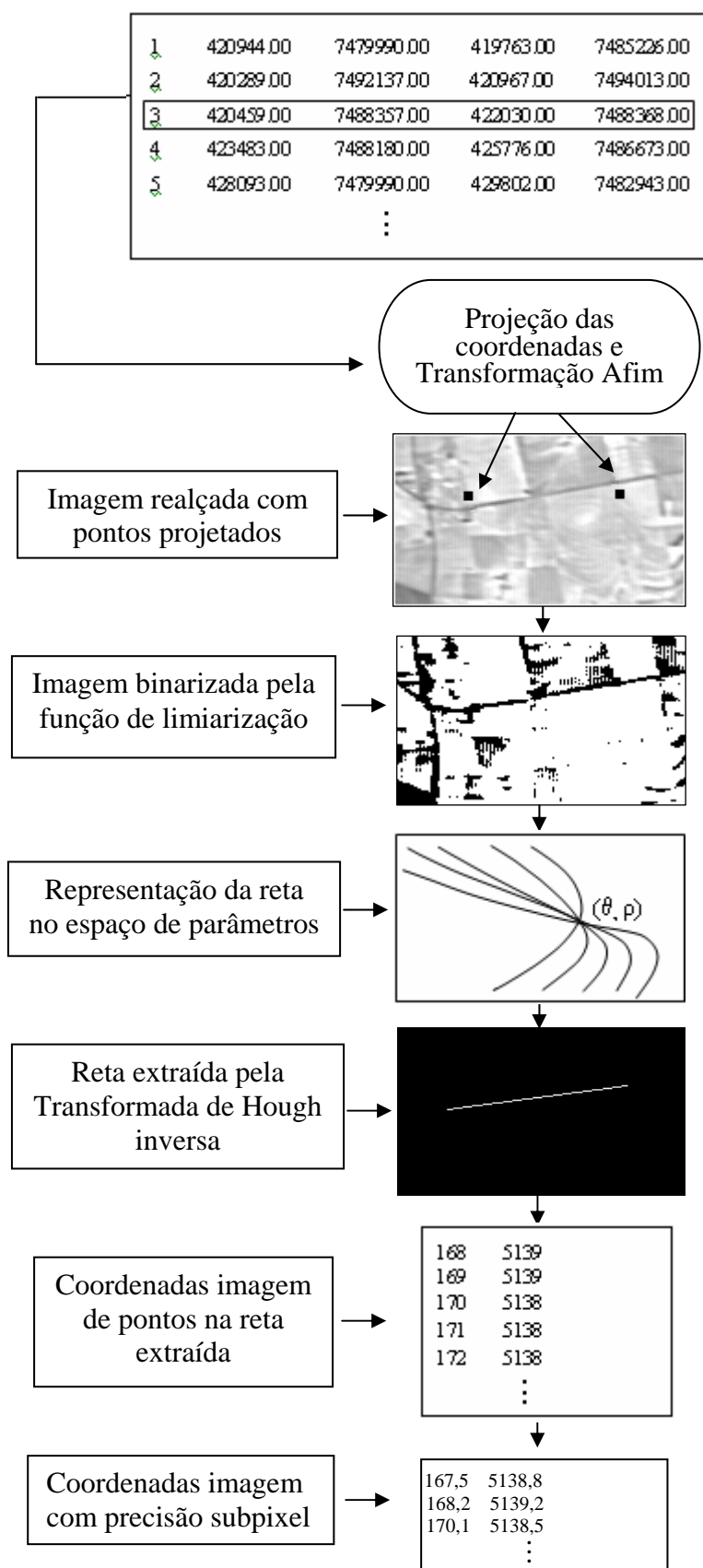


Figura 37 - Sequência do processo de extração.

Como pode ser visto na Figura 37, a região de cada reta do espaço objeto, projetada para o espaço imagem, a partir dos extremos da reta usando a transformação Afim 2D, passa por um processo de limiarização, visando separar as informações de interesse, além de tornar a imagem binária, que é a informação de entrada para a transformada de Hough.

No processo de limiarização, foi estabelecido um intervalo com dois limiares (inferior e superior), a partir de valores de níveis de cinza observados interativamente nas rodovias contidas na imagem CBERS.

Como no processo de limiarização podem ocorrer problemas de contraste, quando a região de estudo possui nível de cinza semelhante ao da rodovia, algumas retas tiveram que ser retiradas do processamento, por indeterminação da reta, ou mesmo a determinação incorreta. A figura 38 ilustra um caso onde uma reta encontra-se em região de baixo contraste. Tais problemas poderiam ser minimizados no futuro com o uso de filtros adaptativos de realce de linhas.



Figura 38 - Trecho da imagem CBERS ilustrando uma rodovia em uma região de baixo contraste.

Assim, das 56 retas originalmente estabelecidas a partir das rodovias levantadas em campo (Figura 36), foram utilizadas no processamento 53 retas, devido aos problemas citados com o processo de limiarização. Além disso, o intervalo geral que foi estabelecido pelos dois limiares atendeu com sucesso a extração de 38 das 53 retas, sendo que para o restante das retas, outros valores particulares tiveram que ser utilizados. Esta etapa do processo poderia ser melhorada usando técnicas de classificação, sendo este estudo uma sugestão para trabalhos futuros.

De acordo com a seqüência de passos da transformada de Hough, após o processo de limiarização, para cada ponto da reta do espaço imagem foi associada uma curva senoidal no espaço de parâmetros. Como foi usado um intervalo específico para (θ, ρ) , usando o θ aproximado, determinado a partir dos pontos projetados de cada reta, houve uma significativa redução do espaço de acumulação. As coordenadas coluna-linha dos pontos pertencentes à reta extraída foram então lidas e armazenadas num arquivo texto.

A extração pela transformada de Hough foi realizada com precisão ao nível do pixel e, para se obter coordenadas com precisão subpixel, uma função de refinamento foi usada. Essa função é baseada no ajuste de uma superfície cilíndrica parabólica, desenvolvida por BAZAN et al. (2004).

Usando esta função de ajuste, três das 53 retas foram eliminadas, devido a problemas relacionados com o processo de limiarização existente nessa função. Assim, as coordenadas subpixel de vértices de 50 retas foram usadas como observações nos modelos de orientação.

De modo geral, a abordagem de extração utilizada mostrou-se eficiente dentro das condições propostas. A eficiência dessa abordagem se deve, principalmente, aos bons resultados nos processos de limiarização e pré-processamento.

3.2.3 Métodos de orientação baseados em modelos físicos

Os modelos rigorosos, ou físicos, foram desenvolvidos a fim de considerar uma representação matemática da realidade física do sensor, que neste caso é do tipo *pushbroom* linear.

Nos modelos estudados neste trabalho, as entidades usadas como elemento de relacionamento entre o espaço objeto e imagem são feições lineares, mais especificamente eixos de rodovias.

Além dos modelos propostos que fazem uso de feições retas, o modelo de colinearidade usando pontos de controle também foi implementado visando sua comparação aos modelos com retas. A seguir uma descrição do desenvolvimento de cada modelo é apresentada.

3.2.3.1 Modelo dos Planos Equivalentes Adaptado

Ao contrário dos modelos baseados nas equações de colinearidade, que usam pontos, um modelo matemático usando feições retas foi desenvolvido com base nos planos equivalentes (TOMMASELLI e TOZZI, 1996), adaptado com relação à geometria de aquisição da imagem.

Esse modelo tem como finalidade determinar indiretamente os parâmetros de orientação exterior de imagens orbitais usando linhas retas como controle. Para que esse modelo de orientação possa ser usado com imagens orbitais, algumas adaptações devem ser realizadas para modelar a geometria de um sensor *pushbroom* linear.

Como as imagens de sensores *pushbroom* linear não são instantâneas, cada linha da imagem é tomada de uma posição e orientação diferentes, sendo três coordenadas do centro perspectivo e três ângulos de atitude. Assim, tem-se um grupo de 6 incógnitas para cada linha da imagem. Tal fato deve ser considerado quando se quer usar esse tipo de imageamento.

Para utilizar esse modelo de plataforma, os parâmetros de orientação exterior podem ser modelados com os polinômios de Orun e Natarajen (1994), e inseridos nas equações do modelo de planos equivalentes.

No modelo de planos equivalentes, uma reta no espaço objeto, sua homóloga no espaço imagem e o centro perspectivo determinam planos que são equivalentes, se uma seqüência de rotações apropriadas for aplicada. Isto implica em afirmar que o vetor normal ao plano no espaço objeto pode ser rotacionado para se tornar paralelo ao vetor normal ao plano no espaço imagem; após estas rotações há apenas uma diferença de normas entre os vetores normais.

Assim, no modelo de planos equivalentes, duas retas podem ser relacionadas no espaço imagem e espaço objeto considerando que seus vetores normais (\vec{n}, \vec{N}) são paralelos após a aplicação de uma matriz de rotação (o fator de escala λ , na Equação 36 absorve a diferença de normas entre os vetores normais).

$$\vec{n} = \lambda \cdot R \cdot \vec{N} \quad (36)$$

No caso de sensores *pushbroom* lineares a posição do Centro Perspectivo (CP) muda a cada linha da cena (Figura 39). Assim, o CP não é mais um único ponto, mas

uma nuvem de pontos, um para cada linha da imagem, e estes pontos que descrevem a trajetória da plataforma, podem ser modelados por um polinômio.

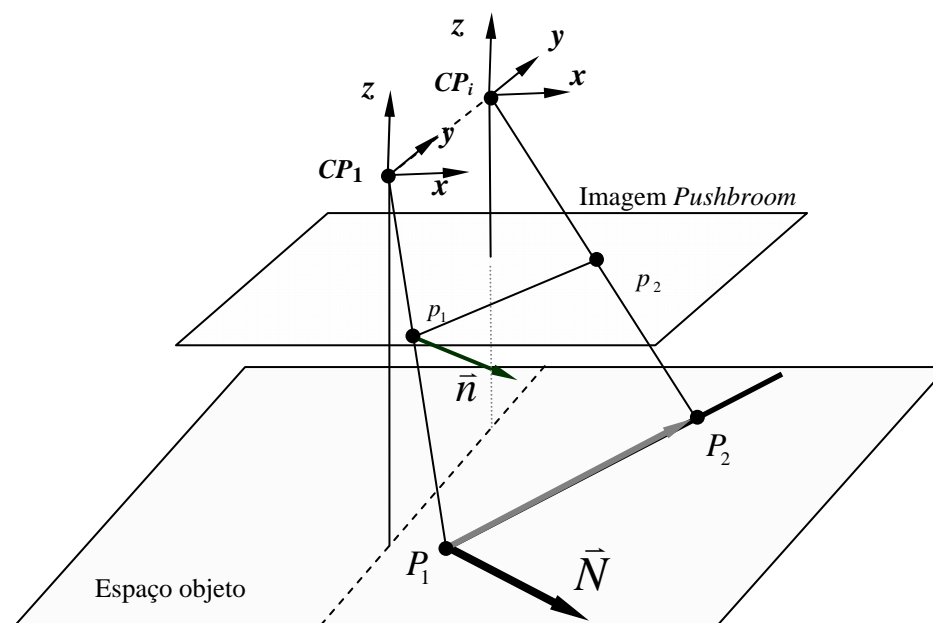


Figura 39 - Vetores normais em relação aos planos de interpretação no espaço imagem para as n linhas e no espaço objeto.

As Equações 37 definem o modelo de polinômios, com os 12 parâmetros incógnitos. Nesse modelo os parâmetros ϕ e ω são considerados como constantes ($\phi = 0$ e $\omega = 0$). Caso se queira utilizá-los como incógnitas, os resultados podem conduzir a soluções muito instáveis, visto que são altamente correlacionados (tais correlações foram descritas na Seção 2.10.2.1).

$$\begin{aligned}
 X_s &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\
 Y_s &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\
 Z_s &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\
 \kappa_s &= \kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2
 \end{aligned}
 \tag{37}$$

onde:

$a_1 \dots a_4$ e $b_1 \dots b_4$ são variáveis a serem determinadas;

X_0, Y_0, Z_0 são as coordenadas do Centro Perspectivo do sensor no referencial do terreno no instante $t=0$;

X_s, Y_s, Z_s são as coordenadas do Centro Perspectivo do sensor no referencial do terreno num dado instante de tempo t ;

t é a diferença de tempo entre as posições do satélite no instante $O(X_0, Y_0, Z_0)$ e $S(X_s, Y_s, Z_s)$, para cada linha imageada.

Porém, a ordem do polinômio pode ser alterada considerando outras possibilidades, para adequar da melhor forma o comportamento da plataforma e o número de observações existentes.

Desenvolvendo a Equação 36, tem-se que:

$$\begin{aligned} r_{11}N_1 + r_{12}N_2 + r_{13}N_3 &= -\lambda f \Delta y \\ r_{21}N_1 + r_{22}N_2 + r_{23}N_3 &= \lambda f \Delta x \\ r_{31}N_1 + r_{32}N_2 + r_{33}N_3 &= \lambda(x_2y_1 - x_1y_2) \end{aligned} \quad (38)$$

Os componentes do vetor normal ao plano de interpretação no espaço imagem são, portanto, dados por:

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} -f \cdot \Delta y \\ f \cdot \Delta x \\ x_2y_1 - x_1y_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f^*(y_2 - y_1) \\ f^*(x_1 - x_2) \\ x_2y_1 - x_1y_2 \end{bmatrix} \quad (39)$$

onde:

f é a distância focal;

(x_1, y_1) são coordenadas imagem do primeiro ponto da reta;

(x_2, y_2) são coordenadas imagem do segundo ponto da reta.

Os componentes do vetor normal ao plano no espaço objeto, são dados por N_1, N_2 e N_3 :

$$\begin{aligned} N_1 &= (Y_2 - Y_1)(Z_1 - Z_s) - (Y_1 - Y_s)(Z_2 - Z_1) \\ N_2 &= (X_1 - X_s)(Z_2 - Z_1) - (X_2 - X_1)(Z_1 - Z_s) \\ N_3 &= (X_2 - X_1)(Y_1 - Y_s) - (X_1 - X_s)(Y_2 - Y_1) \end{aligned} \quad (40)$$

onde:

(X_1, Y_1, Z_1) coordenadas do primeiro ponto da reta no referencial de terreno;

(X_2, Y_2, Z_2) coordenadas do segundo ponto da reta no referencial de terreno;

(X_s, Y_s, Z_s) são as coordenadas do Centro Perspectivo do sensor no referencial do terreno num instante t ;

Substituindo os termos dos polinômios (Equações 37) nos componentes do vetor normal N_1 , N_2 e N_3 (Equações 40) chegamos às Equações 41:

$$\begin{aligned} N_1 &= (Y_2 - Y_1)(Z_1 - (Z_0 + a_3t + b_3t^2)) - (Y_1 - (Y_0 + a_2t + b_2t^2))(Z_2 - Z_1) \\ N_2 &= (X_1 - (X_0 + a_1t + b_1t^2))(Z_2 - Z_1) - (X_2 - X_1)(Z_1 - (Z_0 + a_3t + b_3t^2)) \\ N_3 &= (X_2 - X_1)(Y_1 - (Y_0 + a_2t + b_2t^2)) - (X_1 - (X_0 + a_1t + b_1t^2))(Y_2 - Y_1) \end{aligned} \quad (41)$$

Desenvolvendo as Equações 41, tem-se:

$$\begin{aligned} N_1 &= \Delta Yt a_3 + \Delta Yt^2 b_3 - \Delta Zt a_2 - \Delta Zt^2 b_2 + (\Delta YZ_0 - \Delta YZ_1 - \Delta ZY_0 + \Delta ZY_1) \\ N_2 &= \Delta Xt a_3 + \Delta Xt^2 b_3 - \Delta Zt a_1 - \Delta Zt^2 b_1 + (\Delta ZX_1 - \Delta ZX_0 - \Delta XZ_1 + \Delta XZ_0) \\ N_3 &= -\Delta Xt a_2 - \Delta Xt^2 b_2 + \Delta Yt a_1 - \Delta YZt^2 b_1 + (\Delta XY_1 - \Delta XY_0 - \Delta YX_1 + \Delta YX_0) \end{aligned} \quad (42)$$

Considerando que t (diferença de tempo em relação à primeira linha) varia a cada linha da imagem, os componentes N_1 , N_2 e N_3 assumem novos valores referentes a cada linha, como mostram as Equações 43.

$$\begin{aligned} N_{11} &= \Delta Yt_1 a_3 + \Delta Yt_1^2 b_3 - \Delta Zt_1 a_2 - \Delta Zt_1^2 b_2 + (\Delta YZ_0 - \Delta YZ_1 - \Delta ZY_0 + \Delta ZY_1) \\ N_{21} &= \Delta Xt_1 a_3 + \Delta Xt_1^2 b_3 - \Delta Zt_1 a_1 - \Delta Zt_1^2 b_1 + (\Delta ZX_1 - \Delta ZX_0 - \Delta XZ_1 + \Delta XZ_0) \\ N_{31} &= -\Delta Xt_1 a_2 - \Delta Xt_1^2 b_2 + \Delta Yt_1 a_1 - \Delta YZt_1^2 b_1 + (\Delta XY_1 - \Delta XY_0 - \Delta YX_1 + \Delta YX_0) \\ &\quad \vdots \\ N_{1n} &= \Delta Yt_n a_3 + \Delta Yt_n^2 b_3 - \Delta Zt_n a_2 - \Delta Zt_n^2 b_2 + (\Delta YZ_0 - \Delta YZ_1 - \Delta ZY_0 + \Delta ZY_1) \\ N_{2n} &= \Delta Xt_n a_3 + \Delta Xt_n^2 b_3 - \Delta Zt_n a_1 - \Delta Zt_n^2 b_1 + (\Delta ZX_1 - \Delta ZX_0 - \Delta XZ_1 + \Delta XZ_0) \\ N_{3n} &= -\Delta Xt_n a_2 - \Delta Xt_n^2 b_2 + \Delta Yt_n a_1 - \Delta YZt_n^2 b_1 + (\Delta XY_1 - \Delta XY_0 - \Delta YX_1 + \Delta YX_0) \end{aligned} \quad (43)$$

Para o modelo de planos equivalentes adaptado, apenas o primeiro e último pontos de cada reta, em dois instantes distintos t , são considerados.

Outra mudança que ocorre no modelo de planos equivalentes adaptado está relacionada à matriz de rotação. No novo modelo, a matriz de rotação é simplificada com relação aos elementos ϕ e ω . Nesta simplificação o ângulo ϕ é considerado nulo. Para o caso do sensor CBERS não há problemas, porém, para outros sensores ϕ pode variar e nestes casos, seria necessário incluí-lo na matriz. Além disso, a outra simplificação refere-se ao ângulo ω considerado com um valor fixo. Já o ângulo k é representado por um polinômio de segundo grau. A matriz simplificada é apresentada na Equação 44.

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2) & \cos \omega \operatorname{sen}(\kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2) & \operatorname{sen} \omega \operatorname{sen}(\kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2) \\ -\operatorname{sen}(\kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2) & \cos \omega \cos(\kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2) & \operatorname{sen} \omega \cos(\kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2) \\ 0 & -\operatorname{sen} \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (44)$$

Considerando os novos componentes (Equações 41 e 44) na Equação 38, e a fim de eliminar o elemento λ , a primeira e terceira Equações 38 são divididas pela segunda, resultando em:

$$\begin{aligned} \frac{r_{11}N_1 + r_{12}N_2 + r_{13}N_3}{r_{21}N_1 + r_{22}N_2 + r_{23}N_3} &= \frac{-\Delta y_{12}}{\Delta x_{12}} \\ f * \frac{r_{31}N_1 + r_{32}N_2 + r_{33}N_3}{r_{21}N_1 + r_{22}N_2 + r_{23}N_3} &= \frac{(x_2 y_1 - x_1 y_2)}{\Delta x_{12}} \end{aligned} \quad (45)$$

Os elementos do lado direito da Equação 45 podem ser substituídos pelos parâmetros angular a e linear b da reta. No entanto, ao usar estas expressões pode ocorrer uma indeterminação quando as retas forem verticais ($\Delta x = 0$). Assim, dois grupos de parâmetros são utilizados para evitar tal problema.

Para retas no intervalo do ângulo θ : $45^\circ < \theta < 135^\circ$ ou $225^\circ < \theta < 315^\circ$, que compreende as retas aproximadamente horizontais, utilizam-se os seguintes parâmetros angular e linear (a e b):

$$a = \frac{\Delta y_{12}}{\Delta x_{12}} \quad e \quad b = \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{\Delta x_{12}} \quad (46)$$

De forma análoga, no intervalo do ângulo θ de $315^\circ < \theta < 45^\circ$ ou $135^\circ < \theta < 225^\circ$, que compreende as retas aproximadamente verticais, utilizam-se os seguintes parâmetros:

$$a' = \frac{\Delta x_{12}}{\Delta y_{12}} \quad e \quad b' = \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{\Delta y_{12}} \quad (47)$$

Rearranjando a Equação 45, chega-se ao primeiro grupo de equações do modelo de estimação dos POE, considerando as retas aproximadamente horizontais:

$$\begin{aligned} a &= -\frac{r_{11}N_1 + r_{12}N_2 + r_{13}N_3}{r_{21}N_1 + r_{22}N_2 + r_{23}N_3} \\ b &= f * \frac{r_{31}N_1 + r_{32}N_2 + r_{33}N_3}{r_{21}N_1 + r_{22}N_2 + r_{23}N_3} \end{aligned} \quad (48)$$

O segundo grupo de equações é desenvolvido considerando os parâmetros angular e linear (a' e b'), para retas aproximadamente verticais, resultando em:

$$\begin{aligned} a' &= -\frac{r_{21}N_1 + r_{22}N_2 + r_{23}N_3}{r_{11}N_1 + r_{12}N_2 + r_{13}N_3} \\ b' &= f * \frac{r_{31}N_1 + r_{32}N_2 + r_{33}N_3}{r_{11}N_1 + r_{12}N_2 + r_{13}N_3} \end{aligned} \quad (49)$$

Considerando o caso particular com $\phi = 0$ e ω constante, os elementos da matriz de rotação, $r_{31} = 0$ e r_{32} e r_{33} são constantes e, portanto, podem ser agrupados com outras constantes.

Outra simplificação possível é considerar a_3 e b_3 como nulos (Z_s constante), ou considerar outro modelo dependendo do comportamento da trajetória, como por exemplo, um polinômio de primeira ordem. Esta simplificação pode ser definida pela análise do comportamento da órbita a partir dos dados de efemérides distribuídos com a imagem.

Um problema detectado com esse modelo adaptado do modelo dos planos equivalentes diz respeito ao vetor normal ao plano de interpretação no espaço imagem. O modelo dos planos equivalentes original baseia-se na hipótese de que os vetores normais são paralelos, exceto por rotações entre os referenciais. Esta hipótese tem como base o fato de que uma reta no espaço objeto é projetada como uma reta para o espaço imagem, por uma projeção perspectiva. Isto pode ser considerado verdadeiro para câmaras do tipo quadro, porque o plano de interpretação pode ser definido passando pelo Centro Perspectivo. Para imagens *pushbroom*, porém, o Centro Perspectivo e a câmara estão em movimento, e o plano de interpretação pode ser definido somente na vizinhança de um ponto (Figura 40).

Devido ao deslocamento de perspectiva ao longo da trajetória, a linha reta é levemente rotacionada na imagem. Por esta razão, o vetor normal extraído da imagem (\vec{n})

está rotacionado com relação ao vetor normal "ideal", que seria obtido por uma projeção perspectiva central (\vec{n}').

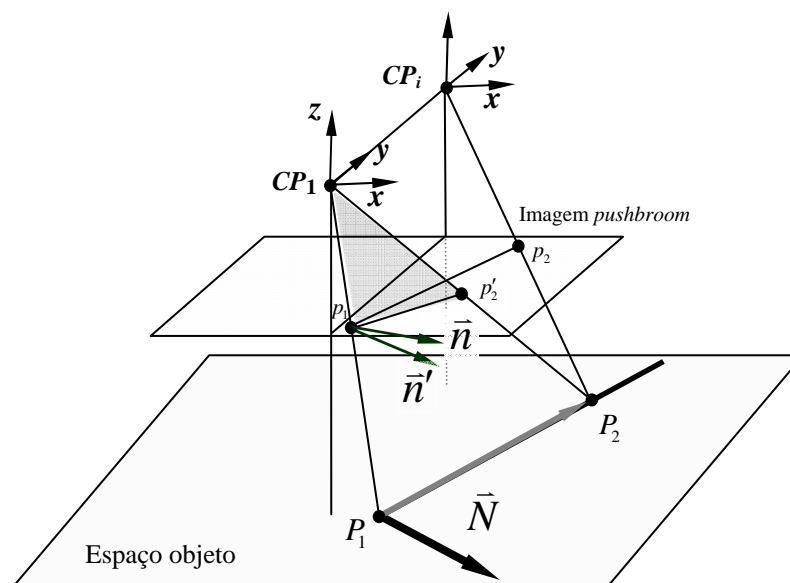


Figura 40 - O problema de orientação do vetor normal para o caso de sensores *pushbroom*.

Para solucionar este problema, podem ser calculadas correções (da e db) aos parâmetros angular e linear da reta. Tais correções são calculadas projetando-se as retas para o espaço imagem considerando-se duas projeções:

- uma de perspectiva central, que considera os vetores normais \vec{n}' (vetor normal no espaço imagem, para uma imagem de quadro) e \vec{N} (vetor normal no espaço objeto), e;
- uma projeção de perspectiva para geometria *pushbroom*, que considera os vetores normais \vec{n} (vetor normal no espaço imagem, para a imagem *pushbroom*) e \vec{N} (vetor normal no espaço objeto) usando equações de colinearidade com parâmetros aproximados.

Na Figura 40 observa-se que o ponto P_1 é projetado para p_1 . Embora não se considere necessária a correspondência ponto a ponto, pode-se selecionar um ponto p_1 na imagem o mais próximo possível do ponto P_1 definido no espaço objeto, ou, opcionalmente, interpolar um ponto P_i correspondente a p_i , a partir dos vértices P_1 e P_2 e de parâmetros aproximados obtidos das efemérides. Considere, agora, a projeção do segundo ponto da reta (P_2); se for considerada uma imagem ideal, do tipo frame, cujo Centro Perspectivo é o CP_1 ;

este ponto seria projetado em p'_2 . Como a plataforma se deslocou, então o ponto aparece na imagem em p_2 . Observando a Figura 40, percebe-se que a condição de equivalência entre planos seria satisfeita apenas para a situação ideal, ou seja, caso o ponto aparecesse em p'_2 . Como o ponto é registrado em p_2 , e não em p'_2 , ocorre uma diferença entre os parâmetros medidos (a e b) e os que atenderiam ao modelo. Para corrigir esta diferença adota-se uma estratégia com base nos dados de efemérides ou em parâmetros aproximados. Esta estratégia é descrita a seguir.

Considerando que os extremos de uma reta qualquer (pontos P_1 e P_2 do espaço objeto) sejam projetados para o espaço imagem (p_1 e p_2), e que aparecem em linhas diferentes na imagem, o cálculo dos coeficientes a e b , é feito em três passos. Primeiramente são calculados os parâmetros (a e b) considerando o instante $t=1$ para o primeiro e segundo ponto (p_1 e p_2) da reta, ou seja, supõe-se uma situação de perspectiva central, como se fosse uma imagem frame. O cálculo dos coeficientes a e b , é realizado usando os parâmetros de orientação POE aproximados para o instante $t=1$, com base nos dados de efemérides. Os pontos P_1 e P_2 são projetados para o espaço imagem com as equações de colinearidade, usando os POE do instante $t=1$, gerando pontos p_1 e p_2 . Calculam-se, em seguida, os parâmetros a e b , com as Equações (50) ou (51).

Para retas aproximadamente horizontais o cálculo de a_1 e b_1 é feito com:

$$\begin{aligned} a_1 &= (y_2 - y_1)/(x_2 - x_1); \\ b_1 &= (y_1 * x_2 - x_1 * y_2)/(x_2 - x_1); \end{aligned} \quad (50)$$

E para retas aproximadamente verticais:

$$\begin{aligned} a_1 &= (x_2 - x_1)/(y_2 - y_1); \\ b_1 &= -(y_1 * x_2 - x_1 * y_2)/(y_2 - y_1); \end{aligned} \quad (51)$$

O segundo passo é o cálculo dos parâmetros a e b considerando a geometria *pushbroom*, também a partir de valores dos POE aproximados. São utilizados, agora, os POE correspondentes à linha do ponto 2 (t_2), projetando-se o ponto P_2 para a imagem, também com as equações de colinearidade (p'_2). Com as coordenadas deste ponto (x'_2 e y'_2) e as do ponto p_1 pode-se calcular os parâmetros a_2 e b_2 , que seriam obtidas com uma imagem coletada com o sensor *pushbroom*.

Para retas aproximadamente horizontais o cálculo de a_2 e b_2 é feito com:

$$\begin{aligned} a_2 &= (y'_2 - y_1)/(x'_2 - x_1); \\ b_2 &= (y_1 * x'_2 - x_1 * y'_2)/(x'_2 - x_1); \end{aligned} \quad (52)$$

E para retas aproximadamente verticais:

$$\begin{aligned} a_2 &= (x_2' - x_1)/(y_2' - y_1); \\ b_2 &= -(y_1 * x_2' - x_1 * y_2')/(y_2' - y_1); \end{aligned} \quad (53)$$

No terceiro passo são realizadas as correções da e db dadas por:

$$\begin{aligned} da &= a_2 - a_1; \\ db &= b_2 - b_1; \end{aligned} \quad (54)$$

As observações corrigidas (a' e b') são então calculadas subtraindo-se dos valores observados (a e b) as correções (da e db) calculadas, visando desta forma, minimizar o efeito do deslocamento da plataforma.

$$\begin{aligned} a' &= a - da; \\ b' &= b - db; \end{aligned} \quad (55)$$

É importante enfatizar que, as correções serão mais efetivas, se os POE aproximados forem de boa qualidade. Estas correções não são afetadas por erros em translação e rotação, mas apenas pelos erros na variação destas, uma vez que são usadas as diferenças entre parâmetros. Como na plataforma CBERS, os erros de maior magnitude são em translações, pode-se esperar que estas correções sejam efetivas, como será mostrado no capítulo de experimentos.

- Método de ajustamento

O método de ajustamento utilizado foi o paramétrico, visto que as equações do modelo adotado foram organizadas de maneira a isolar as observações como função dos parâmetros, ou seja, tem-se um modelo do tipo explícito.

Em um modelo matemático do tipo explícito, que resulta na aplicação do método paramétrico, os valores observados ajustados podem ser expressos explicitamente como uma função dos parâmetros ajustados (GEMAEL, 1994):

$$L_a = F(X_a) \quad (56)$$

Nesse modelo tem-se que L_a é o vetor das observações ajustadas e é determinado de acordo com:

$$L_a = L_b + V \quad (57)$$

onde:

L_b é o vetor dos valores observados, com dimensão $(n \times 1)$, sendo n o número de observações;

V é o vetor dos resíduos, também com dimensão $(n \times 1)$.

No modelo de planos equivalentes adaptado para a geometria do sensor *pushbroom*, L_b é o vetor das observações que são os coeficientes angular a e linear b (corrigidos do efeito de perspectiva, Equações 55), de cada reta no espaço imagem, que conduz à duas equações.

Com relação aos parâmetros tem-se que:

$$X_a = X_0 + X \quad (58)$$

onde:

X_0 é o vetor dos valores aproximados dos parâmetros, com dimensão $(u \times 1)$, sendo u o número de incógnitas;

X é o vetor correção aos parâmetros aproximados, com dimensão $(u \times 1)$;

X_a é o vetor dos parâmetros ajustados, com dimensão $(u \times 1)$.

Foram feitos experimentos com dois grupos de parâmetros: 12 parâmetros $(X_0, Y_0, Z_0, k_0, a_1, \dots, a_4, b_1, \dots, b_4)$ originalmente presentes no modelo polinomial; e 8 parâmetros $(X_0, Y_0, Z_0, k_0, a_1, \dots, a_4)$ que resulta da simplificação do modelo anterior, considerando a trajetória linear.

Como o modelo matemático utilizado não é linear, é realizada a linearização do modelo por série de Taylor desprezando-se os termos maiores ou iguais à segunda ordem.

O modelo linearizado é dado como segue:

$$L_b + V = F(X_0 + X) = F(X_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_a=X_0} X \quad (59)$$

Designando a função dos parâmetros aproximados por L_0 , tem-se:

$$L_0 = F(X_0) \quad (60)$$

E a matriz das derivadas parciais por A:

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0} \quad (61)$$

Assim, a Equação 59 pode ser escrita como segue:

$$L_b + V = L_0 + AX \quad (62)$$

Finalmente, adotando:

$$L = L_0 - L_b \quad (63)$$

Tem-se o modelo matemático linearizado paramétrico:

$${}_n V_1 = {}_n A_{u u} X_1 + {}_n L_1 \quad (64)$$

O vetor X das correções é expresso por:

$$X = -(A^T P A)^{-1} (A^T P L) \quad (65)$$

No processo de linearização, a omissão de termos na série de Taylor e o uso de valores aproximados introduzem erros. Assim faz-se necessário um processo de iteração, onde os primeiros valores são utilizados como valores aproximados, os quais são melhorados sucessivamente com as iterações até a convergência.

3.2.3.2 Modelo de Coplanaridade com Retas

O modelo de orientação baseado em coplanaridade usando feições retas tem por princípio a condição de coplanaridade entre o vetor que contém um ponto em uma dada reta no espaço imagem (vetor de visada) e o plano de projeção no espaço objeto. Como consequência o vetor normal a este plano, uma vez rotacionado, deve ser ortogonal ao vetor de visada (Figura 41). Apesar de ter um desenvolvimento diferente, esse modelo possui o mesmo princípio usado por Mulawa e Mikhail (1988) e Habib et al. (2000).

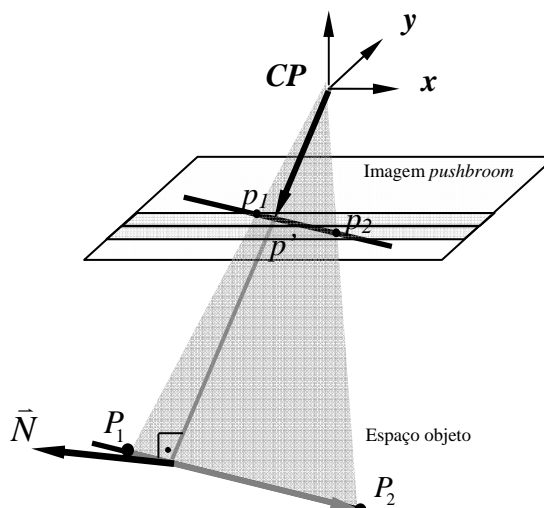


Figura 41 - Geometria de um vetor de visada de um ponto p' no espaço imagem e o vetor normal da reta no espaço objeto.

A condição de ortogonalidade entre o vetor de visada que contém um ponto da reta com o vetor normal ao plano de projeção no espaço objeto, pode ser expresso pela Equação 66, considerando o eixo y na direção da órbita, o que torna esta coordenada nula para um determinado instante t :

$$\vec{N}R^T \begin{pmatrix} x_t \\ 0 \\ -f \end{pmatrix} = 0 \quad (66)$$

onde:

\vec{N} é o vetor normal no espaço objeto;

R^T é a matriz de rotação transposta;

$(x_t, 0, -f)$ é o vetor de visada do ponto p no espaço imagem, que incorpora a coordenada x para um determinado instante t de tempo; neste caso, t pode ser substituído pela linha da imagem, pois os parâmetros a_i e b_i absorverão a diferença de escala entre as unidades de intervalo de tempo e número da linha;

f é a distância focal.

A matriz de rotação apresentada na Equação 66, é a inversa da matriz de rotação da Equação 44, visto que a transformação neste caso é realizada do espaço imagem para o espaço objeto. Como esta matriz é ortogonal, sua inversa é igual a matriz transposta.

A multiplicação do vetor de visada pela matriz de rotação transposta num dado instante t de tempo, resulta na Equação 67.

$$\begin{pmatrix} \cos \kappa x_t \\ \cos \omega \operatorname{sen} \kappa x_t + \operatorname{sen} \omega f \\ \operatorname{sen} \omega \operatorname{sen} \kappa x_t - \cos \omega f \end{pmatrix} \quad (67)$$

Assim, com a pré-multiplicação do vetor de visada no espaço imagem pela matriz de rotação transposta ao vetor normal da reta no espaço objeto, chega-se ao modelo final:

$$\begin{aligned} & \Delta Y(Z_1 - (Z_0 + a_3 t + b_3 t^2)) - \Delta Z(Y_1 - (Y_0 + a_2 t + b_2 t^2))(\cos \kappa x_t) + \\ & + \Delta Z(X_1 - (X_0 + a_1 t + b_1 t^2)) - \Delta X(Z_1 - (Z_0 + a_3 t + b_3 t^2))(\cos \omega \operatorname{sen} \kappa x_t - \operatorname{sen} \omega f) + \\ & + \Delta X(Y_1 - (Y_0 + a_2 t + b_2 t^2)) - \Delta Y(X_1 - (X_0 + a_1 t + b_1 t^2))(\operatorname{sen} \omega \operatorname{sen} \kappa x_t - \cos \omega f) = 0 \end{aligned} \quad (68)$$

O modelo descrito considera o grupo completo de 12 parâmetros, porém esse grupo pode ser reduzido para 8 parâmetros ou menos, a fim de evitar correlações entre parâmetros, como visto na Seção 2.10.2.1.

- Método de ajustamento

Do modo como foi organizada a equação do modelo do tipo implícito, as observações não se apresentam isoladas, tornando necessário utilizar o método combinado para o ajustamento.

Os modelos que requerem o uso deste método reúnem tanto parâmetros como valores observados, ligados por uma função implícita (GEMAEL, 1994):

$$F(L_a, X_a) = 0 \quad (69)$$

O modelo linearizado acrescido do modelo estocástico:

$$\begin{aligned} F(X_a, L_a) &= F(X_0 + X, L_b + V) \cong F(X_0, L_0) + \\ & \frac{\partial F}{\partial X_a} \Big|_{X_0} (X_a - X_0) + \frac{\partial F}{\partial L_a} \Big|_{L_b} (L_a - L_b) \end{aligned} \quad (70)$$

$$AX + BV + W = 0 \quad (71)$$

onde:

$$\begin{aligned} V &= L_a - L_b \\ X &= X_a - X_0 \end{aligned} \quad (72)$$

$$\begin{aligned} A &= \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0} & B &= \left. \frac{\partial F}{\partial L_a} \right|_{L_b} \\ W &= F(L_b, X_0) \end{aligned} \quad (73)$$

Admitindo que existam n valores observados e u parâmetros ligados por r equações, resultam as seguintes dimensões para as matrizes:

$${}_r A_{u \ u} X_1 + {}_r B_{n \ n} V_1 + {}_r W_1 = {}_r 0_1 \quad (74)$$

Tem-se que $S = r-u$ graus de liberdade, sendo necessário que:

$$n > r-u \quad (75)$$

No caso deste modelo, as matrizes da Equação 74, são descritas de acordo com:

$${}_n A_{12 \ 12} X_1 + {}_n B_{n \ n} V_1 + {}_n W_1 = 0 \quad (76)$$

O vetor X das correções é dado por:

$$X = -(A^T M^{-1} A)^{-1} (A^T M^{-1} W) \quad (77)$$

sendo:

$$M = (B P^{-1} B^T) \quad (78)$$

Como no caso do modelo de planos equivalentes adaptado, os experimentos realizados com esse modelo usaram dois grupos de parâmetros: 12 parâmetros ($X_0, Y_0, Z_0, k_0, a_1, \dots, a_4, b_1, \dots, b_4$); e 8 parâmetros ($X_0, Y_0, Z_0, k_0, a_1, \dots, a_4$).

Cada observação, que neste caso é a coordenada x do ponto na imagem, conduz a uma equação. Como o modelo matemático não é linear, existe então a necessidade de realizar iterações até a convergência em relação a um determinado critério.

3.2.3.3 Modelo de Colinearidade adaptado para a geometria pushbroom

O modelo de colinearidade usando pontos como controle de campo foi desenvolvido com base no polinômio de Orun e Natarajen (1994). Este modelo parte do princípio que um ponto no espaço objeto, seu homólogo no espaço imagem e o centro perspectivo (CP) de cada linha são colineares e a trajetória da plataforma pode ser modelada por um polinômio.

Para relacionar os espaços imagem e objeto, as coordenadas imagem de um ponto são associadas a um dado instante t de tempo, que está relacionado à linha da imagem, podendo-se estabelecer um polinômio com t sendo um parâmetro livre. A Figura 42 ilustra esse princípio de colinearidade.

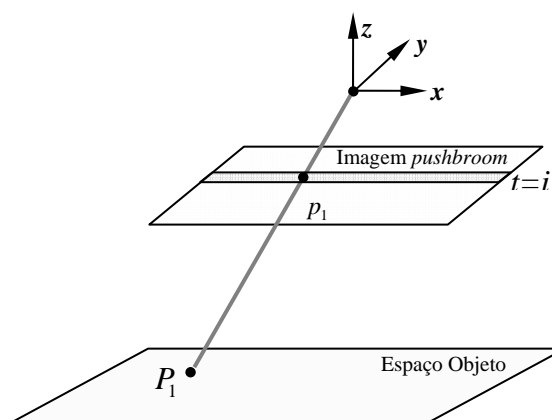


Figura 42 - Relacionamento de um ponto no espaço objeto e no espaço imagem.

O vetor de visada de um dado ponto, para um instante t qualquer, numa imagem *pushbroom* é dado por:

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} x_i \\ 0 \\ -f \end{pmatrix} \quad (79)$$

onde:

x_i , é a coordenada de um dado ponto no espaço imagem para um instante t qualquer;

f é a distância focal.

A coordenada y é fixada como zero, para considerar a geometria *pushbroom*, visto que neste modelo a direção de movimento da plataforma é ao longo do eixo y .

As diferenças entre as coordenadas de um ponto no espaço objeto e as coordenadas do CP, para um dado instante t , são dadas por:

$$\begin{aligned}\Delta X_i &= X_i - (X_0 + a_1 t_i + b_1 t_i^2) \\ \Delta Y_i &= Y_i - (Y_0 + a_2 t_i + b_2 t_i^2) \\ \Delta Z_i &= Z_i - (Z_0 + a_3 t_i + b_3 t_i^2)\end{aligned}\quad (80)$$

onde:

X_i, Y_i, Z_i são coordenadas de um ponto no espaço objeto para um determinado instante i de tempo;

X_0, Y_0, Z_0 são as coordenadas do CP no instante $t = 0$;

a_i e b_i são parâmetros incógnitos;

t_i é um parâmetro que corresponde ao intervalo de tempo e que pode ser substituído pela linha da imagem; neste caso os parâmetros a_i, b_i absorveriam esta diferença de escala.

A pré-multiplicação dos vetores apresentados na Equação 80 pela matriz de rotação (Equação 44) do sistema, resulta nos componentes R1, R2 e R3:

$$\begin{aligned}R1 &= \Delta X_i * r_{11} + \Delta Y_i * r_{12} + \Delta Z_i * r_{13} \\ R2 &= \Delta X_i * r_{21} + \Delta Y_i * r_{22} + \Delta Z_i * r_{23} \\ R3 &= \Delta X_i * r_{31} + \Delta Y_i * r_{32} + \Delta Z_i * r_{33}\end{aligned}\quad (81)$$

O relacionamento entre os espaços objeto-imagem pode então ser determinado através das Equações 82, que são as equações de colinearidade modificadas:

$$\begin{aligned}x_i &= f * R1 / R3 \\ y_i &= f * R2 / R3\end{aligned}\quad (82)$$

No processo de ajustamento pelo método paramétrico, considerando o modelo em questão, o vetor L_b de observações é o vetor da coordenada x (a coordenada y é definida como zero, considerando o sensor *pushbroom*) de n pontos da imagem, onde cada ponto gera duas equações, e o vetor dos parâmetros incógnitos é determinado por dois grupos de parâmetros: 12 parâmetros ($X_0, Y_0, Z_0, k_0, a_1, \dots, a_4, b_1, \dots, b_4$) originalmente presentes no

modelo polinomial; e 8 parâmetros ($X_0, Y_0, Z_0, k_0, a_1, \dots, a_4$) resultantes da simplificação do modelo polinomial.

3.2.4 Implementação dos modelos

Os modelos propostos foram implementados em ambiente de programação *Builder* e linguagem C++, visto que é uma linguagem flexível, além de ser a linguagem adotada pelo grupo de pesquisa de Fotogrametria.

As rotinas foram implementadas com a utilização das estruturas de dados da biblioteca UPTK. Esta biblioteca é uma caixa de ferramentas baseada em pesquisas anteriores, que contém um conjunto de funções e classes em linguagem C e C++. Algumas das rotinas contidas nessa biblioteca, como inversão e transposição de matrizes, foram usadas nas funções dos programas implementados.

A estrutura da implementação foi constituída pelas funções, método de ajustamento adotado, entrada e saída de dados. As funções úteis no processo de ajustamento dos modelos propostos resumem-se na montagem das seguintes matrizes:

- matriz W;
- matriz A;
- matriz B, quando usado o método combinado;
- matriz de variância e covariância das observações (ΣL_a);
- matriz dos pesos (P);
- vetor dos resíduos (V);
- matriz de variância e covariância das correções (ΣX);
- matriz de variância e covariância dos resíduos (ΣV);
- matriz de correlação entre os parâmetros, e;
- cálculo do vetor de correção dos parâmetros angular e linear (a e b) no caso do modelo de planos equivalentes adaptado (da e db).

O método de ajustamento adotado para cada modelo foi:

- método paramétrico para os modelos de planos equivalentes adaptado e modelo de colinearidade com pontos, e;
- método combinado para o modelo de coplanaridade para retas.

A partir das funções, e considerando o método de ajustamento adotado, os valores dos parâmetros ajustados foram determinados. Como os modelos não eram lineares foi necessário usar o processo iterativo. Além disso, o cálculo do sigma a posteriori foi realizado para as análises estatísticas.

Os arquivos de entrada usados na estimação dos parâmetros de orientação exterior foram:

- Arquivo com observações dos parâmetros angular e linear de cada reta (a e b), orientação da reta (H ou V) e o número da linha correspondente, para o caso do modelo de planos equivalentes adaptado;
- Arquivo com observações (*linha, coluna*) para os modelos de coplanaridade com retas e colinearidade com pontos;
- Arquivo com valores aproximados dos parâmetros, e;
- Arquivo com coordenadas do terreno (X, Y, Z).

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Experimentos

Os experimentos realizados no trabalho foram divididos em dois grupos: com dados simulados e com dados reais, ambos considerando cenas CBERS.

As observações do espaço imagem usadas nos processamentos com dados simulados foram geradas simulando uma imagem com características similares a de uma cena CBERS. Nos experimentos com dados reais as observações no espaço imagem usadas nos processamentos foram extraídas da imagem CBERS com realce prévio das feições de interesse.

As informações de coordenadas no espaço objeto, utilizadas nos experimentos, tanto para dados sintéticos como para dados reais, foram coletadas em segmentos de rodovias levantados com receptor GPS. Nos modelos desenvolvidos, estas coordenadas foram consideradas isentas de erro.

Os modelos de orientação implementados para imagens *pushbroom* foram testados usando diferentes configurações, variando-se o número de observações, número de parâmetros, distribuição das observações e para o caso dos dados simulados, diferentes valores de erros aleatórios.

A seguir serão apresentados os resultados dos experimentos realizados com dados simulados (Seção 4.1.1), e mais adiante os resultados obtidos com dados reais (Seção 4.1.2).

4.1.1 Resultados obtidos com dados simulados

A imagem sintética gerada foi estabelecida de modo a considerar a geometria *pushbroom* da imagem CBERS, inclusive com o mesmo tamanho, dimensão de pixel, distância focal e altitude da plataforma.

Para gerar os parâmetros de orientação exterior ($X_s, Y_s, Z_s, \kappa_s, \varphi, \omega$) para cada linha da imagem *pushbroom* simulada, foram arbitradas as coordenadas e orientação aproximadas do CP da primeira linha (X_0, Y_0, Z_0, κ_0) e os coeficientes polinomiais de primeira e segunda ordem (a_1, a_2, \dots, b_4).

Aos parâmetros angulares φ e ω foram atribuídos valores zero para a geração dos POE simulados, visto que, nas abordagens propostas, esses elementos são considerados como constantes, devido à correlação com outros parâmetros.

A Tabela 3 mostra os valores dos POE e dos coeficientes polinomiais iniciais usados na geração dos parâmetros (POE e coeficientes polinomiais) para linhas subsequentes, correspondentes a um dado instante t de tempo.

Tabela 3 - Parâmetros de orientação exterior simulados.

POE	Valores simulados				
	Parâmetros para $t=0$	Coeficientes Polinomiais			
X_0 (m)	470880,04	a_1 (m)	5,0E-3	b_1 (m)	5,0E-8
Y_0 (m)	7467281,89	a_2 (m)	20	b_2 (m)	5,0E-7
Z_0 (m)	778000,00	a_3 (m)	5,0E-5	b_3 (m)	5,0E-6
κ_0 (rd)	-0,151968	a_4 (rd)	5,0E-8	b_4 (rd)	5,0E-11

Os valores simulados correspondentes aos POE (X_0, Y_0, Z_0, κ_0) para $t=0$, foram definidos no sistema de projeção UTM, *Datum* SAD69. Os valores de a_1, a_2, \dots, b_4 foram simulados de forma a inserir pequenas distorções nos POE da imagem formada. O parâmetro a_2 corresponde à translação das linhas na imagem simulada, ou seja, o tamanho do pixel no terreno, na direção perpendicular à cada linha gerada.

Como citado anteriormente foram consideradas as características geométricas de uma imagem CBERS para a geração de uma imagem *pushbroom*. Assim, a imagem gerada é formada por 5812 linhas e 5812 colunas, com distância focal de 520mm e 778km de altitude.

Para a geração dos dados simulados foi implementado um programa em linguagem C, com as seguintes etapas: inicialmente as coordenadas dos vértices de cada linha reta no espaço objeto são projetadas para a imagem simulada. Considera-se, para cada instante t , uma imagem do tipo frame, sendo a projeção realizada com as equações de colinearidade e usando-se os parâmetros de orientação exterior daquele instante. Erros aleatórios foram gerados e introduzidos nas coordenadas fotogramétricas de cada um dos vértices projetados.

A partir dos vértices das retas, considerando o caso do modelo de planos equivalentes adaptado, foram calculados os parâmetros angular e linear e, conseqüentemente, o vetor normal de cada reta. A intersecção de cada linha reta projetada com a linha ($y=0$) foi então calculada, simulando um sensor *pushbroom*.

Se a linha reta realmente intercepta a linha central, então são calculados os componentes do vetor normal ao plano de projeção e armazenados em um arquivo indexado com o número de cada linha. Se a reta não intercepta a linha central, significa que não aparecerá naquela linha da imagem.

Este procedimento foi implementado em um programa que gera um arquivo com observações (parâmetros angular e linear) e outras informações para controle do algoritmo, bem como uma imagem *raster*, apenas para visualização (Figura 43). As simulações realizadas para esse modelo foram feitas projetando-se ambos os vértices do espaço objeto para o espaço imagem com os POE da linha correspondentes ao primeiro vértice, sem considerar o problema de deslocamento de perspectiva ao longo da trajetória que ocorre usando dados reais.

Para o caso do modelo de coplanaridade com retas, a simulação foi realizada de modo similar, projetando-se os vértices das retas com os POE para cada linha. Se a linha reta intercepta a linha central, então é armazenada a coordenada fotogramétrica x num arquivo indexado com o número de cada linha. Além desta, informações de controle do algoritmo e, uma imagem *raster* da cena com as retas projetadas, são geradas.

Na simulação dos pontos para o espaço imagem, são projetados todos os pontos para cada linha da imagem. Verificam-se quais pontos apresentam $y = 0$. Informações de controle do algoritmo e imagem *raster* também são geradas.

A partir dos dados imagem simulados, foram realizados, então, experimentos utilizando os programas de estimação desenvolvidos para recuperar os POE. Nestes experimentos houve a variação de erros aleatórios nas coordenadas imagem dos vértices.

Os testes realizados para os dados simulados, usando os três modelos de orientação, são divididos em 7 experimentos, os quais são apresentados e discutidos na seqüência.

- Experimento I: Testes usando 12 parâmetros com 50 retas para modelos de retas e 35 pontos para modelo de pontos.

Os primeiros testes realizados com os modelos de orientação utilizaram um grupo de 12 parâmetros, com polinômio de segunda ordem, para estimar os POE da cena. Para a realização desses testes, foram utilizadas 50 retas de controle e 35 pontos de controle.

A Figura 43a ilustra a configuração no espaço imagem do grupo de retas definido no espaço objeto, a partir de suas extremidades, e a Figura 43b ilustra a configuração dos pontos de controle definidos no espaço objeto.

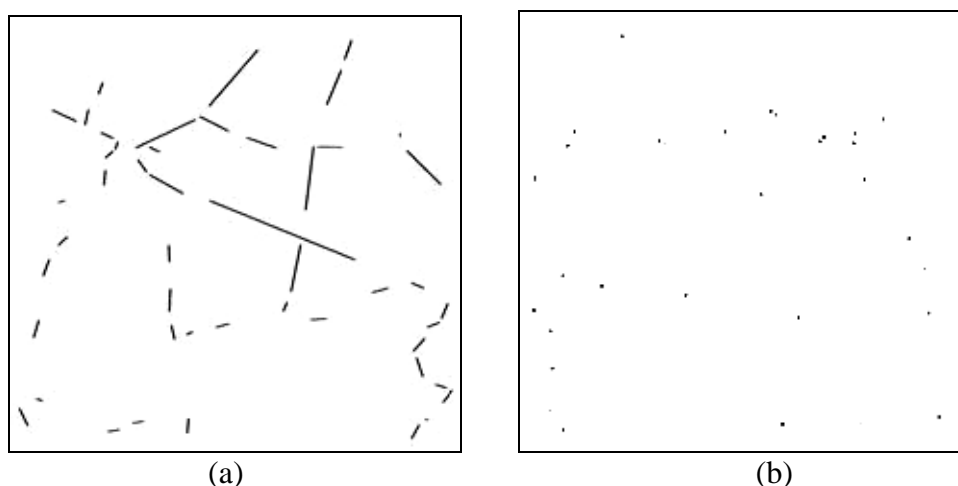


Figura 43 - Imagem simulada com características de uma imagem CBERS com agrupamento de 50 retas (a) e com 35 pontos (b).

Neste primeiro experimento, duas magnitudes de erros aleatórios foram inseridas nas coordenadas fotogramétricas simuladas, usadas no cálculo dos coeficientes a e b , com desvios padrão de $2\mu\text{m}$ e $5\mu\text{m}$, para os dados usados no modelo de planos equivalentes adaptado e no modelo de coplanaridade para retas. É importante ressaltar que a extração de linhas retas pode ser realizada com exatidão subpixel, ou seja, espera-se que os resultados sejam comparáveis com os obtidos a partir de erros observacionais de $5\mu\text{m}$ (ou menores) nos vértices.

Foi utilizada uma configuração com um grande número de retas bem distribuídas na cena, para que o experimento reflita apenas o efeito de erros observacionais, sem problemas de configuração e distribuição de retas.

Para testar o modelo de colinearidade com pontos, os erros aleatórios introduzidos às fotocoordenadas são correspondentes a desvios padrão de $5\mu\text{m}$ e $13\mu\text{m}$, visto que as tarefas de identificação e medição de pontos, na maioria das vezes, são realizadas de maneira manual, produzindo erros da ordem de 1 pixel de magnitude ($13\mu\text{m}$ para o CBERS). Em casos especiais, consegue-se pontaria subpixel e, por esta razão foram realizados os experimentos com erros de $5\mu\text{m}$. Como no caso de retas, uma configuração com um grande número de pontos bem distribuídos na cena foi utilizada. Contudo, sabe-se, que esta é uma situação de difícil obtenção na prática, sendo esta uma das motivações do trabalho.

Os resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado, modelo de coplanaridade para retas e modelo de colinearidade para pontos são apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6, respectivamente. Em todos os experimentos com dados simulados, os valores apresentados como erros verdadeiros (\mathcal{E}_v) correspondem ao erro médio (calculado com valor absoluto) das discrepâncias entre os valores verdadeiros e os valores estimados, em 10 experimentos, ou seja, cada simulação foi repetida 10 vezes, estimando-se os parâmetros com cada conjunto de dados e calculando-se as discrepâncias (erros verdadeiros). Por esta razão todos os valores são positivos.

Para verificar a existência de tendência nos parâmetros estimados, o teste estatístico com a distribuição t de *Student* foi realizado e os resultados apresentam-se no Apêndice A.

Além deste, o teste estatístico com a distribuição qui-quadrado χ^2 foi feito para todos os experimentos realizados.

Nesse teste estatístico tem-se que:

- A hipótese básica:

$$H_0 : \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2$$

- A hipótese alternativa:

$$H_0 : \sigma_0^2 \neq \hat{\sigma}_0^2$$

Comparando-se o valor calculado dado por:

$$\chi^{*2} = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} * v = \frac{V^T P V}{\sigma_0^2}$$

Com os valores teóricos:

$$\chi_{v, \frac{\alpha}{2}}^2 \text{ e } \chi_{v, 1-\frac{\alpha}{2}}^2$$

A hipótese básica não é rejeitada, ao nível de significância α , se:

$$\chi^{*2} < \chi_{v, 1-\frac{\alpha}{2}}^2 \text{ ou } \chi^{*2} > \chi_{v, \frac{\alpha}{2}}^2$$

Nas Tabelas 4, 5 e 6 são mostrados os erros verdadeiros dos POE (erro médio para dez repetições), calculados a partir da diferença entre os valores verdadeiros e os valores estimados, os desvios padrão estimados a partir da MVC obtida no ajustamento e os valores de χ^2 calculado e χ^2 teórico.

Tabela 4 - Resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado usando 50 retas e erros aleatórios da ordem de 2 e 5 μm .

POE e coef	2 μm		5 μm	
	$\hat{\sigma}_0 : 0,050$		$\hat{\sigma}_0 : 0,127$	
	Nº Iterações: 4		Nº Iterações: 4	
	χ^2 cal: 1,916 χ^2 teo (38;0,975): 56,37		χ^2 cal: 4,844 χ^2 teo (38;0,975): 56,37	
	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	3,32	2,75	4,12	6,73
Y_0 (m)	3,10	2,33	6,49	5,70
Z_0 (m)	20,58	48,22	73,68	117,93
κ_0 (rd)	$7,11 \times 10^{-5}$	0,000123	0,00016	0,000301
a_1 (m)	0,002107	0,002414	0,00278	0,005902
a_2 (m)	0,002213	0,002317	0,00456	0,005666
a_3 (m)	0,044463	0,055439	0,0918	0,135572
a_4 (rd)	$6,94 \times 10^{-8}$	$1,32 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-7}$	$3,23 \times 10^{-7}$
b_1 (m)	$3,79 \times 10^{-7}$	$4,52 \times 10^{-7}$	$5,6 \times 10^{-7}$	$1,10 \times 10^{-6}$
b_2 (m)	$4,4 \times 10^{-7}$	$4,64 \times 10^{-7}$	$8,1 \times 10^{-7}$	$1,13 \times 10^{-6}$
b_3 (m)	$5,31 \times 10^{-5}$	$1,19 \times 10^{-5}$	$4,3 \times 10^{-5}$	$2,89 \times 10^{-5}$
b_4 (rd)	$4,21 \times 10^{-11}$	$2,87 \times 10^{-11}$	$8,0 \times 10^{-11}$	$7,02 \times 10^{-11}$

Tabela 5 - Resultados obtidos com o modelo de coplanaridade para retas usando 50 retas e erros aleatórios na ordem de 2 e 5 μ m.

POE e coef	2 μm		5 μm	
	$\hat{\sigma}_0 : 0,062$		$\hat{\sigma}_0 : 0,161$	
	N° Iterações: 3		N° Iterações: 4	
	χ^2 cal: 0,806 χ^2 teo (13;0,975): 24,74		χ^2 cal: 2,096 χ^2 teo (13;0,975): 24,74	
	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	0,69	1,05	1,92	2,71
Y_0 (m)	0,52	0,21	1,08	0,55
Z_0 (m)	15,37	20,09	43,30	51,80
κ_0 (rd)	1,89E-05	5,96E-06	4,73E-05	1,54E-05
a_1 (m)	0,000589	0,000985	0,001775	0,002539
a_2 (m)	0,000697	0,000298	0,001973	0,000769
a_3 (m)	0,017234	0,020928	0,047743	0,053964
a_4 (rd)	2,44E-08	1,24E-08	6,81E-08	3,20E-08
b_1 (m)	1,19E-07	1,87E-07	4,00E-07	4,83E-07
b_2 (m)	1,45E-07	6,87E-08	4,30E-07	1,77E-07
b_3 (m)	3,32E-06	4,15E-06	9,11E-06	1,07E-05
b_4 (rd)	5,96E-12	2,91E-12	1,44E-11	7,51E-12

Tabela 6 - Resultados obtidos com o modelo de colinearidade para pontos usando 35 pontos e erros aleatórios na ordem de 5 e 13 μ m.

POE e coef,	5 μm		13 μm	
	$\hat{\sigma}_0 : 0,036$		$\hat{\sigma}_0 : 0,096$	
	N° Iterações: 12		N° Iterações: 12	
	χ^2 cal: 0,848 χ^2 teo (23;0,975): 38,08		χ^2 cal: 2,225 χ^2 teo (23;0,975): 38,08	
	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	1,12	1,90	2,27	4,94
Y_0 (m)	0,97	1,90	2,87	4,94
Z_0 (m)	14,134	37,65	59,05	97,87
κ_0 (rd)	2,26x10 ⁻⁵	4,84x10 ⁻⁵	4,04x10 ⁻⁵	0,000125
a_1 (m)	0,000787	0,00171	0,002117	0,004444
a_2 (m)	0,000841	0,00171	0,00214	0,004445
a_3 (m)	0,018266	0,03587	0,078642	0,093239
a_4 (rd)	1,63x10 ⁻⁸	4,61x10 ⁻⁸	4,43x10 ⁻⁸	1,19x10 ⁻⁷
b_1 (m)	1,27x10 ⁻⁷	3,23x10 ⁻⁷	4,12x10 ⁻⁷	8,38x10 ⁻⁷
b_2 (m)	1,52x10 ⁻⁷	3,23x10 ⁻⁷	3,57x10 ⁻⁷	8,38x10 ⁻⁷
b_3 (m)	3,60x10 ⁻⁶	7,04x10 ⁻⁶	2,36x10 ⁻⁶	1,83x10 ⁻⁵
b_4 (rd)	2,65x10 ⁻¹²	9,05x10 ⁻¹²	6,20x10 ⁻¹²	2,35x10 ⁻¹¹

De modo geral, os resultados (Tabelas 4, 5 e 6) mostraram, como era esperado, que quanto maior a magnitude dos erros aleatórios, maiores são os erros na estimação dos parâmetros, e nos desvios-padrão estimados. Os valores dos desvios-padrão estimados são compatíveis, em todos os casos, com os erros verdadeiros.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 4, pode-se verificar que os erros verdadeiros dos valores estimados com o grupo de 50 linhas retas e seus respectivos desvios-padrão, são coerentes com os valores simulados, embora algumas discrepâncias, principalmente no parâmetro Z_0 sejam maiores.

No teste realizado com o modelo de coplanaridade para retas (Tabela 5), percebe-se que os erros verdadeiros diminuíram consideravelmente se comparados aos resultados anteriores (Tabela 4), obtidos com o modelo dos planos equivalentes adaptado.

Os valores estimados com a abordagem baseada em pontos, também apresentam melhores resultados quando comparados aos parâmetros estimados com o modelo dos planos equivalentes adaptado (Tabela 4).

Em todos os resultados, verifica-se que as discrepâncias mais significativas ocorreram no parâmetro Z_0 . Tal fato pode ser explicado pela relação direta que esse parâmetro tem com a geometria de abertura do sensor.

No caso do sensor CCD CBERS, o ângulo de abertura é muito pequeno, visto que possui uma distância focal de 520 mm e altitude da plataforma de 780 km, o que torna esse parâmetro (Z_0) muito sensível a pequenas variações nas observações.

Os valores dos POE obtidos com a abordagem por pontos e modelo de coplanaridade para retas apresentaram os melhores resultados embora os resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado também possam ser considerados satisfatórios.

De modo geral, as abordagens se mostraram adequadas para recuperar os parâmetros de orientação, mas isso só pode ser afirmado com a projeção das observações para o espaço objeto usando os POE gerados para cada linha com as equações de colinearidade inversas e, assim verificar de fato, se a qualidade dos parâmetros estimados é adequada à aplicação.

Para isso, pontos de verificação foram selecionados (Figura 44) para determinar o erro nas coordenadas destes pontos no terreno, considerando os POE estimados por cada abordagem com os maiores erros aleatórios. Nestes casos, foi usado o valor da coordenada Z verdadeira, embora a variação de Z tenha pequeno efeito nas coordenadas

planimétricas, devido à geometria de abertura de ângulo pequeno do sensor. Assim, mesmo com o uso da coordenada altimétrica Z interpolada, os resultados não seriam afetados.

Os resultados dos testes realizados são apresentados na Tabela 7.

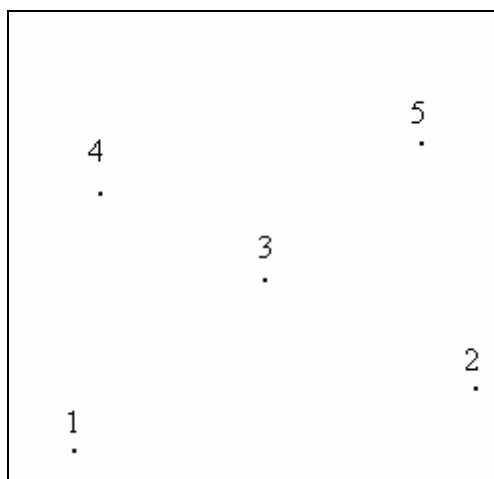


Figura 44 - Imagem ilustrando os 5 pontos de verificação.

Tabela 7 - Discrepâncias em 5 pontos de verificação para as três abordagens.

Pontos de Verificação	Modelo dos planos equivalentes adaptado		Modelo de coplanaridade para retas		Modelo de colinearidade para pontos	
	\mathcal{E}_v (m)		\mathcal{E}_v (m)		\mathcal{E}_v (m)	
	X	Y	X	Y	X	Y
P1	-2,84	-1,09	-1,53	-0,97	-2,5	1,77
P2	25,14	31,28	12,02	9,45	16,05	8,8
P3	13,07	21,15	8,17	8,08	9,23	10,01
P4	-38,56	-29,94	-6,77	-2,94	-14,86	7,08
P5	93,22	110,58	37,81	34,55	50,69	26,12
Média	18,00	26,39	9,94	9,63	11,72	10,75
$\hat{\sigma}_x$	48,39	52,60	17,28	14,94	24,76	9,14
EMQ	52,41	60,31	20,54	18,42	28,01	15,10

Como pode ser verificado na Tabela 7, os valores estimados com a abordagem por planos equivalentes adaptado apresentaram erros nas coordenadas X e Y de aproximadamente 3 pixels. No modelo de colinearidade com pontos os erros nas coordenadas foram maiores para X, com aproximadamente 1,7 pixel, enquanto que para o modelo de

coplanaridade para retas a ordem de grandeza dos erros foi de aproximadamente 1 pixel em X e subpixel em Y.

Pode ser verificado também (Tabela 7) que os maiores erros apresentam-se nas coordenadas do ponto 5, para os três modelos, o qual encontra-se localizado nas últimas linhas da cena.

- Experimento II: Testes usando 8 parâmetros com 50 retas para modelos de retas e 35 pontos para modelo de pontos.

A fim de verificar o modelo de polinômios mais adequado aos modelos estudados foi realizado o segundo experimento com o polinômio de 1ª ordem. Vale ressaltar que neste caso os dados imagem também foram simulados com polinômio de primeira ordem.

A Tabela 8 mostra os valores dos POE e dos coeficientes polinomiais iniciais usados na geração dos oito parâmetros (POE e coeficientes polinomiais) para linhas subseqüentes, cada uma correspondente a um dado instante t de tempo.

Tabela 8 - Valores dos parâmetros de orientação exterior simulados considerando um polinômio de 1ª ordem (trajetória linear).

POE	Valores simulados		
	Parâmetros para $t=0$	Coeficientes Polinomiais	
X_0 (m)	470880,04	a_1 (m)	$5,0 \times 10^{-3}$
Y_0 (m)	7467281,89	a_2 (m)	20
Z_0 (m)	778000,00	a_3 (m)	$5,0 \times 10^{-5}$
κ_0 (rd)	-0,151968	a_4 (rd)	$5,0 \times 10^{-8}$

Neste experimento os dados de campo usados foram os mesmos que no experimento I, ou seja, 50 retas (Figura 43a) para os modelos de planos equivalentes adaptado e de coplanaridade com retas, e 35 pontos (Figura 43b) para o modelo de colinearidade para pontos.

Os testes também foram feitos com a mesma ordem de grandeza para os erros aleatórios inseridos nas coordenadas simuladas no experimento I. Os resultados desse experimento para os três modelos de orientação são apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11.

Tabela 9 - Resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado usando 50 retas, e erros aleatórios na ordem de 2 e 5 μ m e 8 parâmetros.

POE e coef	2 μm		5 μm	
	$\hat{\sigma}_0 : 0,0760$ N° Iterações: 4		$\hat{\sigma}_0 : 0,148$ N° Iterações: 4	
	χ^2 cal: 3,194 χ^2 teo (42;0,975): 62,30		χ^2 cal: 6,241 χ^2 teo (42;0,975): 62,30	
	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	3,05	2,41	4,43	5,11
Y_0 (m)	4,37	2,15	5,71	4,57
Z_0 (m)	16,33	46,96	54,83	99,72
κ_0 (rd)	$5,87 \times 10^{-5}$	0,00011	0,000117	0,000234
a_1 (m)	0,000811	0,00077	0,001241	0,001634
a_2 (m)	0,001186	0,000711	0,001668	0,00151
a_3 (m)	0,006569	0,016687	0,016662	0,035431
a_4 (rd)	$1,42 \times 10^{-8}$	$3,84 \times 10^{-8}$	$2,85 \times 10^{-8}$	$8,16 \times 10^{-8}$

Tabela 10 - Resultados obtidos com o modelo de coplanaridade para retas usando 50 retas, erros aleatórios na ordem de 2 e 5 μ m e 8 parâmetros.

POE e coef	2 μm		5 μm	
	$\hat{\sigma}_0 : 0,097$ N° Iterações: 3		$\hat{\sigma}_0 : 0,209$ N° Iterações: 3	
	χ^2 cal: 4,076 χ^2 teo (42;0,975): 62,30		χ^2 cal: 8,794 χ^2 teo (42;0,975): 62,30	
	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	0,46	1,05	1,09	2,26
Y_0 (m)	0,38	0,24	1,33	0,52
Z_0 (m)	6,11	19,69	33,09	42,48
κ_0 (rd)	$1,74 \times 10^{-5}$	$5,51 \times 10^{-6}$	0,000024	0,0000119
a_1 (m)	0,000172	0,000343	0,000429	0,0007396
a_2 (m)	$9,49 \times 10^{-5}$	$9,72 \times 10^{-5}$	0,000557	0,0002099
a_3 (m)	0,003086	0,007604	0,009920	0,0164076
a_4 (rd)	$5,79 \times 10^{-9}$	$2,69 \times 10^{-9}$	$1,33 \times 10^{-8}$	$5,80 \times 10^{-9}$

Tabela 11 - Resultados obtidos com o modelo de colinearidade para pontos usando 35 pontos, erros aleatórios na ordem de 5 e 13 μ m e 8 parâmetros.

POE e coef,	5 μ m		13 μ m	
	$\hat{\sigma}_0 : 0,036$		$\hat{\sigma}_0 : 0,088$	
	N° Iterações: 14		N° Iterações: 14	
	χ^2 cal: 0,979 χ^2 teo (27,0,975): 43,19		χ^2 cal: 2,381 χ^2 teo (27,0,975): 43,19	
	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	0,38	1,35	1,49	3,27
Y_0 (m)	0,72	1,35	2,31	3,27
Z_0 (m)	6,14	26,56	42,39	64,45
κ_0 (rd)	$2,12 \times 10^{-5}$	$3,42 \times 10^{-5}$	$4,00 \times 10^{-5}$	$8,29 \times 10^{-5}$
a_1 (m)	0,000153	0,000417	0,00063	0,001012
a_2 (m)	0,000182	0,000417	0,000457	0,001012
a_3 (m)	0,002459	0,009428	0,017137	0,022876
a_4 (rd)	$7,27 \times 10^{-9}$	$1,21 \times 10^{-8}$	$1,58 \times 10^{-8}$	$2,94 \times 10^{-8}$

Os valores dos parâmetros estimados neste segundo grupo de experimentos (Tabelas 9, 10 e 11) mostraram que o uso de um polinômio de primeira ordem permite uma melhor estimação dos parâmetros, considerando as observações existentes e os modelos matemáticos empregados. Para a maioria das plataformas orbitais, devido ao pequeno intervalo de tempo para aquisição de uma cena, as variações de posição e atitude da plataforma podem ser consideradas lineares.

Como pode ser observado nas Tabelas 9, 10 e 11, a estimação dos parâmetros apresentou-se significativamente melhor para todos os casos, considerando os três modelos.

Porém, o real efeito desta melhoria só pode ser quantificado verificando o erro posicional de pontos no espaço objeto, calculados a partir dos parâmetros estimados. Assim, foi realizada a projeção dos mesmos 5 pontos de verificação usados no experimento I, através das equações de colinearidade inversas. A Tabela 12 apresenta o resultado dessa projeção.

Tabela 12 - Discrepâncias em 5 pontos de verificação para as três abordagens com polinômio de 1ª ordem.

Pontos de Verificação	Modelo dos planos equivalentes adaptado		Modelo de coplanaridade para retas		Modelo de colinearidade para pontos	
	\mathcal{E}_v (m)		\mathcal{E}_v (m)		\mathcal{E}_v (m)	
	X	Y	X	Y	X	Y
P1	0,26	0,83	-1,17	0,49	-1,54	0,6
P2	11,52	14,12	4,64	3,44	6,51	5,22
P3	7,25	9,55	2,03	2,63	2,87	3,34
P4	1,46	3,59	-1,41	0,92	-2,3	0,69
P5	16,67	20,27	6,78	6,01	10,01	7,36
Média	7,43	9,67	2,17	2,69	3,11	3,44
$\hat{\sigma}_x$	6,87	7,03	3,58	1,97	5,24	2,61
EMQ	10,78	13,36	4,32	3,74	6,29	4,83

De fato, com a modelagem linear do polinômio, os resultados melhoram consideravelmente. No modelo de retas por planos equivalentes adaptado, os erros apresentados na Tabela 7, para as coordenadas X e Y que eram de 2,5 pixels aproximadamente, diminuíram para ordem subpixel (Tabela 12). Para o modelo de colinearidade com pontos e o modelo de coplanaridade para retas, o erro nas coordenadas em X que eram de 1,3 e 1 pixel, respectivamente, foram reduzidos ao nível subpixel.

Pode-se, afirmar, portanto, que a modelagem linear da trajetória é a mais adequada para os modelos estudados, os quais permitem a modelagem indireta de um polinômio que descreve a trajetória da plataforma.

Outra questão relacionada com o desempenho dos modelos é quanto ao número de observações envolvidas nos experimentos. Para avaliar este efeito, o terceiro experimento foi realizado de modo a diminuir o número de observações tanto de retas como de pontos.

Como visto, o polinômio de primeira ordem apresentou-se como o mais adequado para a estimação do movimento da plataforma e assim, será usado em todos os experimentos subsequentes.

- Experimento III: Testes usando 8 parâmetros com 25 retas para modelos de retas e 14 pontos para modelo de pontos.

Neste experimento diminuiu-se o número de retas e pontos, para verificar o impacto da menor redundância dos dados nos resultados.

O erro aleatório inserido nas observações foi o maior erro aleatório considerado até então para cada modelo, ou seja, $5\mu\text{m}$ para retas e $13\mu\text{m}$ para pontos. O número de retas passou a ser 25 e o de pontos passou a ser 14. A Figura 45a ilustra a imagem de 25 retas simuladas e a Figura 45b ilustra a imagem de 14 pontos simulados. O resultado da estimação dos parâmetros para cada modelo é apresentado na Tabela 13.

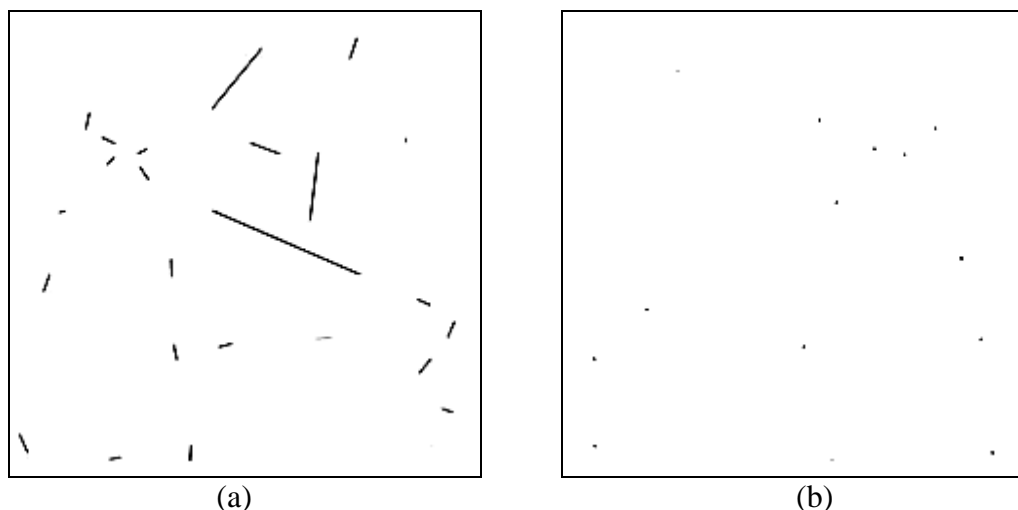


Figura 45 - Imagem simulada com características de uma imagem CBERS com agrupamento de 25 retas (a) e com 14 pontos (b).

Tabela 13 - Resultados obtidos com os modelos de planos equivalentes adaptado e de coplanaridade para retas usando 25 retas, e o modelo e colinearidade para pontos usando 14 pontos.

POE e coef.	Modelo dos planos equivalentes adaptado		Modelo de coplanaridade para retas		Modelo de colinearidade para pontos	
	5 μm		5 μm		13 μm	
	$\hat{\sigma}_0 : 0,185$		$\hat{\sigma}_0 : 0,224$		$\hat{\sigma}_0 : 0,107$	
	Nº Iterações: 5		Nº Iterações: 5		Nº Iterações: 14	
	χ^2 cal: 3,158 χ^2 teo (17,0,975): 30,19		χ^2 cal: 3,811 χ^2 teo (17,0,975): 30,19		χ^2 cal: 0,646 χ^2 teo (6;0,975): 14,45	
	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	3,71	8,74	1,26	3,63	2,93	5,52
Y_0 (m)	6,81	6,26	1,31	0,86	3,40	5,52
Z_0 (m)	72,65	150,05	42,93	68,11	68,14	110,30
κ_0 (rd)	$4,76 \times 10^{-5}$	0,000401	0,000027	0,000018	$4,14 \times 10^{-5}$	0,000142
a_1 (m)	0,001242	0,002633	0,000436	0,001135	0,000692	0,001872
a_2 (m)	0,001997	0,002176	0,000904	0,000412	0,000854	0,001872
a_3 (m)	0,023763	0,05195	0,009004	0,025629	0,021653	0,046315
a_4 (rd)	$2,93 \times 10^{-8}$	$1,33 \times 10^{-7}$	$2,56 \times 10^{-8}$	$9,90 \times 10^{-9}$	2,12E-08	$5,96 \times 10^{-8}$

Percebe-se, pelos resultados mostrados na Tabela 13, que a redundância das observações é um dos fatores de afetam os resultados, visto que a qualidade dos parâmetros estimados e seus desvios padrão foram afetados com a diminuição no número das observações.

No entanto, verifica-se que esses resultados ainda são adequados para estimar os POE para a imagem e para corrigi-la geometricamente.

Como pôde ser verificado, os resultados foram piores, quando comparados aos resultados obtidos com um número maior de observações. Mas mesmo com a diminuição do número de observações, a boa distribuição das entidades de controle, tanto para retas como para pontos, permitiu resultados satisfatórios. Assim, o quarto experimento foi realizado simulando o mesmo número de retas e pontos do terceiro experimento, mas com uma nova distribuição.

- Experimento IV: Testes usando 8 parâmetros com nova distribuição das observações: 25 retas para modelos de retas e 14 pontos para modelo de pontos.

No quarto experimento foram simuladas duas imagens, uma com 25 retas (Figura 46a) e uma com 14 pontos (Figura 46b), considerando que essas imagens possuem uma configuração com má distribuição dos elementos de controle. Os erros aleatórios foram de $5\mu\text{m}$ para os modelos usando retas, e de $13\mu\text{m}$ para o modelo de pontos. O resultado da estimação dos parâmetros para esse experimento é apresentado na Tabela 14.

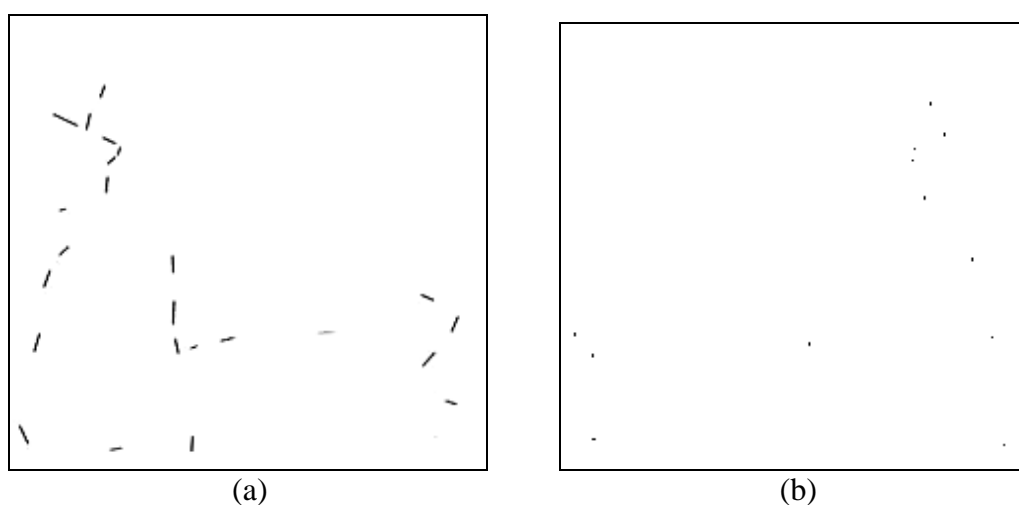


Figura 46 - Imagem simulada com características de uma cena CBERS e agrupamento de 25 retas com nova distribuição na cena (a) e com 14 pontos com nova distribuição na cena (b).

Tabela 14 - Resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado e modelo de coplanaridade retas usando 25 retas mal distribuídas na cena (5 μ m), e modelo de colinearidade para pontos usando 14 pontos mal distribuídos na cena (13 μ m).

	Modelo dos planos equivalentes adaptado		Modelo de coplanaridade para retas		Modelo de colinearidade para pontos	
	5 μ m		5 μ m		13 μ m	
POE e coef.	$\hat{\sigma}_0 : 0,167$ Nº Iterações: 6		$\hat{\sigma}_0 : 0,149$ Nº Iterações: 6		$\hat{\sigma}_0 : 0,096$ Nº Iterações: 16	
	χ^2 cal: 2,845 χ^2 teo (17,0,975): 30,19		χ^2 cal: 2,539 χ^2 teo (17,0,975): 30,19		χ^2 cal: 0,579 χ^2 teo (6;0,975): 14,45	
	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	6,55	12,17	3,04	3,16	2,86	5,81
Y_0 (m)	7,55	6,31	1,34	0,64	3,26	5,81
Z_0 (m)	133,00	258,26	72,74	62,62	110,24	117,78
κ_0 (rd)	9,34x10 ⁻⁵	0,00038	0,000036	0,000012	7,39x10 ⁻⁵	0,000151
a_1 (m)	0,003337	0,007078	0,001476	0,001724	0,001853	0,003192
a_2 (m)	0,00192	0,002617	0,000871	0,000360	0,002445	0,003192
a_3 (m)	0,076919	0,162726	0,032138	0,037053	0,057221	0,070687
a_4 (rd)	5,02 x10 ⁻⁸	1,47 x10 ⁻⁷	1,80x10 ⁻⁸	6,30x10 ⁻⁹	5,84E-08	9,09x10 ⁻⁸

Analisando a Tabela 14, verifica-se que com a nova distribuição, para ambos os casos, retas e pontos, a maioria dos resultados obtidos foram piores, sendo que o modelo de retas por planos equivalentes adaptado foi o mais afetado, principalmente para o parâmetro Z_0 .

Esse foi apenas um caso estudado de uma nova configuração, mostrando como os resultados são afetados quando não há distribuição adequada das feições de controle.

Considerando que os valores aproximados usados para a determinação dos parâmetros de cada modelo podem ter efeito na convergência do processo de estimação, foi realizado o quinto experimento, mudando esses valores, afastando-os do valor tido como verdadeiro.

- Experimento V: Mesmos parâmetros e observações usados no experimento II, usando valores aproximados diferentes.

No quinto experimento dois grupos de valores aproximados iniciais foram testados a fim de verificar o desempenho da estimação para os modelos. No grupo I foram

considerados valores próximos aos valores verdadeiros e no grupo II foi considerada uma discrepância de 2km em X_0 , Y_0 e Z_0 e de 1° para o valor de κ_0 .

Nesse experimento, 50 retas bem distribuídas na cena (Figura 43a) foram usadas para os modelos de retas e 35 pontos bem distribuídos (Figura 43b) foram usados para o modelo de pontos, com polinômio de 1ª ordem e erros aleatórios de $5\mu\text{m}$ e $13\mu\text{m}$, respectivamente. Ou seja, o experimento II foi realizado novamente, apenas com os maiores erros aleatórios, usando os dois grupos de valores aproximados.

Os resultados mostraram que mesmo com a mudança nos valores aproximados iniciais houve convergência de todos os modelos, sendo que com o afastamento dos valores iniciais dos valores “verdadeiros” o número de iterações aumentou de 4 para 8 no modelo de planos equivalentes adaptado, de 3 para 7 no modelo de coplanaridade para retas, e de 14 para 20 no modelo de colinearidade com pontos.

Além dos experimentos apresentados, com relação ao número de parâmetros, magnitude dos erros aleatórios, distribuição e número de observações, pode-se ainda verificar se há melhora nos resultados ao introduzir mais do que dois pontos por reta, no modelo de coplanaridade para retas, e também ao combinar retas e pontos em um ajustamento simultâneo com os modelos de colinearidade e planos equivalentes adaptado.

O sexto experimento foi realizado de modo a aumentar o número de pontos contidos nas retas usadas no modelo de coplanaridade com retas.

Para o modelo de planos equivalentes adaptado, o aumento no número de pontos contidos em cada reta não é efetuado, visto que tal fato implica em estabelecer observações correlacionadas, uma vez que os parâmetros das retas e, e conseqüentemente os vetores normais no espaço imagem serão muito similares, o que piora os resultados, como foi verificado experimentalmente.

- Experimento VI: Testes usando 8 parâmetros e 25 retas, com número maior de pontos (espaço imagem) por retas no modelo de coplanaridade para retas.

A fim de verificar se o aumento do número de pontos (espaço imagem) contidos nas retas melhora os resultados da estimação dos parâmetros no modelo de coplanaridade com retas, o primeiro teste deste experimento foi realizado com uma configuração de 25 retas, com distribuição menos favorável na cena (Figura 47) e apenas um ponto contido em cada reta; no segundo teste foram utilizadas 25 retas (Figura 47) e 2 pontos contidos em cada reta; o terceiro teste com 25 retas (Figura 47) e 4 pontos; e no quarto

experimento 25 retas (Figura 47) e 8 pontos em cada reta. Para todos os testes o erro aleatório inserido nas observações foi de $5\mu\text{m}$. As Tabelas 15 e 16 apresentam os resultados desse experimento. Os resultados da variação do número de pontos por reta são representados em forma de gráficos para os POE estimados, que são separados em três grupos, com magnitudes similares para facilitar a visualização. No primeiro grupo estão representados os parâmetros X_0 , Y_0 e os coeficientes a_1 e a_2 (Figura 48), no segundo grupo estão representados o parâmetro Z_0 e o coeficiente a_3 (Figura 49), e no terceiro grupo estão representados o parâmetro k_0 e o coeficiente a_4 (Figura 50).



Figura 47 - Imagem simulada com características de uma imagem CBERS com 25 retas e distribuição desfavorável das feições sobre a cena.

Tabela 15 - Resultados obtidos com o modelo de coplanaridade para retas, com 25 retas, 13 μ m de erro aleatório, e com 1 e 2 pontos contidos em cada reta.

POE e coef.	Modelo de coplanaridade para retas (5 μ m)		Modelo de coplanaridade para retas (5 μ m)	
	1 ponto por reta (teste 1)		2 pontos por reta (teste 2)	
	$\hat{\sigma}_0 : 0,171$ N° Iterações: 7		$\hat{\sigma}_0 : 0,219$ N° Iterações: 6	
	χ^2 cal: 2,918 χ^2 teo (17,0,975): 30,19		χ^2 cal: 9,219 χ^2 teo (42,0,975): 62,30	
	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	4,72	4,83	3,08	4,43
Y_0 (m)	2,68	2,25	1,36	2,04
Z_0 (m)	111,50	107,73	71,90	98,75
κ_0 (rd)	0,0000756	0,00006079	0,00004157	0,0000567
a_1 (m)	0,0030559	0,00270958	0,00192287	0,0024368
a_2 (m)	0,0019516	0,00140011	0,00084280	0,0012673
a_3 (m)	0,0719926	0,06244522	0,04600048	0,0563181
a_4 (rd)	$4,39 \times 10^{-8}$	$3,17 \times 10^{-8}$	$2,21 \times 10^{-8}$	$2,94 \times 10^{-8}$

Tabela 16 - Resultados obtidos com o modelo de coplanaridade para retas, com 25 retas, 13 μ m de erro aleatório, e com 4 e 8 pontos contidos em cada reta.

POE e coef.	Modelo de coplanaridade para retas (5 μ m)		Modelo de coplanaridade para retas (5 μ m)	
	4 pontos por reta (teste 3)		8 pontos por reta (teste 4)	
	$\hat{\sigma}_0 : 0,210$ N° Iterações: 6		$\hat{\sigma}_0 : 0,224$ N° Iterações: 4	
	χ^2 cal: 19,348 χ^2 teo (92;0,975): 120,72		χ^2 cal: 43,027 χ^2 teo (192;0,975): 237,82	
	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	1,82	3,029	1,12	2,29
Y_0 (m)	1,09	1,39	0,88	1,05
Z_0 (m)	38,66	67,38	24,74	51,05
κ_0 (rd)	0,0000253	0,00003910	0,00001664	0,0000297
a_1 (m)	0,0011478	0,00164752	0,00069802	0,0012426
a_2 (m)	0,0006110	0,00086086	0,00058324	0,0006503
a_3 (m)	0,0260846	0,03808562	0,01705134	0,0287478
a_4 (rd)	$1,5 \times 10^{-8}$	$2,02 \times 10^{-8}$	$1,16 \times 10^{-8}$	$1,53 \times 10^{-8}$

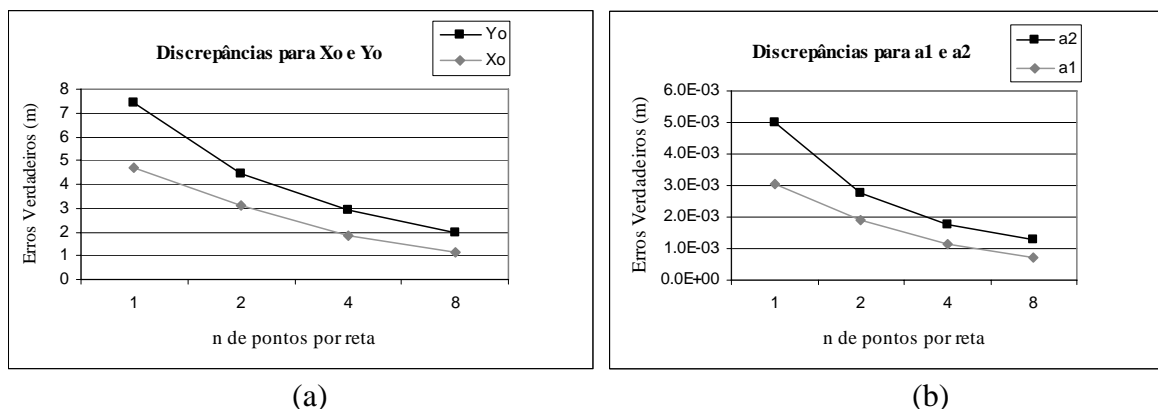


Figura 48 - Gráfico com a representação dos quatro testes realizados para X_0 , Y_0 (a) e para a_1 e a_2 (b) estimados.

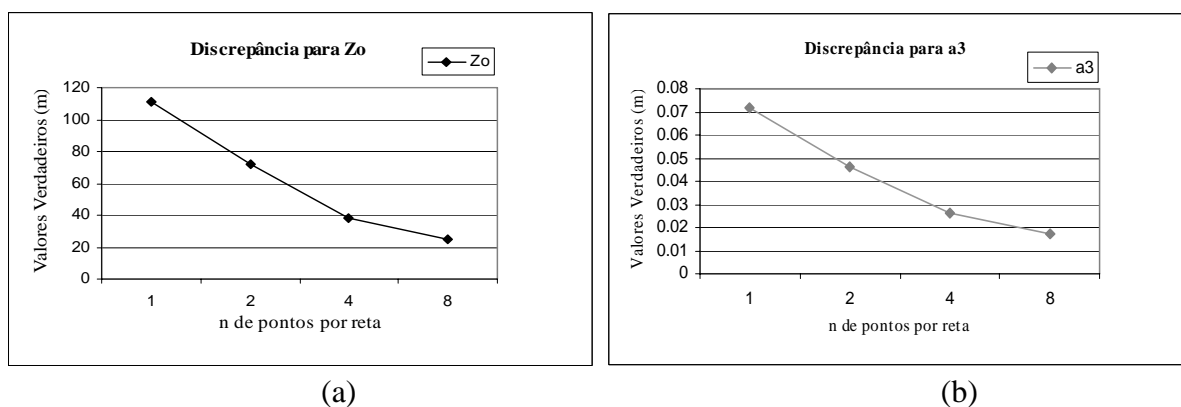


Figura 49 - Gráfico com a representação dos quatro testes realizados para Z_0 (a) e a_3 (b) estimados.

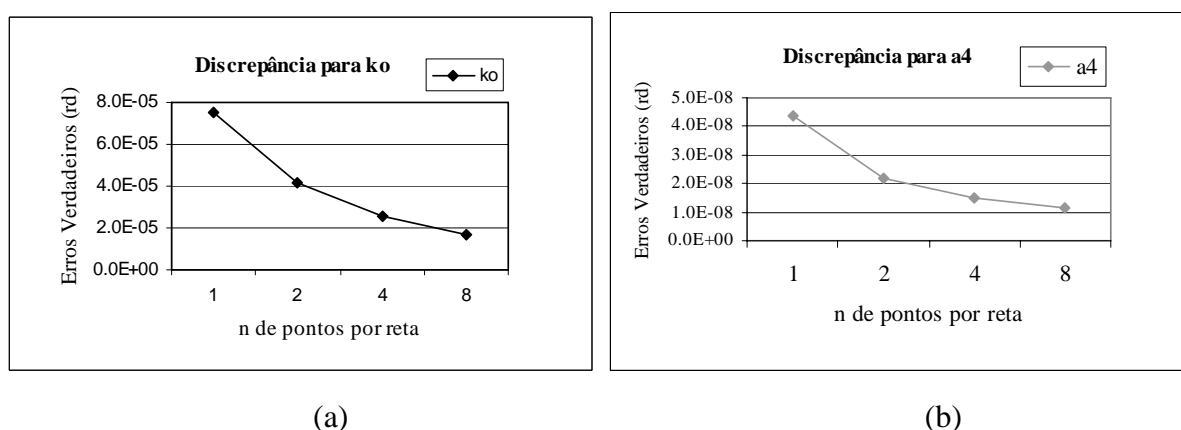


Figura 50 - Gráfico com a representação dos quatro testes realizados para k_0 (a) e a_4 (b) estimados.

Como pode ser observado nas Tabelas 15 e 16 e também nos gráficos (Figuras 48, 49 e 50), com o aumento da redundância das observações, aumentando-se o número de pontos por reta, o resultado da estimação melhorou consideravelmente. A diferença nos valores estimados dos parâmetros já é notória introduzindo-se um ponto a mais

por reta; acrescentando quatro pontos por reta, essa diferença é ainda mais significativa. No entanto, aumentando-se para oito pontos, o erro verdadeiro diminui, mas a diferença não é tão significativa. Isto indica que essa melhora nos parâmetros, com o aumento do número de pontos por reta, se estabiliza em certo momento. Isto vale para o caso estudado, mas seriam necessários mais experimentos para verificar se com outras configurações a estabilização da solução ocorre do mesmo modo.

Como comentado anteriormente, a combinação de retas e pontos também é outra estratégia que pode melhorar os resultados. Por esta razão o experimento 7 foi realizado de modo a testar esta hipótese.

- Experimento VII: Testes usando ajustamento simultâneo de pontos e retas, com os modelos de colinearidade para pontos e planos equivalentes adaptado.

Esse experimento foi realizado com o ajustamento simultâneo de observações de pontos e de pontos combinado a retas, com o uso dos modelos de colinearidade para pontos e planos equivalentes adaptado, respectivamente. Três testes foram feitos neste grupo de experimentos, para verificar se há melhora nos resultados ao combinar pontos com retas. O primeiro deles foi executado com 50 retas (Figura 43a) e 7 pontos (Figura 51), o segundo com 50 retas (Figura 43a) e 14 pontos (Figura 45b) e o terceiro com 50 retas (Figura 43a) e 14 pontos com distribuição desfavorável (Figura 46b).

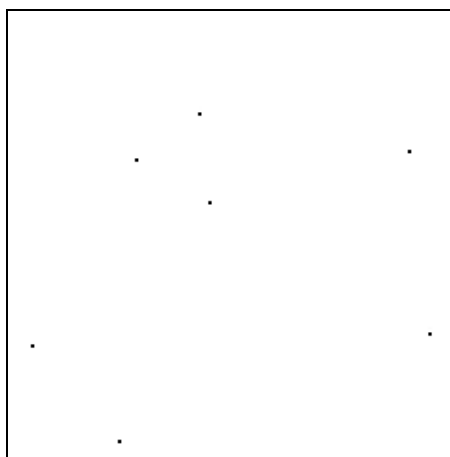


Figura 51 - Imagem simulada com características de uma cena CBERS com agrupamento de 7 pontos.

Nos vértices das retas projetadas para o espaço imagem foram inseridos erros aleatórios da ordem de $5\mu\text{m}$ e nos pontos projetados erros aleatórios da ordem de $13\mu\text{m}$. A Tabela 17 apresenta os resultados dos três testes realizados.

Tabela 17 - Resultados obtidos combinando-se o modelo dos planos equivalentes adaptado e colinearidade, usando 50 retas com 7 e 14 pontos.

POE e coef.	Ajuste simultâneo de 50 retas e 7 pontos		Ajuste simultâneo de 50 retas e 14 pontos		Ajuste simultâneo de 50 retas e 14 pontos (configuração desfavorável)	
	Teste 1		Teste 2		Teste 3	
	$\hat{\sigma}_0 : 0,127$		$\hat{\sigma}_0 : 0,113$		$\hat{\sigma}_0 : 0,117$	
	Nº Iterações: 4		Nº Iterações: 4		Nº Iterações: 4	
	χ^2 cal: 5,231 χ^2 teo (49;0,975): 71,42		χ^2 cal: 5,448 χ^2 teo (56;0,975): 77,38		χ^2 cal: 5,659 χ^2 teo (56;0,975): 77,38	
	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	3,87	5,28	2,47	3,78	2,59	3,93
Y_0 (m)	5,29	4,76	4,44	3,58	6,18	3,73
Z_0 (m)	40,58	102,23	27,85	72,84	57,33	74,66
κ_0	$8,33 \times 10^{-5}$	0,000209	$3,46 \times 10^{-5}$	0,000128	$3,44 \times 10^{-5}$	0,00013
a_1	0,001317	0,001691	0,000691	0,001238	0,000715	0,001348
a_2	0,001483	0,001574	0,001105	0,001192	0,001504	0,001305
a_3	0,017589	0,037559	0,006624	0,027641	0,024354	0,029004
a_4	$3,6 \times 10^{-8}$	$7,76 \times 10^{-8}$	$1,65 \times 10^{-8}$	$4,93 \times 10^{-8}$	$2,17 \times 10^{-8}$	$5,1 \times 10^{-8}$

Analisando os resultados mostrados na Tabela 17, verifica-se que a combinação de 7 pontos com 50 retas acarretou uma melhora, mesmo que pequena, considerando os resultados da estimação usando apenas as 50 retas (experimento II – Tabela 9). Com a combinação de 14 pontos com 50 retas os resultados apresentaram-se bem melhores tanto para os parâmetros estimados usando apenas as 50 retas (experimento II – Tabela 9), como no caso dos parâmetros estimados usando apenas os 14 pontos (experimento III – Tabela 13). Para o caso da combinação das 50 retas e 14 pontos com distribuição desfavorável, os resultados apresentaram-se similares aos resultados da estimação usando as 50 retas (experimento II – Tabela 9), porém apresentaram-se bem melhores que o uso dos 14 pontos isoladamente (experimento IV – Tabela 14). Além disso, os resultados apresentados (Tabela 17) evidenciaram que o aumento no número de pontos melhora os resultados da estimação.

Fica claro que tais afirmações são feitas apenas para os experimentos em questão, e que mudanças podem ocorrer em configurações diferentes. A definição das características das configurações de pontos e retas deve ser verificada empiricamente para cada situação e fica como uma das sugestões para trabalhos futuros.

Para todos os experimentos realizados, a hipótese básica do teste estatístico com a distribuição qui-quadrado χ^2 não é rejeitada ao nível de significância de 5%.

De modo geral, estes experimentos mostraram que os resultados podem ser melhorados com a combinação de retas e pontos, visando deste modo, minimizar os problemas oriundos de cada modelagem e de configurações de elementos de controle deficientes.

4.1.2 Resultados obtidos com dados reais

Os experimentos com os modelos de orientação usando feições retas usando de dados reais foram realizados com as coordenadas dos eixos das rodovias coletadas em campo e as coordenadas correspondentes dessas feições retas extraídas da imagem CBERS.

Do conjunto de rodovias coletadas em campo com GPS, 50 segmentos de rodovias foram usados como dados de controle nos experimentos. Esses segmentos de rodovias são definidos pelas coordenadas de terreno no sistema de projeção UTM, Datum SAD69.

Inicialmente o conjunto de segmentos de controle era de 56 linhas retas (Figura 36), definidas pelas rodovias principais e secundárias registradas na cena CBERS. Esse número foi posteriormente diminuído para 50, devido à problemas relacionados com os algoritmos de extração e refinamento, especificamente pela ineficiência do processo de limiarização.

As coordenadas imagem dos vértices dos segmentos, correspondentes aos segmentos de rodovias levantados em campo, foram determinadas pela estratégia de extração de retas usando a transformada de Hough e refinadas por um método de ajuste de retas (Seção 3.2.2).

Já para os experimentos com o modelo de colinearidade com pontos, foram coletados 23 pontos de controle de modo manual na mesma base digital contendo as rodovias levantadas com GPS. Esses pontos foram escolhidos nos cruzamentos de rodovias e trevos. A Figura 52 ilustra a cena CBERS com a configuração desses pontos.

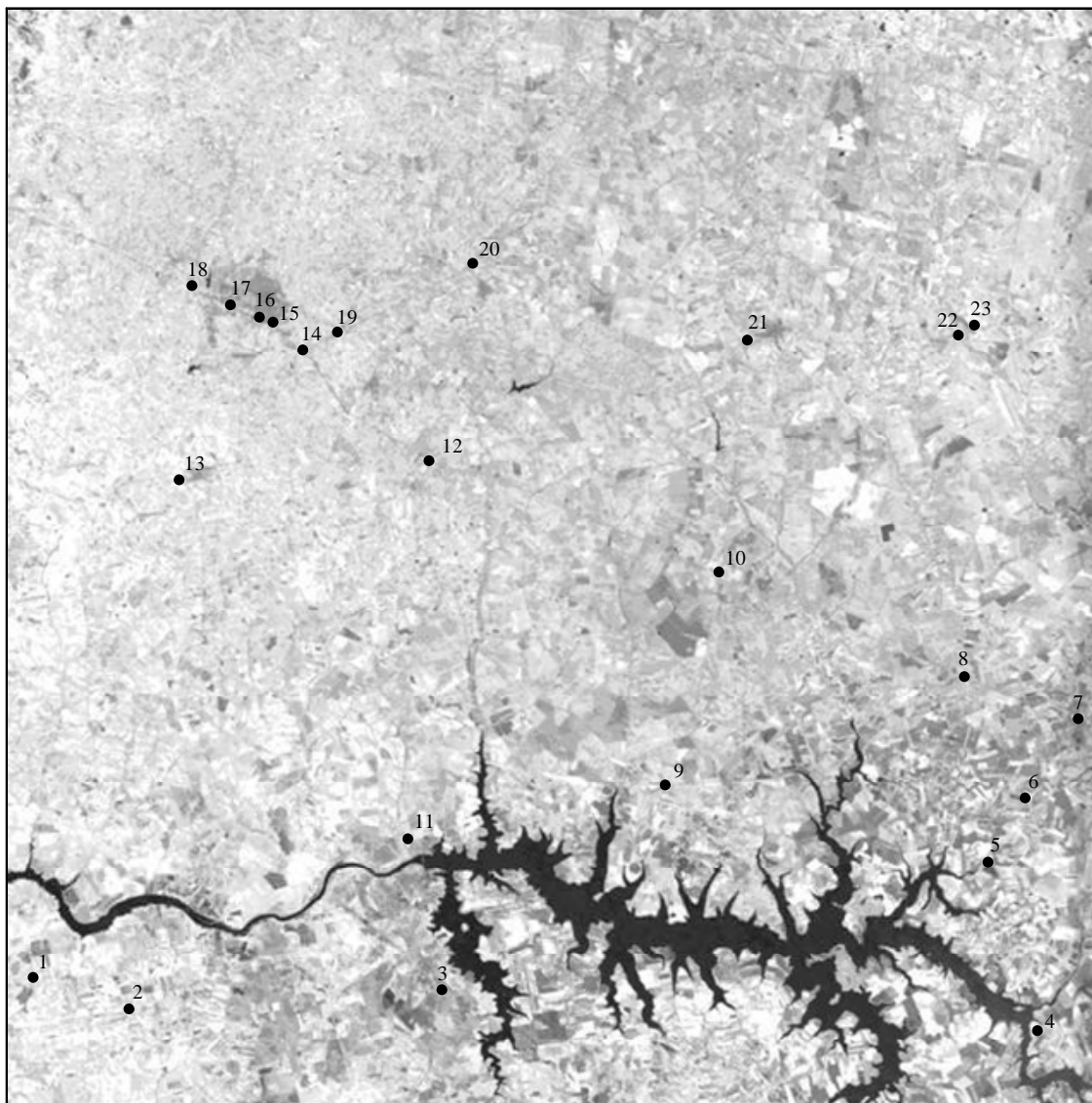


Figura 52 - Imagem da cena CBERS com distribuição de pontos de controle usados nos experimentos.

Com a disponibilidade dos dados de entrada, os experimentos foram realizados usando os programas de orientação com retas propostos, além do modelo usando pontos, desenvolvidos para recuperar indiretamente os POE.

Para permitir a análise dos resultados a serem obtidos nos experimentos usando dados reais, foram estimados os parâmetros de orientação exterior (X_0 , Y_0 , Z_0 , κ_0) e os coeficientes polinomiais de primeira e segunda ordem (a_1 , a_2 , ..., b_4) com 123 pontos de controle. Estes valores estimados foram usados como referência para posterior comparação com os resultados obtidos com os POE estimados com os modelos propostos. Como no caso dos experimentos com dados simulados, nos experimentos com dados reais o ângulo de

rotação φ foi considerado como nulo e o ângulo ω considerado como um valor fixo ($\omega=0$), para evitar as correlações entre os parâmetros.

A configuração dos 123 pontos usados como referência é mostrada na Figura 53. Os parâmetros e seus desvios-padrão estimados, com polinômios de segunda e primeira ordem são apresentados nas Tabelas 18 e 19, respectivamente. Os vetores dos resíduos estimados com os dois grupos de parâmetros (12 e 8) são apresentados no Apêndice B.

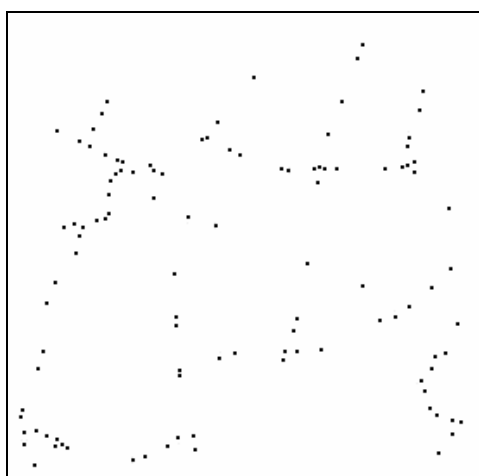


Figura 53 - Distribuição dos 123 pontos na cena CBERS usados como referência.

Tabela 18 - Parâmetros de orientação exterior estimados e usados como referência (polinômio de 2ª ordem).

Valores estimados com polinômio de segunda ordem								
POE	Valor de $\hat{\sigma}_0$: 0,181				χ^2 calculado: 20,18			
	Número de Iterações: 12				χ^2 teórico (111;0,975): 140,9			
	Parâmetros	$\hat{\sigma}_x$	Coef. Polinomiais		$\hat{\sigma}_x$	Coef. Polinomiais		$\hat{\sigma}_x$
$X_{0(m)}$	470623,27	4,389	$a_{1(m)}$	4,3416398	0,00395720	$b_{1(m)}$	$6,16 \times 10^{-8}$	$7,27 \times 10^{-7}$
$Y_{0(m)}$	7467221,86	4,389	$a_{2(m)}$	18,996887	0,00395721	$b_{2(m)}$	$-8,23 \times 10^{-7}$	$7,27 \times 10^{-7}$
$Z_{0(m)}$	785948,10	86,827	$a_{3(m)}$	-0,050486	0,08687039	$b_{3(m)}$	$1,04 \times 10^{-5}$	$1,65 \times 10^{-5}$
$\kappa_{0(rd)}$	-0,15603706	0,000110	$a_{4(rd)}$	$-6,10 \times 10^{-8}$	$1,10 \times 10^{-7}$	$b_{4(rd)}$	$7,75 \times 10^{-12}$	$2,10 \times 10^{-12}$

Tabela 19 - Parâmetros de orientação exterior estimados e usados como referência (modelo linear; polinômio de primeira ordem).

POE	Valores estimados com polinômio de primeira ordem				
	Valor de $\hat{\sigma}_0$: 0,179 Número de Iterações: 14		χ^2 calculado: 21,49 χ^2 teórico(115;0,975):147,30		
	Parâmetros	$\hat{\sigma}_x$	Coef. Polinomiais		$\hat{\sigma}_x$
$X_{0(m)}$	470622, 324	2,516	$a_{1(m)}$	4,342167	0,000790203
$Y_{0(m)}$	7467225,315	2,516	$a_{2(m)}$	18,99266	0,000790203
$Z_{0(m)}$	785901, 627	48,425	$a_{3(m)}$	0, 004118	0,01715578
$\kappa_{0(rd)}$	-0.15604340	6,1647E-05	$a_{4(rd)}$	$-3,02 \times 10^{-8}$	$2,18 \times 10^{-8}$

Os desvios-padrão dos parâmetros estimados com os 123 pontos de controle (Tabelas 18 e 19) apresentam-se com boa qualidade, e também, coerentes considerando os dois polinômios testados.

Além disso, para verificar a qualidade da estimação, foi realizada a projeção de observações para o espaço objeto usando os POE gerados para cada linha com as equações de colinearidade inversa, em 8 pontos de verificação.

Os oito pontos de verificação foram selecionados (Figura 54) e suas coordenadas imagem foram coletadas manualmente. Esses pontos foram usados a fim de determinar o erro nas coordenadas destes pontos no terreno, considerando os POE estimados com os 123 pontos, usando o modelo de colinearidade para pontos e, posteriormente para as abordagens propostas. Como no caso de dados simulados, para a altimetria foi usado o valor da coordenada Z verdadeira. Os resultados são apresentados na Tabela 20.

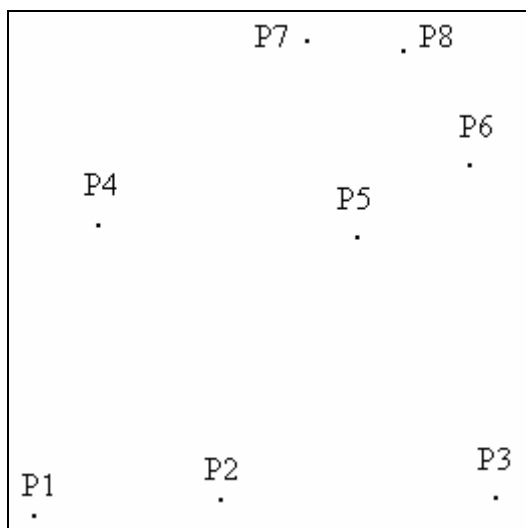


Figura 54 - Distribuição dos 8 pontos de verificação na cena CBERS.

Tabela 20 - Discrepâncias em 8 pontos de verificação para o modelo de colinearidade com pontos, com polinômio de 2^a e 1^a ordem.

Pontos de Verificação	Modelo de colinearidade com pontos (12 parâmetros)		Modelo de colinearidade com pontos (8 parâmetros)	
	\mathcal{E}_v (m)		\mathcal{E}_v (m)	
	E	N	E	N
P1	0,47	-2,71	-0,98	-4,9
P2	6,44	-19,96	6,83	-21,77
P3	6,8	-5,82	9,16	-8,19
P4	-13,74	-1,94	-12,94	-0,34
P5	-10,32	-6,5	-10,95	-5,08
P6	2,55	3,74	2,25	4,28
P7	-17,44	-7,54	-16,9	-11,96
P8	-9,25	-14,69	-7,24	-17,52
Média	-4,31	-6,92	-3,84	-8,18
$\hat{\sigma}_x$	9,49	7,44	9,58	8,64
EMQ	10,55	10,50	10,43	12,30

Os erros nas coordenadas E e N do terreno, para os dois polinômios testados, mostrados na Tabela 20, apresentam-se na ordem de 1/2 pixel, indicando que a trajetória da plataforma foi bem modelada pelos dois polinômios, e os erros apresentados são provavelmente observacionais. Como pode ser observado também, o polinômio de 2^a ordem

apresentou resultados ligeiramente melhores, considerando a configuração de pontos utilizada, mesmo que com uma ordem de grandeza pequena. Porém, quando o número de observações for menor, ou com distribuição desfavorável, o que ocorre na prática, provavelmente, o polinômio linear apresente melhores resultados, visto que com pouca redundância, o polinômio de segunda ordem pode absorver erros observacionais.

Os resultados (Tabela 20) mostraram que a estimação dos POE com os 123 pontos de controle foi satisfatória e pode ser usada com referência para os experimentos com os modelos propostos, além dos experimentos com o modelo de colinearidade usando menor número de pontos.

Como no caso dos dados simulados, os experimentos com dados reais foram realizados com diferentes configurações: mudanças no número de retas e pontos, considerando a distribuição dessas informações, aumento no número de pontos por reta para o modelo de coplanaridade com retas, e combinando-se retas e pontos.

Os testes realizados nesta seção foram divididos em 8 experimentos, os quais são apresentados e discutidos em seqüência.

- Experimento I: Testes usando 12 parâmetros com 50 retas para modelos de retas e 23 pontos para modelo de pontos.

Os primeiros testes com dados reais, utilizando os modelos de orientação, foram feitos com o polinômio de segunda ordem, ou seja, um grupo de 12 parâmetros (Tabela 18), para estimar os POE da cena. Nestes testes, foram usadas 50 retas para os modelos que usam retas (Figura 36) e 23 pontos para o modelo de colinearidade com pontos (Figura 52). Para o caso das retas de controle, estas foram definidas por 2 vértices levantados em campo.

Os resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado, modelo de coplanaridade para retas e modelo de colinearidade para pontos são apresentados na Tabela 21, que mostra as discrepâncias entre os valores estimados e os valores de referência, bem como os desvios padrão estimados a partir da MVC obtida no ajustamento. Por conveniência estas discrepâncias serão denominadas de erros verdadeiros.

Tabela 21 - Resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado, modelo de coplanaridade para retas e modelo de colinearidade para pontos com dados reais usando polinômio de segunda ordem.

POE e coef.	Modelo dos planos equivalentes adaptado		Modelo de coplanaridade para retas		Modelo de colinearidade para pontos	
	$\hat{\sigma}_0 : 0,444$ Nº Iterações: 3		$\hat{\sigma}_0 : 1,266$ Nº Iterações: 4		$\hat{\sigma}_0 : 0,257$ Nº Iterações: 15	
	χ^2 cal: 16,885 χ^2 teo (38,0,975): 56,37		χ^2 cal: 16,463 χ^2 teo (38,0,975): 56,37		χ^2 cal: 2,827 χ^2 teo (11,0,975): 21,92	
	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	31,62	25,49	3,54	17,81	-26,82	12,43
Y_0 (m)	-39,04	21,59	5,06	9,46	-24,47	12,43
Z_0 (m)	-231,17	503,84	429,68	348,71	-302,09	235,22
κ_0 (rd)	0,001839	0,000934	0,000250	0,000286	0,000053	0,000299
a_1 (m)	-0,03440	0,024931	-0,009075	0,016653	0,024129	0,013493
a_2 (m)	0,019627	0,023289	0,000656	0,007958	0,026617	0,013493
a_3 (m)	-0,17358	0,493588	-0,30451	0,379443	0,24684	0,273821
a_4 (rd)	$-2,26 \times 10^{-6}$	$1,01 \times 10^{-6}$	$-4,79 \times 10^{-7}$	$3,31 \times 10^{-7}$	$-3,20 \times 10^{-7}$	$3,49 \times 10^{-7}$
b_1 (m)	$6,40 \times 10^{-6}$	$4,59 \times 10^{-6}$	$2,20 \times 10^{-6}$	$3,06 \times 10^{-6}$	$-4,47 \times 10^{-6}$	$2,69 \times 10^{-6}$
b_2 (m)	$-1,94 \times 10^{-6}$	$4,64 \times 10^{-6}$	$-2,56 \times 10^{-7}$	$1,45 \times 10^{-6}$	$-5,38 \times 10^{-6}$	$2,69 \times 10^{-6}$
b_3 (m)	$5,48 \times 10^{-5}$	$9,43 \times 10^{-5}$	$4,68 \times 10^{-5}$	$7,12 \times 10^{-5}$	$-3,95 \times 10^{-5}$	$5,60 \times 10^{-5}$
b_4 (rd)	$4,48 \times 10^{-10}$	$2,06 \times 10^{-10}$	$9,66 \times 10^{-11}$	$6,67 \times 10^{-11}$	$7,97 \times 10^{-11}$	$7,14 \times 10^{-11}$

Os resultados apresentados na Tabela 21 mostraram que os valores dos desvios-padrão estimados são compatíveis, em todos os casos, com os erros verdadeiros, sendo as discrepâncias dos valores estimados com os valores de referência pouco acentuadas, na ordem de 31 a 39 m para os parâmetros X_0 e Y_0 no modelo de planos equivalentes adaptado, 3 a 5 m no modelo de coplanaridade para retas e 24 a 27 m no modelo de pontos.

As maiores diferenças apresentam-se no parâmetro Z_0 , como também havia sido verificado nos experimentos com dados simulados, sendo que a menor discrepância foi no modelo de planos equivalentes adaptado. No entanto, apesar do parâmetro Z_0 ter uma discrepância menor no modelo de planos equivalentes adaptado do que nos outros modelos, um parâmetro isolado não diz muito, ou seja, não reflete de fato a qualidade da estimação, visto que é o conjunto dos parâmetros que gera os POE de toda a cena.

Porém para verificar a qualidade da estimação, as coordenadas imagem dos oito pontos de verificação (Figura 54) foram projetados para espaço objeto usando os POE gerados para cada linha da cena.

Tabela 22 - Discrepâncias em 8 pontos de verificação para as três abordagens com polinômio de 2ª ordem.

Pontos de Verificação	Modelo dos planos equivalentes adaptado		Modelo de coplanaridade para retas		Modelo de colinearidade para pontos	
	\mathcal{E}_v (m)		\mathcal{E}_v (m)		\mathcal{E}_v (m)	
	E	N	E	N	E	N
P1	-30,34	104,78	23,71	-3,88	6,01	18,31
P2	-15,11	23,7	10,67	-25,07	21,53	-5,15
P3	-2,00	-25,73	-13,45	-11,71	38,13	9,85
P4	-15,17	-30,72	-16,41	-15,39	-14,08	-10,39
P5	9,05	2,43	-5,49	-6,02	-15,93	-8,48
P6	6,13	-6,86	1,93	4,2	2,36	6,53
P7	-59,28	-37,98	-39,01	-12,14	11,27	26,43
P8	-65,23	-93,9	-33,98	-27,74	17,51	2,92
Média	-21,49	-8,03	-9,00	-12,21	8,35	5,00
$\hat{\sigma}_x$	28,22	57,24	21,34	10,64	18,07	13,02
EMQ	36,39	57,89	23,41	16,85	20,15	14,08

Os erros nas coordenadas E e N para os modelos de colinearidade para pontos, e coplanaridade para retas foi de aproximadamente 1 pixel em E e subpixel em N. Já no modelo de planos equivalentes adaptado o erro na coordenada E foi de aproximadamente 1,7 pixels e na coordenada N apresentou-se aproximadamente em 2,7 pixels.

Como pode ser notado, os melhores resultados foram obtidos com o modelo de colinearidade com pontos, apesar de ser pequena a diferença desses resultados com os resultados obtidos com o modelo de coplanaridade para retas.

De modo geral, todas as abordagens apresentaram resultados satisfatórios, e podem ser usadas para recuperar os POE da cena.

Vale salientar que os resultados com o modelo de planos equivalentes adaptado foram obtidos usando a correção quanto ao deslocamento de perspectiva ao longo da

trajetória que ocorre usando dados reais. Sem essa correção os resultados obtidos com esse modelo são insatisfatórios, com erros até dez vezes maiores, como pode ser visto na Tabela 23.

Tabela 23 - Resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado, sem a correção dos parâmetros angular e linear da reta.

POE e coef.	Modelo dos planos equivalentes adaptado	
	$\hat{\sigma}_0 : 7,207$ Nº Iterações: 7	χ^2 cal: 273,89 χ^2 teo (38;0,975): 56,37
	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	120,190	410,57
Y_0 (m)	-416,756	346,80
Z_0 (m)	-3407,435	8094,14
κ_0 (rd)	0,024406507	0,015034
a_1 (m)	0,044330103	0,402319
a_2 (m)	0,599036963	0,37337635
a_3 (m)	-6,422610172	7,91719345
a_4 (rd)	$-5,0873 \times 10^{-5}$	$1,58 \times 10^{-5}$
b_1 (m)	$-1,6158 \times 10^{-5}$	$7,40 \times 10^{-5}$
b_2 (m)	-0,000122879	$7,44 \times 10^{-5}$
b_3 (m)	0,001576272	0,001503
b_4 (rd)	$9,7749 \times 10^{-9}$	$3,19 \times 10^{-9}$

Com o propósito de verificar se o polinômio de 1ª ordem atende melhor à modelagem de trajetória da plataforma na tomada da cena, um novo experimento foi realizado.

- Experimento II: Testes usando 8 parâmetros com 50 retas para modelos de retas e 23 pontos para modelo de pontos.

Neste experimento foram realizados os testes com cada modelo usando a mesma configuração de dados do experimento I, mas com polinômio de primeira ordem. Neste experimento os parâmetros de referência usados são os apresentados na Tabela 19.

Os resultados dos testes com os três modelos de orientação são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado, modelo de coplanaridade para retas e modelo de colinearidade para pontos com dados reais usando polinômio de primeira ordem.

POE e coef.	Modelo dos planos equivalentes adaptado		Modelo de coplanaridade para retas		Modelo de colinearidade para pontos	
	$\hat{\sigma}_0 : 0,470$ Nº Iterações: 4		$\hat{\sigma}_0 : 0,992$ Nº Iterações: 4		$\hat{\sigma}_0 : 0,240$ Nº Iterações: 16	
	χ^2 cal: 19,776 χ^2 teo (42;0,975): 62,30		χ^2 cal: 16,867 χ^2 teo (42;0,975): 62,30		χ^2 cal: 3,607 χ^2 teo (15;0,975): 27,49	
	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	-4,110	14,39	-10,30	10,85	-8,83	7,74
Y_0 (m)	-23,34	13,52	3,78	2,82	-6,43	7,74
Z_0 (m)	-559,62	302,81	124,35	201,59	-122,92	148,55
κ_0 (rd)	$-4,59 \times 10^{-5}$	0,000609	$-6,70 \times 10^{-5}$	$8,47 \times 10^{-5}$	-0,000143	0,000189
a_1 (m)	0,001513	0,004407	0,004899	0,00328	0,002225	0,002520
a_2 (m)	0,008385	0,004403	-0,00185	0,000939	0,000655	0,002520
a_3 (m)	0,113446	0,099391	-0,07344	0,06949	0,060547	0,054494
a_4 (rd)	$-8,54 \times 10^{-8}$	$2,31 \times 10^{-7}$	$-6,2 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^{-8}$	$6,43 \times 10^{-8}$	$6,93 \times 10^{-8}$

As discrepâncias dos valores estimados são menores para este experimento, como mostra a Tabela 24, comparados aos resultados com polinômio de segunda ordem (Tabela 21), e os valores dos parâmetros são coerentes com valores dos desvios-padrão estimados. No entanto, para o parâmetro Z_0 do modelo de planos equivalentes adaptado, esse fato não é comprovado, visto que apresentou-se pior nesta estimação. Contudo, como já foi mencionado, a estimação isolada desse parâmetro não pode ser tomada como indicador de que o resultado da estimação foi pior, pois devem ser considerados todos os parâmetros. Tal fato poderá ser evidenciado com o uso desses parâmetros estimados para projetar as coordenadas imagem dos 8 pontos de verificação para o espaço objeto.

Os resultados da projeção dos pontos de verificação com os parâmetros estimados, usando as equações de colinearidade inversas são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Discrepâncias em 8 pontos de verificação para as três abordagens com polinômio de 1ª ordem.

Pontos de Verificação	Modelo dos planos equivalentes adaptado		Modelo de coplanaridade para retas		Modelo de colinearidade para pontos	
	\mathcal{E}_v (m)		\mathcal{E}_v (m)		\mathcal{E}_v (m)	
	E	N	E	N	E	N
P1	-32,32	18,8	18,16	-11,86	-0,76	-4,11
P2	3,02	-1,42	15,03	-25,14	13,21	-16,69
P3	44,78	10,7	2,06	-5,74	24,04	2,69
P4	-24,07	-16,67	-7,03	-11,16	-7,34	6,03
P5	-6,49	-3,96	-12,69	-6,83	-11,41	-1,77
P6	8,13	9,37	-2,86	6,44	-5,42	4,07
P7	-20,98	-30,32	-19,73	-16,91	-22,41	-10,33
P8	-10,56	-24,31	-11,27	-18,11	-18,39	-19,11
Média	-4,811	-4,72	-2,29	-11,16	-3,56	-4,90
$\hat{\sigma}_x$	24,23	17,65	13,37	9,52	15,60	9,54
EMQ	24,77	18,36	13,60	15,27	16,06	10,89

Os resultados apresentados na Tabela 25 mostram que a estimativa de trajetória da plataforma com o modelo de polinômio de primeira ordem é mais adequada, para os casos estudados. Os erros nas coordenadas E e N dos pontos de verificação, determinados com os parâmetros estimados usando esse polinômio para os três modelos, foram reduzidos para a ordem de grandeza subpixel, exceto para a coordenada E do modelo de planos equivalentes adaptado, ficando próximo de 1,5 pixel.

Embora o erro em Z_0 , no caso do modelo dos planos equivalentes adaptado, tenha sido maior na estimação com polinômio linear, isto não afetou significativamente as coordenadas no espaço objeto e, de modo geral, os resultados apresentaram uma melhora significativa, para todas as abordagens, sendo que os resultados apresentados pelo modelo de coplanaridade para retas e colinearidade com pontos foram similares.

Um outro experimento foi realizado com a variação nos valores dos parâmetros aproximados, usando os mesmos dados desse experimento. Os resultados para o modelo de coplanaridade para retas e colinearidade para pontos mostraram que o número de iterações aumentou com o afastamento desses valores aproximados com os tidos como

verdadeiros (valores de referência), e passaram de 4 para 5 iterações, e 16 para 19 iterações, respectivamente. Já para o modelo de planos equivalentes, o problema da variação nesses parâmetros está relacionado diretamente com a correção do vetor de deslocamento da plataforma, e enquanto for utilizada essa estratégia de correção, os parâmetros aproximados devem ser de boa qualidade. O impacto no afastamento desses valores aproximados, além de aumentar o número de iterações, piora o resultado da estimação.

No terceiro experimento foi considerado o número de observações envolvidas no ajustamento, para verificar qual é o efeito na diminuição para os parâmetros estimados.

Em todos os experimentos subseqüentes o polinômio de primeira ordem foi o utilizado pelas razões apresentadas.

- Experimento III: Testes usando 8 parâmetros com 30 retas para modelos de retas e 15 pontos para modelo de pontos.

Neste experimento foi reduzido o número de observações, tanto para retas como para pontos, para verificar o efeito nos resultados, mas mantendo-se ainda uma distribuição adequada. Um conjunto de 30 retas (Figura 55a) foi usado para os modelos com retas, e 15 pontos (Figura 55b) para o modelo de colinearidade com pontos. Os resultados desse experimento para os parâmetros estimados usando os três modelos de orientação são apresentados na Tabela 26.

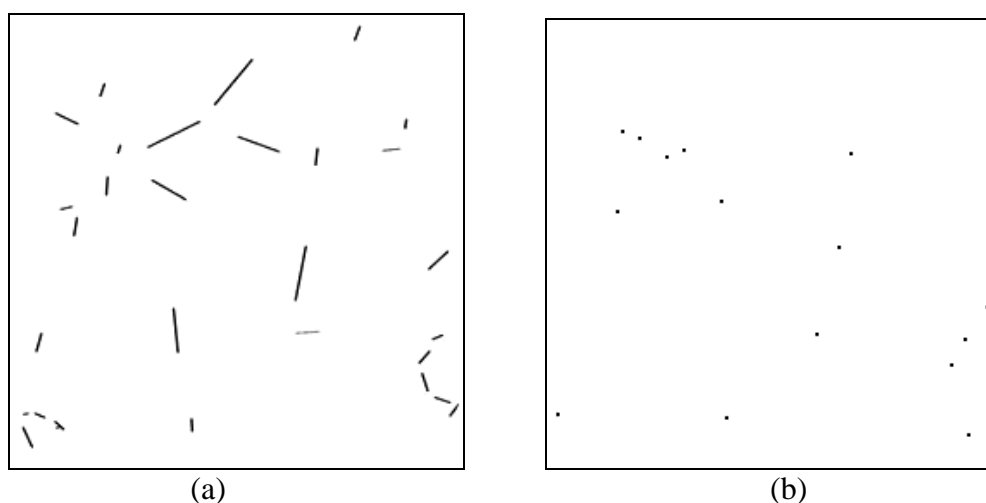


Figura 55 - Configuração com agrupamento de 30 retas (a) e com 15 pontos (b), com boa distribuição na cena.

Tabela 26 - Resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado, modelo de coplanaridade para retas e modelo de colinearidade para pontos com dados reais usando menor número de observações.

POE e coef.	Modelo dos planos equivalentes adaptado		Modelo de coplanaridade para retas		Modelo de colinearidade para pontos	
	$\hat{\sigma}_0 : 0,455$ Nº Iterações: 5		$\hat{\sigma}_0 : 1,001$ Nº Iterações: 4		$\hat{\sigma}_0 : 0,266$ Nº Iterações: 16	
	χ^2 cal: 10,021 χ^2 teo (22;0,975): 36,78		χ^2 cal: 7,008 χ^2 teo (22;0,975): 36,78		χ^2 cal: 1,868 χ^2 teo (7;0,975): 16,01	
	ε_v	$\hat{\sigma}_x$	ε_v	$\hat{\sigma}_x$	ε_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	0,905	15,18	13,00	12,16	-12,45	11,51
Y_0 (m)	-24,10	17,02	8,22	5,90	-4,05	11,51
Z_0 (m)	-305,28	334,14	363,07	225,37	-147,42	214,25
κ_0 (rd)	0,000698	0,000678	-0,000147	0,000125	-0,000357	0,0002727
a_1 (m)	0,000513	0,005143	0,000413	0,003953	0,003899	0,0042688
a_2 (m)	0,007513	0,005692	-0,004710	0,001758	0,001462	0,0042689
a_3 (m)	-0,04366	0,134011	-0,014559	0,083577	0,074663	0,0954563
a_4 (rd)	$-5,61 \times 10^{-7}$	$3,42 \times 10^{-7}$	$5,53 \times 10^{-8}$	$4,73 \times 10^{-8}$	$1,60 \times 10^{-7}$	$1,21 \times 10^{-7}$

Analisando a Tabela 26, percebe-se que os parâmetros estimados e seus desvios padrão foram afetados quando a redundância das observações é diminuída, mas essa diferença não é tão elevada. Isto ocorre provavelmente, porque as observações ainda apresentam uma distribuição favorável na cena.

Verifica-se, também, que esses resultados permanecem adequados para realizar a geração dos POE e, conseqüentemente, fazer a correção geométrica da imagem. Para confirmar esta hipótese, a projeção das observações foi realizada nos 8 pontos de verificação. Os resultados são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - Discrepâncias em 8 pontos de verificação para as três abordagens com número menor de observações.

Pontos de Verificação	Modelo dos planos equivalentes adaptado		Modelo de coplanaridade para retas		Modelo de colinearidade para pontos	
	\mathcal{E}_v (m)		\mathcal{E}_v (m)		\mathcal{E}_v (m)	
	E	N	E	N	E	N
P1	-17,72	50,16	9,55	-20,54	-4,78	-35,25
P2	2,06	5,39	-1,96	-28,67	15,61	-21,28
P3	24,18	-13,11	-27,18	-2,76	29,49	8,28
P4	-43,93	-43,05	-18,67	-6,88	-7,67	4,85
P5	0,29	13,74	-28,63	-6,46	-14,09	-8,57
P6	35,95	60,81	-17,88	4,35	-11,56	-8,75
P7	-12,59	-11,85	-30,54	-13,96	-28,77	-19,34
P8	18,97	28,67	-22,01	-19,15	-26,86	-33,94
Média	0,901	11,34	-17,16	-11,75	-6,07	-14,25
$\hat{\sigma}_x$	25,73	34,61	14,04	10,78	19,93	16,20
EMQ	25,75	36,68	23,11	16,56	20,96	22,24

Como pode-se observar na Tabela 27, os erros nas coordenadas E e N aumentaram com a menor redundância dos dados, mas esse aumento não foi significativo. O pior caso ocorreu com o modelo de planos equivalentes adaptado, que teve um aumento de 1 pixel para 1,7 pixels, aproximadamente, de erros nas coordenadas.

Visto que os resultados não foram tão afetados com a diminuição no número de observações, provavelmente pela boa distribuição, o quarto experimento foi realizado com o mesmo número de observações desse experimento, mas com uma nova distribuição.

- Experimento IV: Testes usando 8 parâmetros com nova distribuição das observações: 30 retas para modelos de retas e 15 pontos para modelo de pontos.

A nova configuração das retas é apresentada na Figura 56a e para pontos na Figura 56b. Os resultados deste experimento são mostrados na Tabela 28.

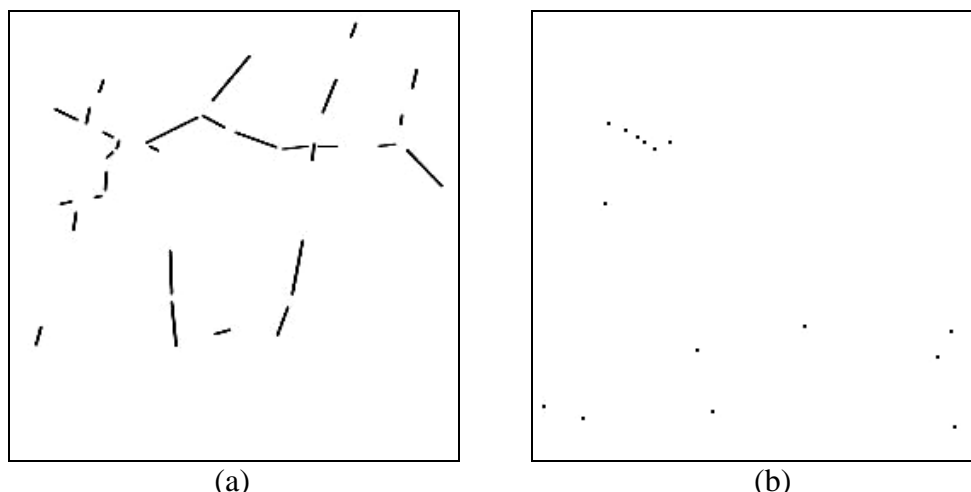


Figura 56 - Configuração com agrupamento de 30 retas (a) e com 15 pontos (b), com distribuição desfavorável na cena.

Tabela 28 - Resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado, modelo de coplanaridade para retas e modelo de colinearidade para pontos com dados reais usando menor número de observações e outra distribuição.

POE e coef.	Modelo dos planos equivalentes adaptado		Modelo de coplanaridade para retas		Modelo de colinearidade para pontos	
	$\hat{\sigma}_0 : 0,316$ Nº Iterações: 5		$\hat{\sigma}_0 : 0,974$ Nº Iterações: 5		$\hat{\sigma}_0 : 0,247$ Nº Iterações: 16	
	χ^2 cal: 6,955 χ^2 teo (22;0,975): 36,78		χ^2 cal: 6,822 χ^2 teo (22;0,975): 36,78		χ^2 cal: 1,733 χ^2 teo (7;0,975): 16,01	
	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	-43,65	25,36	-25,74	30,48	-17,33	10,67
Y_0 (m)	-26,85	32,74	-3,55	17,04	-17,46	10,67
Z_0 (m)	-1352,08	892,52	-803,88	785,61	-240,00	210,41
κ_0 (rd)	-0,00376	0,002646	-0,002232	0,001131	-0,000419	0,0002678
a_1 (m)	0,010742	0,006339	0,007319	0,007647	0,008734	0,0065540
a_2 (m)	0,007725	0,008252	-0,001806	0,004268	0,012364	0,0065551
a_3 (m)	0,325740	0,225616	0,241889	0,187891	0,135683	0,1526781
a_4 (rd)	$9,62 \times 10^{-7}$	$6,67 \times 10^{-7}$	$5,65 \times 10^{-7}$	$2,89 \times 10^{-7}$	$4,49 \times 10^{-7}$	$1,94 \times 10^{-7}$

Observando a Tabela 28, pode-se notar que de fato, com uma distribuição de pontos e retas menos favorável, os resultados são bastante afetados. Além de uma maior discrepância, na maioria dos casos, o desvio padrão estimado também foi menor do que o

erro. A projeção das observações nos pontos de verificação, usando os parâmetros estimados foi realizada e é mostrada na Tabela 29.

Tabela 29 - Discrepâncias em 8 pontos de verificação para as três abordagens com número menor de observações e nova distribuição.

Pontos de Verificação	Modelo dos planos equivalentes adaptado		Modelo de coplanaridade para retas		Modelo de colinearidade para pontos	
	\mathcal{E}_v (m)		\mathcal{E}_v (m)		\mathcal{E}_v (m)	
	E	N	E	N	E	N
P1	-71,27	-147,12	-41	-98,3	-1,73	-4,39
P2	23,32	-32,34	15,94	-36,32	17,75	-11,39
P3	149,29	166,28	88,42	88,06	36,25	14,18
P4	-20,08	-15,91	-19,24	-15,63	-8,5	14,36
P5	5,77	6,42	-3,77	2,11	-30,19	-46,96
P6	2,64	-7,01	-0,48	3,65	-42,17	-85,74
P7	-37,51	-37,65	-32,4	-22,85	-54,29	-76,33
P8	-40,84	-68,59	-30,14	-39,76	-62,78	-119,55
Média	1,415	-16,99	-2,83	-14,88	-18,20	-39,47
$\hat{\sigma}_x$	66,98	88,23	41,45	52,54	35,11	50,37
EMQ	67,00	90,08	41,56	54,90	40,14	65,71

Os resultados apresentados na Tabela 29 mostram-se bastante afetados pela nova distribuição, chegando a erros posicionais de até 4,5 pixels (coordenada N calculada com os parâmetros gerados a partir do modelo de planos equivalentes adaptado), além de mostrar os problemas que ocorrem caso não se tenha uma boa distribuição das observações na cena. No caso das retas, a porção inferior da imagem não apresenta nenhuma observação. Além disto, várias retas estão alinhadas entre si, o que implica em correlação entre as observações no caso do modelo dos planos equivalentes adaptado.

O próximo experimento foi realizado com o aumento do número de pontos por reta no modelo de coplanaridade com retas, visto que, até o momento, os testes com este modelo foram feitos usando apenas uma observação da reta (um ponto por reta), estabelecida por um de seus vértices no espaço objeto. Espera-se que com o aumento de redundância das observações, os resultados possam ser melhorados.

- Experimento V: Testes usando 8 parâmetros e 30 retas, com número maior de pontos (espaço imagem) por retas no modelo de coplanaridade para retas.

Este experimento foi realizado de modo a aumentar a redundância das observações (pontos imagem contidos em cada reta) no modelo de coplanaridade com retas, para verificar se em uma configuração com poucas retas e com distribuição desfavorável, essa redundância adicional melhoraria os resultados. Três testes foram feitos usando 30 retas (Figura 56a) com: 2 pontos por reta, 4 pontos por reta e com 8 pontos por reta. Os resultados são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 - Resultados obtidos com o modelo de coplanaridade para retas com dados reais usando maior número de observações por reta.

POE e coef.	Modelo de coplanaridade para retas					
	2 pontos por reta		4 pontos por reta		8 pontos por reta	
	$\hat{\sigma}_0 : 1,004$ N° Iterações: 4		$\hat{\sigma}_0 : 0,946$ N° Iterações: 4		$\hat{\sigma}_0 : 0,939$ N° Iterações: 4	
	χ^2 cal: 22,096 χ^2 teo (52;0,975): 74,27		χ^2 cal: 56,784 χ^2 teo (112;0,975): 143,4		χ^2 cal: 112,74 χ^2 teo (232;0,975): 279,6	
	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	20,09	21,27	13,94	15,23	12,37	10,97
Y_0 (m)	-4,03	11,97	-21,54	8,08	-25,03	5,65
Z_0 (m)	464,78	575,64	371,20	385,76	295,62	270,63
κ_0 (rd)	0,000839	0,000828	0,000673	0,000555	0,000323	0,0003893
a_1 (m)	-0,003649	0,005343	-0,000866	0,003797	$-2,21 \times 10^{-5}$	0,0027249
a_2 (m)	-0,005080	0,003011	-0,001037	0,002033	-0,000414	0,0014249
a_3 (m)	-0,100798	0,138008	-0,052324	0,092445	-0,037095	0,0648904
a_4 (rd)	$-2,59 \times 10^{-7}$	2,1E-07	$-2,17 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-7}$	$-1,25 \times 10^{-7}$	9,9 E-08

É evidente a melhora nos resultados se comparados aos valores estimados com apenas 1 ponto por reta, e mesmo com um número reduzido de retas, com distribuição desfavorável, os resultados foram melhorados.

Para evidenciar a melhora obtida com esses resultados, a projeção das observações usando apenas os parâmetros estimados com 8 pontos por reta foi realizada, visto que foi o melhor resultado apresentado. A Tabela 31 mostra o resultado dessa projeção.

Tabela 31 - Discrepância em 8 pontos de verificação para a abordagem de coplanaridade para retas com 8 pontos por reta.

Pontos de Verificação	Modelo de coplanaridade para retas	
	\mathcal{E}_v (m)	
	X	Y
P1	9,06	34,53
P2	-1,53	7,5
P3	-24,72	8,82
P4	-24,16	7,49
P5	-22,89	14,44
P6	-5,11	30,01
P7	-25,1	-0,5
P8	-10,04	4,19
Média	-13,06	13,31
$\hat{\sigma}_x$	13,06	12,49
EMQ	19,12	18,93

Os erros nas coordenadas E e N foram diminuídos ao nível subpixel com o aumento do número de pontos por reta (Tabela 31), que é uma possibilidade quando não se tem um grande número de dados, quando a geometria dos dados não é favorável, ou quando existem as duas possibilidades juntas, como foi o caso desse experimento. Vale ressaltar, que as conclusões apresentadas valem apenas para o experimento realizado.

Além dessa melhora obtida com o modelo de coplanaridade para retas, o próximo experimento foi realizado com o intuito de verificar se há melhoria nos resultados quando se faz um ajustamento simultâneo entre pontos e retas, através de uma combinação do modelo de planos equivalentes adaptado com o modelo de colinearidade para pontos.

- Experimento VI: Teste com ajustamento simultâneo de pontos e retas com o modelo de colinearidade para pontos e planos equivalentes para retas: 30 retas (boa distribuição) e 15 pontos (com boa e má distribuição).

Neste experimento foi realizado o ajustamento simultâneo de observações de pontos e de pontos sobre retas com o modelo de planos equivalentes adaptado e o modelo

de colinearidade com pontos. Dois testes com o ajustamento simultâneo foram realizados, o primeiro deles usando 30 retas com boa distribuição (Figura 55a) e 15 pontos com boa distribuição (Figura 55b), e o segundo com 30 retas (Figura 55a) e 15 pontos com distribuição desfavorável (Figura 56b), a fim de verificar se com a introdução de pontos a estimação obtida com poucas retas melhoraria.

Os resultados dos referidos testes com os valores dos POE estimados, bem como a projeção das observações usando os parâmetros estimados, são apresentados nas Tabelas 32 e 33.

Tabela 32 - Resultados obtidos com ajustamento simultâneo, usando 30 retas bem distribuídas e 15 pontos bem distribuídos; e 30 retas bem distribuídas e 15 pontos mal distribuídos.

POE e coef.	Modelo combinando-se os modelos de planos equivalentes adaptado e modelo de colinearidade com pontos			
	Teste 1*		Teste 2**	
	$\hat{\sigma}_0 : 0,255$ Nº Iterações: 4		$\hat{\sigma}_0 : 0,255$ Nº Iterações: 5	
	χ^2 cal: 9,451 χ^2 teo (37;0,975): 56,24		χ^2 cal: 9,441 χ^2 teo (37;0,975): 56,24	
X_0 (m)	-3,93	9,23	-5,65	8,90
Y_0 (m)	-7,09	10,04	-6,20	9,16
Z_0 (m)	-356,57	182,09	-342,73	176,83
κ_0 (rd)	$-8,84 \times 10^{-6}$	0,0003034	$5,38 \times 10^{-5}$	0,000277
a_1 (m)	0,0007447	0,0032344	0,0010685	0,003316
a_2 (m)	-0,0013919	0,0034251	-0,001618	0,003474
a_3 (m)	0,1089877	0,0738596	0,1020735	0,074658
a_4 (rd)	$4,54 \times 10^{-8}$	$1,32 \times 10^{-7}$	$5,08 \times 10^{-8}$	$1,33 \times 10^{-7}$

* teste com 30 retas e 15 pontos (ambos com distribuição favorável);

** teste com 30 retas (distribuição favorável) e 15 pontos (distribuição desfavorável);

Tabela 33 - Discrepância em 8 pontos de verificação para abordagem do modelo com ajustamento simultâneo usando 30 retas bem distribuídas e 15 pontos bem distribuídos; e 30 retas bem distribuídas e 15 pontos mal distribuídos.

Pontos de Verificação	Modelo com ajustamento simultâneo			
	Teste 1		Teste 2	
	\mathcal{E}_v (m)		\mathcal{E}_v (m)	
	X	Y	X	Y
P1	-17,33	8,08	-14,37	10,36
P2	5,7	-11,66	7,57	-11,78
P3	29,69	-1,71	30,11	-5,52
P4	-16,28	3,24	-15,64	6,18
P5	-5,73	-5,15	-5,1	-6,81
P6	8,77	0,14	9,38	-3,54
P7	-15,05	-17,41	-14,97	-17,79
P8	-5,00	-24,31	-4,58	-26,73
Média	-1,90	-6,09	-0,95	-6,95
$\hat{\sigma}_x$	16,08	10,94	15,88	12,05
EMQ	16,21	12,73	15,91	14,16

Como pode ser notado nas Tabelas 32 e 33, os resultados mostraram que a combinação de pontos e retas fornece bons resultados. Erros na posição das coordenadas que antes eram de aproximadamente 1,5 pixel com um número menor de retas, passaram para ordem subpixel, mesmo com pontos com distribuição desfavorável.

- Experimento VII: Teste com ajustamento simultâneo de pontos e retas com o modelo de colinearidade para pontos e planos equivalentes para retas: 30 retas e 15 pontos ambos com distribuição desfavorável.

Este experimento foi realizado com a finalidade de verificar se a introdução de retas mesmo com distribuição desfavorável poderia melhorar os resultados obtidos com o modelo de pontos, também com distribuição desfavorável.

Assim, dois testes foram realizados, um deles usando 30 retas mal distribuídas (Figura 56a) e duas configurações de 15 pontos com distribuição desfavorável

(Figura 56b e Figura 57). Os resultados dos parâmetros estimados e a projeção dos 8 pontos de verificação usando os parâmetros estimados são mostrados nas Tabelas 34 e 35.

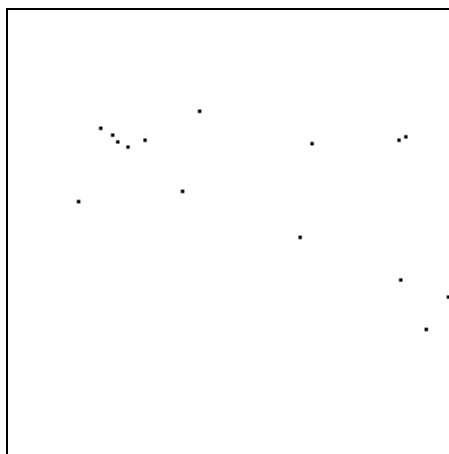


Figura 57 - Imagem da cena CBERS com 15 pontos com nova distribuição.

Tabela 34 - Resultados obtidos com o ajustamento simultâneo usando 30 retas mal distribuídas e duas configurações de 15 pontos com distribuição desfavorável.

POE e coef.	Combinação dos modelos de planos equivalentes adaptado e modelo de colinearidade com pontos			
	Teste 3		Teste 4	
	$\hat{\sigma}_0 : 0,199$		$\hat{\sigma}_0 : 0,187$	
	Nº Iterações: 4		Nº Iterações: 5	
	χ^2 cal: 7,396 χ^2 teo (37;0,975): 56,24		χ^2 cal: 6,948 χ^2 teo (37;0,975): 56,24	
	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	-16,41	16,19	-16,49	13,23
Y_0 (m)	-4,33	24,02	10,21	16,57
Z_0 (m)	-50,942	307,489	-328,95	322,57
κ_0 (rd)	$-4,32 \times 10^{-5}$	0,000680	0,000122	0,000621
a_1 (m)	0,004209	0,004245	0,003958	0,003473
a_2 (m)	-0,002506	0,006083	-0,005746	0,004268
a_3 (m)	0,056970	0,084034	0,120856	0,084119
a_4 (rd)	$8,96 \times 10^{-8}$	$1,84 \times 10^{-7}$	$5,6 \times 10^{-8}$	$1,64 \times 10^{-7}$

Tabela 35 - Discrepância em 8 pontos de verificação para abordagem do modelo com ajustamento simultâneo usando 30 retas mal distribuídas e duas configurações de 15 pontos com distribuição desfavorável.

Pontos de Verificação	Modelo com ajustamento simultâneo			
	Teste 3		Teste 4	
	\mathcal{E}_v (m)		\mathcal{E}_v (m)	
	X	Y	X	Y
P1	13,26	1,29	-2,44	-1,82
P2	20,8	-14,82	17,7	-25,88
P3	23,47	-0,47	37,97	-23,51
P4	-8,88	7,6	-10,49	6,46
P5	-8,11	-5,8	-5,77	-10,99
P6	1,12	-3,46	2,99	-6,27
P7	-21,88	-15,62	-21,09	-12,31
P8	-12,91	-26,7	-13,71	-23,3
Média	0,85	-7,24	0,645	-12,20
$\hat{\sigma}_x$	16,66	11,09	19,05	11,53
EMQ	16,69	13,53	19,07	17,61

Os resultados (Tabelas 34 e 35) evidenciaram que a introdução de retas em uma geometria fraca de pontos pode melhorar significativamente os resultados, visto que de erros de 3,5 pixels foram alcançados erros de 1 pixel aproximadamente. Mesmo quando não existe uma geometria favorável nos dois conjuntos de dados os resultados foram positivos, como no segundo teste ilustrado nas Figuras 56(a) e 57.

- Experimento VIII: Teste com ajustamento simultâneo de pontos e retas com o modelo de colinearidade para pontos e planos equivalentes para retas: 10 retas e 15 pontos (com boa e má distribuição).

Este experimento teve como finalidade verificar se, com um número reduzido de retas, haveria uma melhora nos resultados incluindo-se pontos. Assim, dois testes foram realizados, o primeiro (teste 5) usando 15 pontos bem distribuídos (Figura 55b) e 10

retas bem distribuídas (Figura 58), e o segundo teste (teste 6) foi realizado com 15 pontos com distribuição desfavorável (Figura 55b) e 10 retas bem distribuídas (Figura 58).

Os resultados dos parâmetros estimados, bem como as discrepâncias nos 8 pontos de verificação são apresentados nas Tabelas 36 e 37, respectivamente.

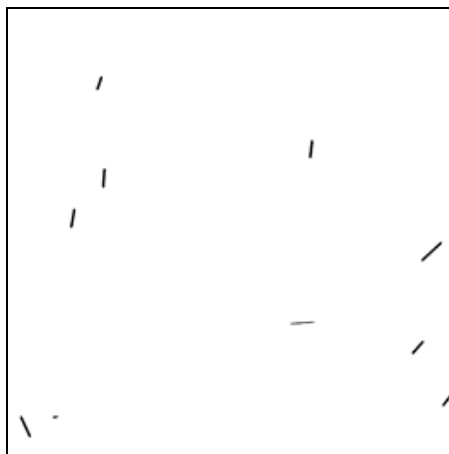


Figura 58 – Imagem da cena CBERS com 10 retas com boa distribuição.

Tabela 36 – Resultados obtidos com o ajustamento simultâneo usando 10 retas bem distribuídas, com 15 pontos bem distribuídos; e 15 pontos mal distribuídos.

POE e coef.	Combinação dos modelos de planos equivalentes adaptado e modelo de colinearidade com pontos			
	Teste 5		Teste 6	
	$\hat{\sigma}_0 : 0,245$		$\hat{\sigma}_0 : 0,239$	
	Nº Iterações: 4		Nº Iterações: 4	
	χ^2 cal: 4,177 χ^2 teo (17;0,975): 30,19		χ^2 cal: 4,072 χ^2 teo (17;0,975): 30,19	
	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v	$\hat{\sigma}_x$
X_0 (m)	-11,73	12,58	-8,92	11,98
Y_0 (m)	-4,06	12,75	-12,95	13,06
Z_0 (m)	-98,50	212,82	-84,73	207,04
κ_0 (rd)	-0,000382	0,000331	-0,0003781	0,0003552
a_1 (m)	0,000885	0,004701	-0,0010709	0,0056058
a_2 (m)	-0,000686	0,005087	0,00568308	0,0082625
a_3 (m)	0,022486	0,096267	-0,0308893	0,1131152
a_4 (rd)	$1,85 \times 10^{-7}$	$1,54 \times 10^{-7}$	$3,25 \times 10^{-7}$	$2,54 \times 10^{-7}$

Analisando os resultados apresentados na Tabela 36, verifica-se que a estimação obtida no teste 6, ou seja, com a distribuição desfavorável dos pontos, foi melhor, porém, exceto no parâmetro Y_0 , os parâmetros a_1 e a_2 são melhor estimados para o caso dos 15 pontos com boa distribuição (teste 5), e o efeito disso pode ser verificado na Tabela 37, onde os erros nas coordenadas E e N do terreno, com o teste 6 apresentam-se piores.

Tabela 37 - Discrepância em 8 pontos de verificação para abordagem do modelo de ajustamento simultâneo usando 10 retas bem distribuídas e duas configurações de 15 pontos, uma com distribuição favorável e outra com desfavorável.

Pontos de Verificação	Modelo com ajustamento simultâneo			
	Teste 5		Teste 6	
	\mathcal{E}_v (m)		\mathcal{E}_v (m)	
	E	N	E	N
P1	3,19	-14,98	1,22	-5,75
P2	16,03	-18,96	13,99	-11,88
P3	26,13	12,42	24,1	15,87
P4	-10,06	1,91	-11,31	8,03
P5	1,96	-12,21	8,03	-33,36
P6	19,75	-14,92	32,07	-57,94
P7	-6,44	-27,54	3,16	-59,49
P8	7,73	-42,91	21,82	-90,83
Média	7,28	-14,64	11,63	-29,41
$\hat{\sigma}_x$	12,65	16,88	14,15	37,46
EMQ	14,86	23,03	18,84	48,91

Analisando as Tabelas 36 e 37, verifica-se que, quando existe uma boa distribuição de pontos, o uso de poucas retas, também com boa distribuição, contribui para a melhora dos resultados, porém quando a distribuição de pontos não é favorável, a pequena quantidade de retas melhora, mas em menor proporção, os resultados obtidos.

Como foi observado, o uso de um número reduzido de retas em conjunto com pontos melhorou os resultados, no entanto, essas retas necessitam ter orientações que não sejam similares, ou seja, não devem possuir a mesma orientação, como por exemplo, somente retas horizontais ou verticais.

Vale ressaltar que grande parte das retas usadas nos experimentos possuía tamanhos pequenos, o que na prática é de muita importância, visto que não é necessário usar apenas retas com grandes extensões.

Como no caso dos experimentos realizados com dados simulados, para os experimentos com dados reais, a hipótese básica do teste estatístico com a distribuição qui-quadrado χ^2 não foi rejeitada ao nível de significância de 5%.

Para os testes realizados ficou evidenciado que os resultados podem ser melhorados com o aumento de pontos por reta, no modelo de coplanaridade para retas e também com a combinação de retas e pontos, combinando os modelos de planos equivalentes adaptado e colinearidade com pontos.

De modo geral, os resultados mostraram que as abordagens propostas fornecem resultados satisfatórios e podem ser usadas para recuperar os POE da imagem e realizar a correção geométrica da imagem.

CAPÍTULO V

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

O processo de correção geométrica de imagens orbitais com auxílio de dados de campo, pode ser feito com modelos rigorosos, baseados na realidade física do processo de aquisição, o que permite gerar imagens corrigidas com a exatidão geométrica adequada à várias aplicações.

Neste trabalho, dois modelos físicos que usam linhas retas foram desenvolvidos e testados, usando para tanto, as imagens CBERS disponibilizadas gratuitamente, com correção geométrica aproximada e dados de controle coletados em campo com GPS. Os resultados obtidos com os experimentos realizados mostraram que os modelos propostos podem ser usados para realizar a correção geométrica dessas imagens.

Além disso, com a previsão de lançamento do novo satélite CBERS, imagens com melhores resoluções estarão disponíveis gratuitamente aos usuários. Com o aumento da resolução espacial, modelos mais complexos como os rigorosos, que levam em consideração a variação do relevo, devem ser usados a fim de obter imagens com melhor exatidão geométrica.

Quanto à obtenção das observações no espaço imagem, uma estratégia de extração semi-automática foi desenvolvida, com a implementação de algumas funções, sendo a principal delas a transformada de Hough para retas, a qual apresentou resultados satisfatórios para a detecção das retas, que foram refinados por um programa de ajuste de retas subpixel.

A ocorrência de bons resultados com o processo de extração, relacionada à transformada de Hough, deve-se ao uso da orientação aproximada das retas e da janela que compreende cada reta, diminuindo consideravelmente a busca no espaço de parâmetros.

É importante ressaltar que o pré-processamento realizado na imagem bruta foi um fator importante para a obtenção de bons resultados, tanto para a função de limiarização contida na transformada de Hough como no programa de ajuste subpixel, visto que melhorou o contraste dessa imagem.

A obtenção dos eixos das rodovias presentes nas imagens CBERS, usando o sistema GPS, foi essencial para o processo de recuperação dos POE da cena. Além disso, com o uso de coordenadas plani-altimétricas precisas coletadas em campo, são evitados erros grosseiros e imprecisão altimétrica, que ocorrem quando se utilizam dados extraídos de cartas. O uso de cartas para a extração dessas informações em escala compatível com o apoio (neste caso, escala 1:10.000) seria outra possibilidade, mas sabe-se que estas informações são raras no Brasil.

Para relacionar o espaço imagem e objeto, os modelos de orientação de imagens *pushbroom* usando feições retas foram implementados e analisados de acordo com a coerência na determinação dos parâmetros, usando dados simulados e posteriormente dados reais, além de uma comparação de resultados desses modelos com o modelo usando pontos de controle. Além da comparação entre os modelos, foram feitos testes em pontos de verificação independentes, para verificar a exatidão dos parâmetros determinados.

Nesse sentido, considerando os resultados apresentados, pôde-se verificar que os modelos propostos recuperam os coeficientes polinomiais satisfatoriamente, e podem ser usados para a correção de imagens *pushbroom*.

Com base nos resultados obtidos, dos modelos propostos usando retas, o modelo de coplanaridade para retas apresentou-se mais eficaz. Porém, os resultados obtidos com o modelo de planos equivalentes adaptado podem ter sido influenciados pela imprecisão do cálculo das correções (da e db) com relação ao deslocamento de perspectiva.

O modelo de colinearidade modificado usando pontos de apoio apresentou bons resultados, comparados aos modelos usando retas.

Outro aspecto importante investigado foi com relação à ordem do polinômio usado para descrever a variação dos parâmetros de orientação exterior quanto à trajetória da plataforma na tomada da cena. Tanto para a determinação dos POE usando dados simulados, como dados reais, o modelo linear mostrou-se mais adequado.

Os resultados também mostraram que, como no caso de pontos, quando a distribuição de retas não é favorável os resultados também são afetados. No entanto, feições retas são mais fáceis de localizar em imagem orbitais, devido às construções antrópicas, limites de propriedades e, principalmente, rodovias.

A quantidade de observações usadas no ajustamento também afeta os resultados, tanto para pontos como para retas, e da mesma forma que no caso da distribuição, retas fornecem maior redundância de informação.

No caso do modelo de coplanaridade para retas verificou-se que melhores resultados podem ser obtidos com este modelo, aumentando-se o número de pontos por reta. Mesmo quando o número de retas é pequeno ou a sua distribuição não é favorável, os resultados podem ser ainda melhores com este aumento na redundância das observações.

No entanto, para verificar até que ponto o aumento na redundância das observações pode melhorar os resultados, mais testes deveriam ser realizados, a fim de verificar a estabilização dessa melhora.

Já para o modelo de planos equivalentes adaptado verificou-se que seu uso em conjunto com o modelo de colinearidade com pontos também melhora significativamente os resultados. Os experimentos mostraram que esta combinação, melhora os resultados quando há pouca informação para pontos ou retas, quando a distribuição não é favorável, ou até mesmo quando há pouca informação para ambos os casos. Com base nos experimentos realizados, pode-se então afirmar que com a combinação de ambos os modelos, de retas e de pontos, houve uma melhoria nos resultados, principalmente por se levar em conta às vantagens de cada modelo, como por exemplo, a rigidez de pontos e a redundância fornecida por retas. Além disso, existem diversas vantagens no uso de feições retas, como a não necessidade de correspondência ponto a ponto e a possibilidade de extração de linhas retas com precisão subpixel.

De modo geral, os resultados foram bastante satisfatórios e mesmo aqueles que não foram apresentados, serviram de apoio para as análises. Além disso, foi verificado o potencial dos modelos rigorosos adaptados à geometria *pushbroom* usando feições retas.

Conclui-se, a partir dos resultados e análises apresentados, e do desempenho das funções usadas para a extração das coordenadas imagem, que os modelos propostos, usados para recuperar os parâmetros de orientação, e uma possível correção geométrica de imagens orbitais, são satisfatórios e que os objetivos foram alcançados.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

A fim de ampliar os estudos com a metodologia proposta, algumas recomendações são feitas para trabalhos futuros, relacionadas ao processo de obtenção das observações e desenvolvimento dos modelos de orientação.

Na etapa de realce das feições, sugere-se que outras funções de pré-processamento possam ser usadas na imagem bruta, a fim de separar as informações de interesse do restante da cena, como por exemplo, uma função de realce de linhas, uma técnica de classificação multiespectral das feições de interesse, entre outras.

Dispondo de uma imagem com menos detalhes, o intervalo dos limiares, utilizados no processo de limiarização da transformada de Hough, pode ser definido a partir do histograma dessa imagem, com melhor precisão.

Como a proposta central deste trabalho não era a extração de linhas, recomenda-se para trabalhos futuros estudar outras estratégias mais elaboradas de extração de feições, que poderão proporcionar melhores resultados.

Com relação à etapa de correspondência recomenda-se que outros métodos sejam avaliados, como a correspondência relacional. Com a etapa de correspondência automática o processo de correção geométrica passa a ser, então automático, como previsto inicialmente neste trabalho.

Já para a etapa de desenvolvimento dos modelos de orientação, recomenda-se que seja estabelecida uma solução mais adequada para a correção dos parâmetros angular e linear (da e db) no modelo de planos equivalentes adaptado, incorporando-se, por exemplo, uma nova matriz de rotação no modelo.

Além disso, devem ser realizados estudos mais detalhados com relação a alguns aspectos:

- Determinar um número e distribuição ideal de pontos por reta, no modelo de coplanaridade para retas;
- Determinar o número e a configuração mínima de retas usadas nos modelos de orientação, e;
- Determinar uma combinação ótima do uso de retas com pontos.

Por fim, recomenda-se estudar o uso de um modelo de órbita baseado em efemérides, como parte dos modelos rigorosos de orientação, a fim de minimizar o número de observações de controle.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-AZIZ, Y. I.; KARARA, H. M. **Direct Linear Transform From Comparator Coordinates Into Object Space Coordinates**, In: Close-Range Photogrammetry, 1971, Illinois. **Proceedings...**, Illinois: ASP/UISymposium of Close-Range Photogrammetry, 1971. p. 1-18.

ABIDIN, H. Z.; WELLS, D. E. Extra-wide-laning for '*on the fly*' ambiguity resolution: simulation of ionospheric effects. In: Second International Symposium on Precise Positioning with the GPS, 1990, Ottawa. **Proceedings ...**, Ottawa, 1990. p.1217-1232.

AGOURIS, P.; SCHENK, T. Multiple Image Matching. In: ISPRS, 1992, Washington. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Washington: ISPRS, 1992. p. 802-807.

AMINI, J. A. Proposed Model for Segmentation of Spot Images. In: ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. **Geo-imagery bridging continents**, Istanbul: ISPRS, 2004. p. 82-85.

ARTERO, A. O. **Técnicas para a extração automática de feições retas em imagens digitais**. 1999. 117f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e tecnologia, Universidade Estadual Paulista, FCT, Presidente Prudente.

ARTERO, A. O.; TOMMASELLI, A. M. G. Limiarização Automática de Imagens Digitais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 6, n. 1, p. 38-48, 2000.

ARTERO, A. O.; TOMMASELLI, A. M. G. Um método para a conexão e aproximação poligonal de elementos de bordas em imagens digitais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 8, p. 71-94, 2002.

BALLARD, D.; BROWN, C. **Computer Vision**. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1982.

BANG, K. I.; CHO, W. Analysis of EOC Sensor Model. In: FIG WORKING WEEK, 2001, Seoul, Korea. **New Technology for a New Century**, Seoul, 2001. p. 57-65.

BARAKAT, H. F.; EMAM, H. A.; ABDEL-WAHAB, M. S. Assessment of a Developed Combined Point/Line-Based Projective Equations. In: ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. **Geo-imagery bridging continents**, Istanbul: ISPRS, 2004. p. 184-190.

BAZAN, W. S. TOMMASELLI, A. M. G., GALO, M. Extração de feições retas e métodos de refinamento com precisão subpixel. In: Congresso de Iniciação Científica da Unesp, 2005, Presidente Prudente. **Anais do CIC-Unesp**, Presidente Prudente: Universidade Estadual Paulista, 2005.

BLANFORD, R. P. Dynamically Quantized Pyramids for Hough Vote Collection. **IEEE Workshop on CAPAMI**, p. 145-152, 1987.

BOCCARDO, P.; MONDINO, E. B.; TONOLO, F. G.; LÍNGUA, A. Orthorectification of High Resolution Satellite Images. In: ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. **Geo-imagery bridging continents**, Istanbul: ISPRS, 2004. p. 30-36.

BREUER, M; ALBERTZ, J. Geometric Correction of Airborne Whiskbroom Scanner Imagery using Hybrid Auxiliary Data. In: ISPRS, 33., 2000, Amsterdam. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam: ISPRS, 2000.

BÜYÜKSALIH, G.; ORUC, M.; JACOBSEN, K. Precise Georeferencing of Rectified High Resolution Space Images. In: ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. **Geo-imagery bridging continents**, Istanbul: ISPRS, 2004. p. 184-189.

CHEN, L. C.; LEE, L. H. Rigorous generation of digital orthophotos from SPOT images. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 59, n.5, p. 655-661, 1993.

CHO, W.; SCHENK, T.; MADANI, M. Resampling digital imagery to epipolar geometry. In: ISPRS, 1992, Washington. **Proceedings...**, Washington: ISPRS, 1992.

CINTRA, J. P.; VIADANA, M. I. F. Metodologia de baixo custo para atualização de cartas utilizando imagens orbitais. In: III Conferência Nacional de Geografia e Cartografia, 1996, Rio de Janeiro. **Anais...**, Rio de Janeiro: IBGE, 1996, v. 9. p. 85-90.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R.; DELARA, R.; BÄHR, H. P. O uso de feições retas extraídas do MDT gerado pelo sistema de varredura laser como apoio para o cálculo da resseção espacial de imagens digitais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 11, n. 1, p.117-140, 2005.

D'ALGE, J. C. L. **Atualização Cartográfica por Imagens de Satélite**: notas de aula dadas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 1999. 18 p.

DAL POZ, A. P. **Correlação Estrutural Aplicada à Extração Automática de Apoio de Campo em Imagens Digitais**, 1996. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo-USP, São Paulo.

DAL POZ, A. P.; SCALCO, J. C. Orientação semi-automática de imagens CBERS usando rodovias como controle de campo. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 12, n. 2, p. 295-313, 2006.

DOYLE, W. Operation Useful for Similarity-Invariant Pattern Recognition. **Journal Association Computer Machine**, v.9, p. 259-267, 1962.

DUDA, R.; HART, P. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures, **Communications of the ACM**, v. 15, p.1, p. 11-15, 1972.

DOWMAN, I.; TAO V. An Update on the Use of Rational Functions for Photogrammetric Restitution. **ISPRS Highlights**, p. 22-29, 2002.

DOWMAN, I. J.; MICHALIS, P. Generic rigorous model for along track stereo satellite sensors. In: ISPRS, 2003, Hannover. **Workshop High Resolution Mapping from Space**, Hannover: ISPRS, 2003.

ESPINDOLA, G. M.; GABOARDI, C.; VERGARA, O. R. Avaliação das Características Temáticas e Geométricas das Imagens CCD do CBERS para Fins Cartográficos. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. 11, p. 1, 2004.

FRITSCH D. Experiences with the Airborne Three-line Photogrammetric Image Acquisition System DPA. In: D. Fritsch, D. Hobbie (Eds.), **Photogrammetric Week '97**, Wichmann Verlag, Heidelberg, 1997. p. 63-74.

FRITSCH, D.; STALLMANN, D. Rigorous photogrammetric modelling processing of high-resolution satellite imagery. In: ISPRS, 33. 2000, Amsterdam. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam: ISPRS, 2000. p.313-321.

GALO, M.; TOZZI, C. L., Extração de pontos com acurácia subpixel em imagens digitais. **Séries em Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 2. p. 289-313, 2002.

GATO, H. E. R.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G. Uma abordagem semi-automática para extração de feições cartográficas. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 53, 2001.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações**: aplicações geodésicas. Curitiba, Universidade Federal do Paraná-UFPR, 1994.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. Editora Edgard Blücher Ltda, 2000.

GRÜN, A. Least square matching: a fundamental measurement algorithm. In: ATKINSON, K, London. **Close Range Photogrammetry & Machine Vision**. London: Whittles Publishing, 1996. p. 217-255.

GUGAN, D. J. Practical Aspects of Topographic Mapping from SPOT Imagery. **Photogrammetric Record**, v. 12, n. 69, p. 349-355, 1987.

GUGAN, D. J.; DOWMAN, I. J. Accuracy and completeness of topographic mapping from SPOT imagery. **Photogrammetric Record**, v. 12, n. 72, p. 787-796, 1988.

GUPTA, R.; HARTLEY, R. I. Linear Pushbroom Cameras. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 19, n. 9, p. 963-975, 1997.

HABIB, A.; ASMAMAW, A.; KELLEY, D.; MAY, M. Linear Features in Photogrammetry. Report No. 450, **Department of Civil and Environmental Engineering and geodetic Science**, The Ohio State University, Columbus, 2000.

HABIB, A.; KELLEY, D. Single Photo Resection Using the Modified Hough Transform. **Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 67, n. 8, p. 909-914, 2001.

HABIB, A.; MORGAN, M.; KIM, E. M.; CHENG, R. Linear Features in Photogrammetric Activities. In: ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. **Geo-imagery bridging continents**, Istanbul: ISPRS, 2004. p. 170-176.

HABIB, A.; GHANMA, M.; MITISHITA, E. A. Co-registration of photogrammetric and LIDAR data: Methodology and case study. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 56, n. 1, p. 1-13, 2004.

HANLEY, H. B.; FRASER, C. S. Geopositioning accuracy of Ikonos imagery: indications from 2D transformations. **Photogrammetric Record**, v. 17, n. 98, p. 317-329, 2001.

HANSEN, K.; ANDERSEN, J. D. Understanding the Hough transform: Hough cell support and its utilization. **Journal IVC - Image and Vision Computing**, v. 15, p. 205-218, 1997.

HATTORI, S.; ONO, T.; FRASER, C. S.; HASEGAWA, H. Orientation of high-resolution satellite images based on affine projection. In: ISPRS, 2000, Amsterdam. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam: ISPRS, 2000. p. 359-366.

HEIKKINEN, J. Linear feature based approach to map revision. In: ISPRS, 1994, Athens, Georgia. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Athens: ISPRS, 1994. p. 344–351.

HEIKKINEN, J. **Feature based photogrammetry**. Erikoistyö, TKK, 2002.

HEIPKE, C. Overview of image matching techniques. In: OEEPE - Workshop on the application of digital photogrammetric workstations, 1996, Lausanne, Switzerland. **Proceedings ...**, Lausanne, 1996.

ILLINGWORTH, J.; KITTLER, J. A Survey of the Hough Transform. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v. 44, n.1, p. 87-116, 1988.

INPE. **Satélite CBERS**. Disponível em <http://www.cbbers.inpe.br/pt/index_pt.htm> Acesso em: 15 de maio de 2007.

JACOBSEN, K. Orientation of High Resolution Optical Space Images. In: The ASPRS Annual Conference 2007: Identifying Geospatial Solutions, Tampa, Florida. **Proceddings...**, Tampa, 2007.

KIM, T.; DOWMAN, I. Comparison of two physical sensor models for satellite images: Position-Rotation model and Orbit-Attitude model. **The Photogrammetric Record**, v. 21, n. 114, p. 110–123, 2006.

KIM, J. A.; JEUN, G. H. Analysis of the geo-location accuracy of KOMPSAT-1 EOC image data. **Journal of Korea Aerospace Research Institute**, v.1, n. 2, p. 141–148, 2002.

KONECNY, G.; LOHMANN, P.; ENGEL, H.; KRUCK, E. Evaluation of SPOT imagery on analytical photogrammetric instruments. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 53, n. 9, p. 1223–1230, 1987.

KRATKY, V. Rigorous photogrammetric Proessing of SPOT Images at CCM Canada. **ISPRS Journal of Photogrametry and Remote Sensing**, p. 53-71, n. 44, 1989.

KUBIK, K. Relative and absolute orientation based on linear features. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 46, n. 4, p. 199-204, 1991.

LEE, Y.; HABIB, A. Pose Estimation of Line Cameras using Linear Features. In: ISPRS, 2002, Graz, Austria. **Symposium on Photogrammetric Computer Vision**, Graz: ISPRS, 2002.

LEE, C.; BETHEL, J. S. Extraction, Modeling, and Use of Linear Features for Restitution of Airborne Hyperspectral Imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 58, p. 289-300, 2004.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 2ed. John Wiley & Sons, 1987. 721p.

LIU, Y.; HUANG, T. S.; FAUGERAS O. D. Determination of camera location from 2D to 3D line and point correspondences. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 12, n. 1, p. 28-37, 1990.

LUGNANI, J. B. **Using Digital Entities as Control**. 1980. Ph. D. Thesis - Department of Surveying Engineering, The University of New Brunswick (UNB), Canada.

MARANHÃO, M. R.; RAIVEL A. J. P. C. Análise de pares estereoscópicos obtidos pelo CBERS II – Primeiros testes utilizando fotogrametria digital. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. **Anais...**, São José dos Campos, SP: INPE, 2005. p. 999-1004.

MASRY, S. E. Digital Mapping Using Entities: A New Concept. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 47, n. 11, p.1561-1565, 1981.

MICHALIS, P.; DOWMAN, I. A Rigorous Model and DEM Generation for SPOT5-HRS. In: ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences series**, Istanbul: ISPRS, 2004. p. 410-415.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. New York: John Wiley & Sons, 2001. 479p.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2000. 287p.

MULAWA, D. C.; MIKHAIL, E. M. Photogrammetric treatment of linear features. In: ISPRS, 1988, Kyoto. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Kyoto: ISPRS, 1988. p. 383- 393.

NIXON, M.; AGUADO, A. **Feature Extraction & Image Processing**. British Library, 2002.

O'Neil M.; Dowman I. A new camera model for the orientation of the SPOT data and its application to the OEEPE test of triangulation of SPOT data. **OEEPE Publication**, v. 26, p. 153-163, 1991.

ORUN, A. B.; NATARAJAN, K. A Modified Bundle Adjustment Software for SPOT Imagery and Photography: Tradeoff. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, p. 1431-1437, 1994.

OTSU, N. A threshold selection method from gray level histograms. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v.9, p.62–66, 1979.

PARKER, J. R. **Algorithms for Image Processing and Computer Vision**. New York: John Wiley & Sons, 1997. 417p.

POLI, D. Orientation of Satellite and Airborne Imagery from Multi-Line Pushbroom Sensors with a Rigorous Sensor Model. In: ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. **Geo-imagery bridging continents**, Istanbul: ISPRS, 2004. p. 130-136.

RADHADEVI, P. V.; RAMACHANDRAN, R. Orbit attitude modelling of spot imagery with a single ground control point. **The Photogrammetric Record**, v. 14, n. 84, p. 973, Oct. 1994.

RADHADEVI, P. V.; RAMACHANDRAN, R.; MURALIMOHAN, A. S. R. K. V. Restitution of IRS-1C PAN data using an orbit attitude model and minimum control. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 53, n.5, p. 262–271, 1998.

RANGARAJAN, A.; COUGHLAN, J.; YUILLE, A. L. A Bayesian network framework for relational shape matching. In: The Ninth International Conference on Computer Vision (ICCV '03), 2003, France. **Proceedings...**, France, 2003, p. 671- 678.

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993. 340 p.

ROTH, G.; LEVINE, M. D. Extracting geometric primitives. **CVGIP: Image Understanding**, v. 58, n.1, p.1-22, 1993.

SADEGHIAN, S.; DELAVAR, M. R. An investigation of geometric correction and uncertainty assessment of high resolution images. In: Second International Symposium on Spatial Data Quality, 2003, Hong Kong. **Proceedings...**, Hong Kong, 2003. p. 89-99.

SALAMONOWICZ, P. H. Satellite orientation and position for geometric correction of scanner imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 52, n. 4, p. 491-499, 1986.

SCHENK, T. **Digital Photogrammetry**. The Ohio State University: TerraScience, 1999. v.1.

SEEBER G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications**. Berlin, New York, Walter de Gruyter, 2003.

SEEBER, G.; WUBBENA, G. Kinematic positioning with carrier phases and “on the way” ambiguity solution. In: International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, 5. 1989, Las Cruces. **Proceedings...**, 1989, Las Cruces, 1989, p. 606 -609.

SHAPIRO, L. G.; HARALICK, R. M. Relational Matching. **Applied Optics**, v.26, p. 1845-1851, 1987.

SONKA, M.; HLAVAC, V.; BOYLE, R. **Image processing, Analysis and Machine Vision**. Library of Congress Cataloging, 1998.

TAO, C. V.; HU, Y. 3D Reconstruction methods based on the rational function model. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 68, n. 7, p. 705-714, 2002.

TELLES, S. S. S. **Um Modelo para Calibração de Câmaras Digitais Baseado em Linhas Retas**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual do Estado de São Paulo-UNESP, Presidente Prudente.

TELLES, S.; TOMMASELLI, A. M. G. Um Modelo Matemático para Calibração de Câmaras Baseado em Linhas Retas. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 57, n. 3, p. 1-9, 2005.

TOMMASELLI, A. M. G.; TOZZI, C. L. A Recursive Approach to Space Resection Using Straight Lines. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 62, p. 57-56, 1996.

TOMMASELLI, A. M. G. **Um Modelo Alternativo à Equação de Colinearidade utilizando Feições Retas**. 1988. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

TOMMASELLI, A. M. G. **Um Método Recursivo Aplicado ao Problema de Localização em Visão de Máquina**. 1993. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

TOMMASELLI, A. M. G.; LUGNANI, J.B. An alternative mathematical model to the collinearity equation using straight features. In: ISPRS, 1988, Kyoto. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Kyoto: ISPRS, 1988. p. 765-774.

TOMMASELLI, A. M. G. Modelo Matemático para Orientação de Imagens usando Linhas Retas. In: III Fórum de Ciências da FCT-unesp, 1999, Presidente Prudente. **Anais....**, Presidente Prudente: FCT-Unesp, 1999.

TONOLO, G. F.; POLI, D. Georeferencing of EROS-A1 high resolution images with rigorous and rational function model. In: ISPRS, 2003, Hannover. Workshop "High resolution mapping from space", Hannover: ISPRS, 2003.

TOUTIN, T. DTM Generation from IKONOS In-track Stereo Images using 3D physical model. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 70, n. 6, p.695-702, 2004.

VALADAN, Z. M. J.; SADEGHIAN, S. Rigorous and Non-Rigorous Photogrammetric Processing of Ikonos Geo Image. In: ISPRS, 2003, Hannover. **High Resolution Mapping from Space**, Hannover: ISPRS, 2003.

WANG, S.; TSENG, Y. H. Image Orientation by Fitting Line Segments to Edge Pixels. In: The 23rd Asian Conference on Remote Sensing, 2002, Tainan. **Proceedings...**, Tainan, 2002.

WILLIAMS, M. L.; WILSON, R. C.; HANCOCK, E. R. Deterministic Search For Relational Graph Matching. **Pattern Recognition**. v.32, p. 1255-1271, 1999.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry: With Applications in GIS**. 3ed. U.S.A: McGraw-Hill Book Company, 2000. 607p.

WESTIN, T. Precision rectification of SPOT imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 56, n. 2, p. 247-253, 1990.

YAMAKAWA, T.; FRASER, C. S. The Affine Projection Model for Sensor Orientation: Experiences with High-Resolution Satellite Imagery. In: ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. **Geo-imagery bridging continents**, Istanbul: ISPRS, 2004. p. 142-148.

YANG, X. Accuracy of rational function approximation in Photogrammetry. In: **American Society for photogrammetry and Remote Sensing**, 2000, Washington. **Proceedings...**, Washington, 2000.

ZANARDI, R. P.; ROLIM, S. B. A.; ALMEIDA, C. A. M.; BIELENKI JR. C. Análise de Processamento e Georreferenciamento em Imagens do Satélite CBERS-1. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005**, Goiânia. **Anais...**, São José dos Campos, SP: INPE, 2005. p. 1149-1156.