



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

ÉRICO FERNANDO DE OLIVEIRA MARTINS

**Extração Semi-Automática de Rodovias no
Espaço-Objeto: Uso Integrado de um Estéreo
Par de Imagens Aéreas e um MDT**

Presidente Prudente

2010



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

ÉRICO FERNANDO DE OLIVEIRA MARTINS

**Extração Semi-Automática de Rodovias no
Espaço-Objeto: Uso Integrado de um Estéreo
Par de Imagens Aéreas e um MDT**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz

Presidente Prudente

2010

336e Martins, Érico Fernando de Oliveira.
Extração semi-automática de rodovias no espaço-objeto : uso
integrado de um estéreo par de imagens aéreas e um MDT / Érico
Fernando de Oliveira Martins. - Presidente Prudente : [s.n], 2010
97 f. : il

Orientador: Aluir Porfírio Dal Poz
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

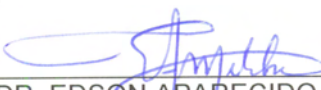
1. Imagens aéreas. 2. Extração de feição. 3. Extração de
rodovia. 4. Modelo de rodovia. 5. Programação dinâmica. I. Martins,
Érico Fernando de Oliveira. II. Universidade Estadual Paulista.
Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

CDD 623.72

BANCA EXAMINADORA



PROF. DR. ALUIR PORFÍRIO DAL POZ
(ORIENTADOR)



PROF. DR. EDSON APARECIDO MITISHITA
(UFPR)



PROF. DR. MAURICIO GALO
(UNESP/FCT)



ÉRICO FERNANDO DE OLIVEIRA MARTINS

PRESIDENTE PRUDENTE (SP), 09 DE DEZEMBRO DE 2010

RESULTADO: Aprovado

DADOS CURRICULARES

Érico Fernando de Oliveira Martins

Nascimento: 15/10/1978

Filiação: José Afonso Martins Guazi.
Marlene de Oliveira Martins.

1997-2002 Curso de Graduação
Licenciatura Plena em Matemática
Universidade do Estado de Mato Grosso

2008-2010 Curso de Pós-Graduação
Mestrado em Ciências Cartográficas
Linha de Pesquisa: Computação de Imagens
Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP

DEDICATÓRIA

*À minha esposa Simone Pysklevitz,
meu irmão Ariel Fernando e meus estimados pais,
José Afonso e Marlene.*

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a todos que em algum momento colaboraram com esta pesquisa, em particular:

À minha esposa Simone, pelo amor, compreensão e incentivo durante todo o processo, inclusive nos períodos em que estivemos distantes.

Ao meu irmão Ariel e sua família, por me acolher com tanto carinho.

Aos meus pais José Afonso e Marlene, pelo apoio incondicional.

Ao professor orientador Aluir Porfírio Dal Poz, por confiar em meu trabalho, direcionar minhas ações e servir de exemplo profissional.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas: Amilton Amorim, Antonio Maria Garcia Tommaselli, Erivaldo Antonio da Silva, João Carlos Chaves, João Francisco Galera Monico, João Fernando Custódio da Silva, Julio Hasegawa, Maria de Lourdes, Maurício Galo, Messias Meneguette Junior, Milton Shimabukuro, Mônica Decanini, Nilton Imai e Vilma Tachibana por dividirem seu conhecimento e experiência.

Aos amigos conquistados na sala de permanência: Yuri, Puga, João Paulo, Fazan, Guilherme, Cris, Marcelo Gaúcho, Eduardo, Fabinho, Tati, Lauri, Tiedtke, Letícia, Adilson, Luiz Henrique (do Espaço Fama) e muitos outros que foram minha família em Prudente e jamais serão esquecidos.

Aos amigos Rodrigo Gallis, Roberto Ruy, Juliano Fazan e Fábio Feliciano, pelas importantes colaborações, dicas e discussões realizadas durante o desenvolvimento da pesquisa. Vocês foram de fundamental importância.

Aos professores e hoje colegas de trabalho Rodrigo Bruno Zanin e Wilson Santana Cunha, por sempre terem acreditado que isto seria possível.

Aos funcionários da Seção de Pós-Graduação: Marcia, Ivonete, André, Erynate e Cinthia, pelo atendimento sempre solícito.

À Unesp, por ofertar o Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas de forma pública, gratuita e com excelência reconhecida.

À Universidade do Estado de Mato Grosso, em especial aos colegas dos Departamentos de Administração, Contabilidade e Matemática, por viabilizarem esta conquista.

RESUMO

Nesta pesquisa é proposta uma metodologia semi-automática para extração de rodovias a partir de um estéreo par de imagens aéreas de baixa resolução e do respectivo Modelo Digital de Terreno, tendo por base a otimização por programação dinâmica no espaço-objeto. A metodologia consiste em um processo iterativo iniciado com pontos sementes fornecidos pelo operador no espaço-imagem, que após transformação para o espaço-objeto passam por ciclos de otimização via Programação Dinâmica até descreverem o eixo da rodovia. O desempenho da metodologia foi testado por meio de experimentos com dados reais, cujos resultados foram avaliados tanto na forma visual (qualitativamente) como numérica (quantitativamente). Os resultados alcançados nos experimentos demonstraram a robustez da metodologia diante de problemas de caráter geométrico e radiométrico comuns na extração semi-automática de rodovias a partir de imagens aéreas. Problemas de oclusão e baixa resposta radiométrica foram minimizados pelo uso de injunções globais, de natureza geométrica, bem como pela redundância e complementação de dados radiométricos provenientes das imagens que compõem o estéreo par. As linhas de busca multiresolução e os critérios de parada das iterações se mostraram como sendo importantes recursos na tentativa de conciliar extração de qualidade com baixo esforço computacional.

Palavras-chave: Programação dinâmica; modelo de rodovia; extração de feição; extração de rodovia; imagens aéreas.

ABSTRACT

This research proposes a semi-automatic methodology for road extraction by using a stereo pair of aerial images with low resolution, as well as Digital Terrain Model and dynamic programming in object-space. The methodology consists of an interactive process that starts with seed points provided by the operator in the space-image, which are later projected onto the space-object. Next, cycles of optimization are accomplished by the dynamic programming algorithm until the axis of the highway is correctly described. The performance of the methodology was tested with experiments by using real data, and results were evaluated both visually and numerically. The results achieved in the experiments have demonstrated the robustness of the methodology in face of geometrical and radiometric problems which are common in road extraction. Occlusions and low radiometric responses were minimized by the use of global geometric constraints, as well as the redundancy and complementation of radiometric data from the images that build the stereo pair. The line of multi-resolution search and stopping criteria of the interactions have showed themselves that they have been an important resort in the attempt to reconcile the extraction of high quality with low consumption of computational resources.

Keywords: Dynamic programming; road model; feature extraction; road extraction; aerial images.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação do espaço-imagem. Fonte: Andrade (1998).	18
Figura 2: Sistema de coordenadas fiducial. Fonte: Wolf e Dewitt (2000).	19
Figura 3: Sistema de coordenadas da imagem.	20
Figura 4: Definição do sistema intermediário em uma imagem digital. Fonte: Galo (2003).	20
Figura 5: Sistema fotogramétrico do positivo fotográfico. Fonte: Lugnani (1987).	22
Figura 6: Sistema fotogramétrico do negativo. Fonte: Lugnani (1987).	22
Figura 7: Representação gráfica da distorção radial simétrica. Fonte: Andrade (1998).	26
Figura 8: Distorção radial e as correções em x e y. Fonte: adaptado de Wolf e Dewitt (2000).	26
Figura 9: Componentes da distorção descentrada. Fonte: Andrade (1998).	27
Figura 10: Refração atmosférica em fotografia aérea. Fonte: Wolf e Dewitt (2000).	29
Figura 11: Efeito da curvatura da superfície terrestre. Fonte: Mikhail et al. (2001).	31
Figura 12: Ilustração das três superfícies de referência. Fonte: Wolf e Dewitt (2000).	32
Figura 13: Coordenadas geodésicas. Fonte: Wolf e Dewitt (2000).	33
Figura 14: Relação entre sistema geodésico e geodésico cartesiano. Fonte: Wolf e Dewitt (2000).	33
Figura 15: Sistema cartesiano local e sua relação com o geocêntrico e o geodésico. Fonte: Wolf e Dewitt (2000).	34
Figura 16: Cilindro secante da Projeção UTM. Fonte: http://commons.wikimedia.org .	35
Figura 17: Condição de colinearidade. Fonte: Wolf e Dewitt (2000).	42
Figura 18: Problema clássico de programação dinâmica. Fonte: Li (1997).	45
Figura 19: extração da rodovia no espaço-objeto. Fonte: Gallis (2006).	50
Figura 20: Diagrama de Voronoi e Triangulação de Delaunay. Fonte: Li et al. (2004).	56
Figura 21: Níveis de continuidade na união de duas curvas. Fonte: Azevedo e Conci (2003).	57
Figura 22: A função B-Spline não passa pelos pontos de controle. Fonte: Azevedo e Conci (2003).	58
Figura 23: Reconstrução por estéreo par e MDT da cena contendo a rodovia.	60
Figura 24: (a) Linha poligonal definida por três pontos sementes.(b) Dois novos vértices interpolados.	60
Figura 25: (a) Planos perpendiculares a linha poligonal de referência.(b) Linhas de busca definidas.	61
Figura 26: (a) Linha de busca amostrada.(b) Linha poligonal obtida pela primeira iteração.	62
Figura 27: (a) Resultado final dos ciclos de otimização. (b) Sobreposição do resultado no MDT.	63
Figura 28: Fluxograma com as etapas da metodologia proposta.	64
Figura 29:(a) Representação na imagem.(b) Pontos sementes sobre o MDT.(c) Visão em perspectiva.	65
Figura 30: (a) Pontos adensados.(b) Linhas de busca.(c) Caminho ótimo. (d) Resultado da 1ª iteração.	66
Figura 31: (a) Linha poligonal formada com os pontos da 1ª iteração. (b) Pontos sobre o MDT.	66

Figura 32: Linha poligonal formada com os pontos da 2ª iteração. (b) Pontos sobre o MDT.	66
Figura 33: (a) Representação na imagem.(b) Eixo da rodovia sobre o MDT.(c) Visão em perspectiva.	67
Figura 34: Composição com as Imagens 0667, 0669 e 0671 utilizadas nos experimentos.....	68
Figura 35: Histogramas das imagens (a) 0667, (b) 0669 e (c) 0671.	69
Figura 36: Visão ortogonal da nuvem de pontos do modelo digital do terreno.....	69
Figura 37: Representação do núcleo da biblioteca <i>Opencv</i>	71
Figura 38: Representação do núcleo da biblioteca <i>CGAL</i>	72
Figura 39: (a) Janela de instruções e (b) imagem para coleta de pontos sementes.....	73
Figura 40: Apresentação das coordenadas dos pontos sementes em ambos os espaços.	73
Figura 41: (a) Informações sobre a progressão do processo e (b) finalização da extração.	74
Figura 42: (a) Distâncias entre pontos no eixo. (b) Deslocamentos dos pontos entre as iterações. ...	74
Figura 43: (a) MDT com o eixo sobreposto.(b) Ampliação com visão ortogonal e (c) em perspectiva.	75
Figura 44: (a, b, c) Diferentes configurações de pontos sementes. (d, e, f) Respectivos resultados para as três configurações de pontos sementes.	76
Figura 45: Quatro pontos sementes fornecidos em diferentes posições.	77
Figura 46: (a) Imagem da esquerda do primeiro estéreo par. (b) Malha extraída do estéreo par.	79
Figura 47: (a) Imagem da esquerda do segundo estéreo par. (b) Malha extraída do estéreo par.	80
Figura 48: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TC1.....	82
Figura 49: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TC2.....	82
Figura 50: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TC3.....	82
Figura 51: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TC4.....	83
Figura 52: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TM1.	85
Figura 53: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TM2.	86
Figura 54: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TM3.	86
Figura 55: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TM4.	87
Figura 56: Recorte na (a,c) imagem da esquerda e na (b,d) imagem direita do estéreo par.....	89
Figura 57: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TL1.	90
Figura 58: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TL2.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo das extrações de trechos curtos (TC).	81
Tabela 2: Resultados da análise numérica nos trechos curtos (TC).	84
Tabela 3: Resumo das extrações de trechos médios (TM).	85
Tabela 4: Resultados da análise numérica nos trechos médios (TM).	87
Tabela 5: Resumo das extrações de trechos longos (TL).	89
Tabela 6: Resultados da análise numérica nos trechos longos (TL).	91

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.2	OBJETIVOS	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	INTRODUÇÃO	18
2.2	SISTEMAS DE COORDENADAS NO ESPAÇO-IMAGEM	18
2.2.1	<i>SISTEMA FIDUCIAL</i>	19
2.2.2	<i>SISTEMA DE IMAGEM.....</i>	20
2.2.3	<i>SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO</i>	21
2.3	REFINAMENTO DE COORDENADAS.....	23
2.3.1	<i>DEFORMAÇÕES DO FILME.....</i>	23
2.3.2	<i>DESLOCAMENTO DO PONTO PRINCIPAL</i>	24
2.3.3	<i>DISTORÇÃO DAS LENTES</i>	25
2.3.4	<i>DISTORÇÕES DEVIDO A REFRAÇÃO ATMOSFÉRICA</i>	28
2.3.5	<i>EFEITO DA CURVATURA TERRESTRE</i>	30
2.4	SISTEMAS DE COORDENADAS NO ESPAÇO-OBJETO	31
2.4.1	<i>SISTEMA GEODÉSICO</i>	32
2.4.2	<i>SISTEMA GEODÉSICO CARTESIANO.....</i>	33
2.4.3	<i>SISTEMA GEODÉSICO CARTESIANO LOCAL</i>	34
2.4.4	<i>SISTEMA DE PROJEÇÃO UTM</i>	34
2.5	TRANSFORMAÇÕES DE COORDENADAS NO ESPAÇO-OBJETO	36
2.5.1	<i>TRANSFORMAÇÕES ENTRE UTM E TM.....</i>	36
2.5.2	<i>TRANSFORMAÇÕES ENTRE TM E GEODÉSICA</i>	36
2.5.3	<i>TRANSFORMAÇÕES ENTRE COORDENADA GEODÉSICA E GEODÉSICA CARTESIANA</i>	39
2.5.4	<i>TRANSFORMAÇÕES ENTRE COORDENADAS GEODÉSICA CARTESIANA E GEODÉSICA CARTESIANA LOCAL</i>	40
2.6	RELAÇÃO ENTRE COORDENADAS NO ESPAÇO-OBJETO E ESPAÇO-IMAGEM.....	41

2.6.1	TRANSFORMAÇÕES DE COORDENADAS ENTRE ESPAÇO-IMAGEM E ESPAÇO-OBJETO	41
2.6.2	TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS UTM PARA COORDENADAS DE IMAGEM.....	43
2.7	PROGRAMAÇÃO DINÂMICA	44
2.8	MODELOS MATEMÁTICOS DE RODOVIA.....	46
2.8.1	MODELO MATEMÁTICOS DE RODOVIA NO ESPAÇO-IMAGEM.....	46
2.8.2	MODELO MATEMÁTICO DE RODOVIA NO ESPAÇO-OBJETO PARA UMA IMAGEM ISOLADA	48
2.8.3	MODELO MATEMÁTICO DE RODOVIA NO ESPAÇO-OBJETO PARA UM ESTÉREO PAR DE IMAGENS.....	49
2.9	MODELAGEM DE SUPERFÍCIE.....	52
2.9.1	FONTES DE DADOS PARA GERAÇÃO DO MDT	53
2.9.2	ESTRUTURAS DE DADOS PARA MDT'S	54
2.10	B-SPLINE.....	57
3	METODOLOGIA PARA EXTRAÇÃO DE RODOVIAS	59
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	59
3.2	METODOLOGIA PROPOSTA.....	59
3.3	DESCRIÇÃO ILUSTRATIVA DA METODOLOGIA.....	64
4	EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	68
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	68
4.2	DADOS UTILIZADOS	68
4.3	ASPECTOS COMPUTACIONAIS.....	70
4.4	INICIALIZAÇÃO DO PROCESSO	76
4.5	FORMAS DE ANÁLISE DOS RESULTADOS	77
4.6	EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	79
4.6.1	EXTRAÇÕES DE TRECHOS CURTOS.....	81
4.6.2	EXTRAÇÃO DE TRECHOS MÉDIOS	84
4.6.3	EXTRAÇÕES DE TRECHOS LONGOS	89
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	92
6	REFERÊNCIAS.....	94

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A aquisição de informações espaciais por meio de Sensoriamento Remoto, para criação e atualização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG's), é comumente realizada através de técnicas de extração baseadas em imagens, que são dependentes de um operador humano que realiza operações como a interpretação do conteúdo e delineamento dos objetos de interesse. Neste contexto a automação dos processos fotogramétricos pode ser entendida como uma tentativa de minimizar a participação humana nas etapas do processo de extração de dados das imagens. Os sistemas de extração de dados em imagens digitais são classificados como semi-automáticos e automáticos, dependendo do grau de automação que proporcionam. Pode ser considerado um sistema semi-automático quando o operador classifica o objeto de interesse e a tarefa de delineamento é deixada a cargo do algoritmo computacional. Como exemplo tem-se técnicas que utilizam pontos sementes posicionados pelo operador ao longo das rodovias na imagem digital, permitindo ao algoritmo identificar o contorno e o eixo desta feição. Os sistemas automáticos caracterizam-se por não haver a interferência do operador, porém, assumindo que é virtualmente impossível imitar plenamente o sistema visual humano, os sistemas automáticos sempre necessitarão de algum tipo de edição manual e validação das informações espaciais extraídas.

O objeto rodovia constitui uma importante classe de informação espacial, fundamental no contexto de mapeamento e dos SIG's. Muita pesquisa tem sido realizada desde a década de 1970, destacando-se os trabalhos pioneiros de Bajcsy e Tavakoli (1976) e Quam (1978). A maioria dos trabalhos baseia-se em problemas inteiramente formulados e resolvidos no espaço-imagem. A grande maioria destes trabalhos é de concepção semi-automática, com estratégias de delineamento sequencial ou global. As estratégias sequenciais combinam passos sucessivos de predição e refinamento para extrair ponto a ponto o eixo da rodovia, podendo-se citar como exemplos os trabalhos de McKeown e Denlinger (1988) e Kim et al. (2004). Já as estratégias globais se utilizam de alguma função objetivo para modelar todo o eixo da rodovia, utilizando os modelos de contorno ativo (KASS

et al., 1987) ou modelos derivados. Várias soluções foram propostas, como por exemplo as que se baseiam no conceito original de contorno ativo (KASS et al., 1987) ou no ajuste local de parábolas (HU et al., 2004) ou na otimização por programação dinâmica de um modelo geral de rodovia (GRUEN e LI, 1997). Por outro lado, os métodos de concepção automática geralmente requerem a integração de conhecimento contextual e de conhecimento *a priori* para reconhecer e delinear toda a malha viária, a fim de obter um todo topologicamente correto (BAUMGARTNER et al., 1999; HU et al., 2007).

Poucas metodologias foram desenvolvidas tendo por base a formulação do problema no espaço-objeto ou em ambos os espaços: imagem e objeto. Estas metodologias podem basear-se em uma única imagem, necessariamente combinada a um MDT (Modelo Digital do Terreno), ou em duas ou mais imagens. Apesar de não ser pré-requisito, esse último caso pode beneficiar-se da integração de um MDT, tornando mais robusto o processo de extração. É possível, em ambos os casos, tratar de forma mais eficiente os problemas de oclusão e de ocorrência de falsos positivos (GRUEN e LI, 1997). Esses benefícios decorrem basicamente da facilidade em introduzir restrições de suavidade que considerem o componente vertical nos eixos das rodovias, o que não é possível para os métodos formulados no espaço-imagem.

Gallis et al. (2005), Dal Poz et al. (2006) e Dal Poz et al. (2010a) propuseram uma metodologia semi-automática para a extração de rodovias no espaço-objeto utilizando uma imagem aérea e um MDT. Um modelo matemático de rodovia no espaço-objeto é formulado em dois passos. Primeiro, a rodovia é modelada no espaço-imagem considerando várias propriedades geométricas e radiométricas. Posteriormente, este modelo é modificado para descrever as rodovias no espaço-objeto, tendo por base, principalmente, o modelo do sensor. Como o modelo matemático de rodovia obtido desta forma não admite solução única, uma restrição é introduzida para forçar as rodovias extraídas a pertencerem à superfície de um MDT. Gallis (2006) e Dal Poz et al. (2010b) estenderam o método descrito de forma a utilizar somente um estéreo par com respectivos parâmetros de orientação interior e exterior, procurando estabelecer um método que fosse independente do MDT. Já o método proposto nesta pesquisa envolve os dois métodos descritos anteriormente, fazendo o uso integrado de um estéreo par de imagens aéreas de baixa resolução e um MDT. A motivação é garantir maior robustez à extração por

meio da redundância radiométrica obtida no estéreo par, e por injunções altimétricas possibilitadas pelo MDT.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo desenvolver uma metodologia semi-automática de extração do eixo da rodovia no espaço-objeto baseado na otimização por programação dinâmica, integrando um estéreo par de imagens aéreas de baixa resolução e um MDT. Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um modelo matemático de rodovia no espaço-objeto que integre um estéreo par de imagens aéreas e um MDT,
- Desenvolver uma estratégia de otimização do modelo matemático de rodovia baseada em programação dinâmica;
- Explorar bibliotecas computacionais que agreguem robustez às implementações;
- Avaliar experimentalmente a metodologia proposta, comparando seus resultados com os obtidos por um operador humano.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos. O Capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica que subsidia o desenvolvimento da metodologia proposta. Nele são apresentados tópicos de Fotogrametria, Programação Dinâmica, Modelagem de Rodovia e Ajuste de Superfície. No Capítulo 3 é apresentada e discutida a metodologia proposta. No Capítulo 4 são descritas as implementações e os resultados obtidos na avaliação experimental da metodologia. O Capítulo 5 traz as principais conclusões a respeito dos resultados obtidos nos experimentos realizados e algumas recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos que embasam o desenvolvimento da metodologia proposta no Capítulo 3. Iniciando a fundamentação são abordadas uma série de definições fotogramétricas clássicas (Seções 2.2 a 2.6). Em seguida são tratados os aspectos gerais da Programação Dinâmica (Seção 2.7), para posteriormente serem apresentados os Modelos Matemáticos de Rodovia (Seção 2.8) e os Modelos de Superfície (Seção 2.9), finalizando com uma breve descrição das curvas B-Spline. (Seção 2.10).

2.2 SISTEMAS DE COORDENADAS NO ESPAÇO-IMAGEM

Os processos fotogramétricos fazem uso primariamente de duas categorias de sistemas de coordenadas, os Sistemas de Coordenadas do espaço-imagem e os Sistemas de Coordenadas do espaço-objeto, com seus sistemas derivados (MIKHAIL et al., 2001).

De acordo com Lugnani (1987), entende-se por espaço-imagem o espaço envolvendo nodo posterior do sistema de lentes da câmera e o plano da superfície de registro da cena (negativo), e o espaço correspondente a este para o caso do diapositivo (Figura 1).

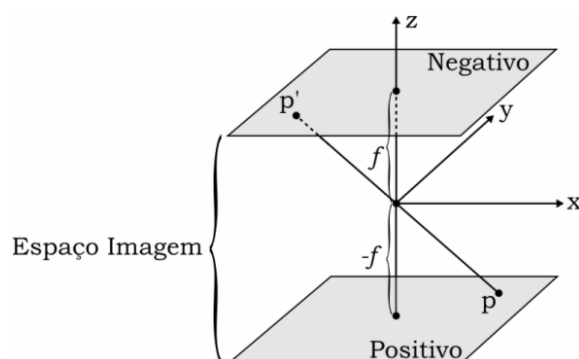


Figura 1: Representação do espaço-imagem. Fonte: Andrade (1998).

Os sistemas de coordenadas do espaço-imagem convencionalmente estabelecidos na Fotogrametria são: Sistema Fiducial, Sistema de Imagem, Sistema Fotogramétrico.

2.2.1 SISTEMA FIDUCIAL

Para expressar coordenadas em imagens capturadas por câmaras métricas analógicas, o sistema de referência adotado é o bidimensional de eixos cartesianos, materializado pelas marcas fiduciais fixadas rigidamente no corpo da câmara e consequentemente gravadas na imagem. A origem do sistema, denominado Centro Fiducial (CF), é estabelecida pela intersecção das linhas que unem marcas fiduciais opostas (linhas fiduciais). O eixo x_f é definido como a linha fiducial mais próxima a direção de voo, sendo positiva neste sentido. O eixo y_f tem sentido positivo a 90° (sentido anti-horário) do eixo x_f no plano da imagem (WOLF e DEWITT, 2000).

Com os eixos estabelecidos, a posição de um ponto a na imagem é indicada pelas coordenadas retangulares x_{fa} e y_{fa} , conforme mostrado na Figura 2.

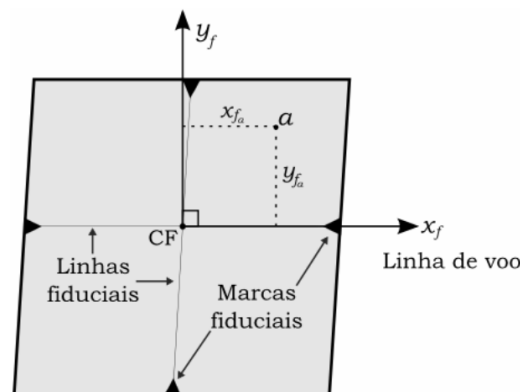


Figura 2: Sistema de coordenadas fiducial. Fonte: Wolf e Dewitt (2000).

Para fotografias com marcas fiduciais fixadas nos cantos do quadro, após definir o CF e o eixo x_f aplica-se uma rotação de 45° (sentido horário ou anti-horário) alinhando-o de forma mais próxima possível à linha voo, com o restante do sistema estabelecido da mesma maneira descrita anteriormente.

2.2.2 SISTEMA DE IMAGEM

Imagens podem ser adquiridas diretamente no formato digital ou digitalizadas a partir de fotografias analógicas. Em ambos os casos, a captura é realizada por sensores que estão organizados em arranjo matricial ou linear. Cada sensor constitui um elemento de imagem conhecido como *pixel* (*picture elements*), com posição indicada por um par ordenado (coluna, linha). Este arranjo de pixels estabelece o sistema bidimensional de coordenadas de imagem (x_p, y_p) , cuja origem é convencionada no canto superior esquerdo da imagem, com o eixo x_p coincidindo com a primeira linha e o eixo y_p coincidindo com a primeira coluna da imagem (Figura 3).

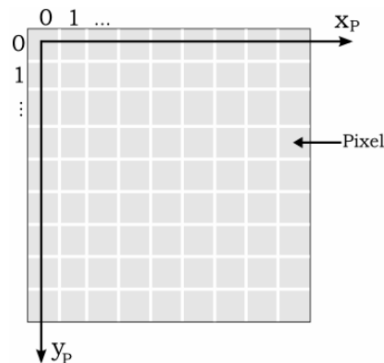


Figura 3: Sistema de coordenadas da imagem.

Dependendo da maneira como foi obtida a imagem digital, o Sistema de Imagem pode se relacionar de duas formas com um sistema equivalente ao Fiducial das câmaras métricas analógicas.

Para as imagens capturadas diretamente no formato digital a relação é estabelecida pela translação da origem do sistema de imagem para o centro da imagem, seguida de uma reflexão no eixo y , resultando num sistema de coordenadas intermediário (x_i, y_i) , conforme ilustrado na (Figura 4).

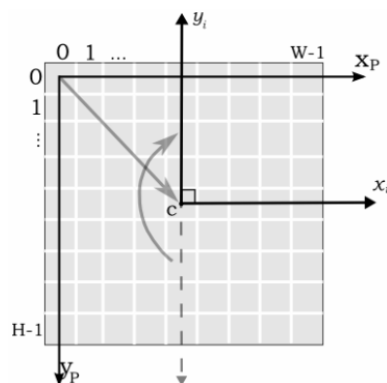


Figura 4: Definição do sistema intermediário em uma imagem digital. Fonte: Galo (2003).

As coordenadas (c_x, c_y) da origem C são obtidas pela expressão

$$(c_x, c_y) = \left(\frac{W-1}{2}, \frac{H-1}{2} \right), \quad (1)$$

onde W é o número de colunas (largura) e H número de linhas (altura) da imagem, todas contadas em pixels. Logo, as coordenadas (x_i, y_i) de qualquer ponto no sistema intermediário pode ser calculada em função de sua posição no Sistema de Imagem (x_p, y_p) , aplicando um fator de escala no eixo x (S_x) e no eixo y (S_y) referente às dimensões do pixel a fim de estabelecer as coordenadas num sistema métrico, conforme Equação 2.

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0 & -S_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_p - c_x \\ y_p - c_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

A inversa da Equação 2 permite o cálculo das coordenadas (x_p, y_p) a partir de (x_i, y_i) (Equação 3).

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/S_x & 0 \\ 0 & -1/S_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

Em contrapartida, nas imagens capturadas de forma analógica e posteriormente digitalizadas, a relação entre o Sistema de Imagem e o Fiducial é estabelecida por uma transformação geométrica plana (afim, por exemplo), cujos parâmetros são estimados a partir do ajustamento pelo método dos mínimos quadrados (MMQ), devendo ser conhecidas as coordenadas calibradas das marcas fiduciais no Sistema Fiducial (constantes no certificado de calibração) e as respectivas coordenadas medidas na imagem digital no Sistema de Imagem.

2.2.3 SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO

Trata-se de um sistema cartesiano tridimensional com origem estabelecida no centro perspectivo da câmara. Os eixos x e y são paralelos e orientados em relação aos eixos x_f e y_f do sistema fiducial ou intermediário (x_i, y_i) , com o eixo z perpendicular ao plano da imagem, de forma que torne o sistema dextrogiro (Figura 5).

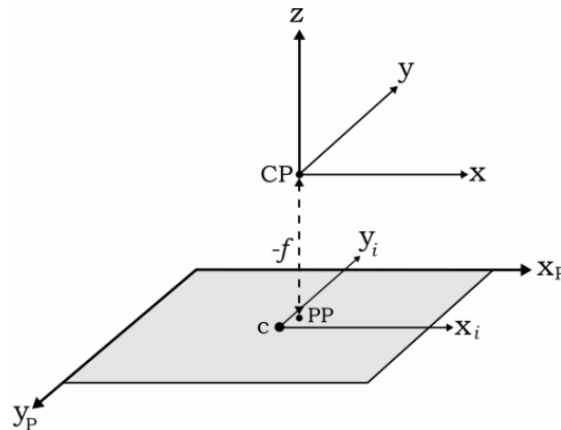


Figura 5: Sistema fotogramétrico do positivo fotográfico. Fonte: Lugnani (1987).

Desta forma, de posse das coordenadas de um ponto do positivo em um sistema bidimensional, fiducial (x_f, y_f) ou intermediário (x_i, y_i) , pode-se estender essas coordenadas para o sistema fotogramétrico por meio da equação:

$$(x, y, z) = (x_f - x_0, y_f - y_0, -f), \quad (4)$$

onde f é a distância focal e (x_0, y_0) as coordenadas do ponto principal (PP) dadas pelo certificado de calibração da câmara (MIKHAIL et. al., 2001). O ponto principal é definido como a interseção do eixo óptico do sistema de lentes da câmara com o plano da imagem.

O sistema correspondente ao anterior, para o caso de emprego do negativo fotográfico (Figura 6), tem origem no centro perspectivo e os eixos x e y sofrem uma reflexão (LUGNANI, 1987).

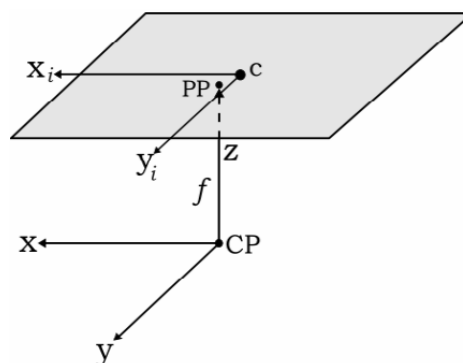


Figura 6: Sistema fotogramétrico do negativo. Fonte: Lugnani (1987).

É possível observar na Figura 6 que a coordenada z dos pontos sobre a imagem assumirá o valor f .

2.3 REFINAMENTO DE COORDENADAS

O objetivo do refinamento de coordenadas de imagem é assegurar que os erros presentes sejam estritamente randômicos, decorrentes dos modelos matemáticos adotados, sem componentes sistemáticos (MIKHAIL et al., 2001). As coordenadas de um ponto no espaço-imagem podem ser influenciadas por erros sistemáticos oriundos de diversas fontes e são corrigidas na ordem oposta a que acontecem, na etapa de pré-processamento, que faz parte do processo de orientação interior. Segundo Wolf e Dewitt (2000), as principais fontes de erros são:

- Distorções devido ao trabalho e deformação do filme;
- Deslocamento do ponto principal;
- Distorção das lentes;
- Distorções devido à refração atmosférica;
- Distorção devido à curvatura da Terra.

Nas próximas seções serão detalhados os erros sistemáticos, bem como os procedimentos de correção de cada um deles.

2.3.1 DEFORMAÇÕES DO FILME

Devido a sua própria natureza, este tipo de deformação estará presente somente em imagens capturadas por câmaras métricas analógicas, digitalizadas posteriormente ou não. Medidas de fotocoordenadas inevitavelmente contêm deformações decorrentes da contração, dilatação e deformação do material base que suporta a emulsão do negativo ou diapositivo. Tais deformações são categorizadas como deformações do filme e normalmente são de natureza não homogênea, ou seja, distorções na direção x são frequentemente diferentes das distorções em y . Por consequência, o processo de correção faz uso das coordenadas das marcas fiduciais medidas na imagem e as correspondentes coordenadas disponibilizadas no certificado de calibração da câmara (WOLF e DEWITT, 2000).

Em complemento as marcas fiduciais, ou substituindo essas, algumas câmeras são equipadas com um *reseau*, que consiste em uma série regular

de marcas gravadas em uma placa de vidro e cujas coordenadas são estimadas na calibração. Esta placa de vidro é colocada em frente ao filme, de forma que ao fazer a exposição, a grade seja impressa no negativo. A vantagem do *reseau* é a distribuição uniforme da grade de marcas, assim correções para distorções não uniformes podem ser feitas de forma precisa em toda a extensão do filme (MIKHAIL et al., 2001).

Na realização da correção das deformações do filme para aplicações fotogramétricas, devem ser utilizadas transformações de coordenadas bidimensionais, que acabam por transformar as coordenadas de pixel para o sistema de coordenadas fiducial. Existem diferentes tipos de transformações a serem aplicadas, variando de acordo com o nível de acurácia desejada e o número de marcas fiduciais disponíveis, destacando-se a isogonal, afim, projetiva e polinomial (MIKHAIL et al., 2001).

Se a opção for uma transformação geométrica (afim, por exemplo), são necessárias as coordenadas das marcas fiduciais (fornecidas pelo certificado de calibração) e suas correspondentes no sistema de imagem, empregando então a Equação 5.

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (5)$$

Nesta equação, a , b , c , d , Δx e Δy são os parâmetros de transformação afim; (x_f, y_f) são as coordenadas das marcas fiduciais; (x_p, y_p) as coordenadas calibradas das marcas fiduciais.

Pela inversa da Equação 5 se obtém as coordenadas das marcas fiduciais e dos demais pontos observados no sistema fiducial ou intermediário e, por conseguinte, corrigidas das deformações do filme.

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_f - \Delta x \\ y_f - \Delta y \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.3.2 DESLOCAMENTO DO PONTO PRINCIPAL

Durante o processo de montagem da câmara métrica procura-se enquadrar as marcas fiduciais e o conjunto de lentes de forma que o ponto principal e a intersecção das linhas fiduciais coincidam. No caso das câmaras digitais a

preocupação é que o ponto principal coincida com o centro da matriz de sensores. Em ambas as situações o enquadramento perfeito não ocorre na prática, havendo um deslocamento cuja magnitude é determinada durante o processo de calibração da câmara. Como as equações fotogramétricas assumem o ponto principal como origem das fotocoordenadas, se faz necessário realizar a correção deste deslocamento, assim as fotocoordenadas no sistema fiducial devem ser reduzidas ao sistema fotogramétrico, cuja origem é o ponto principal (WOLF e DEWITT, 2000).

Admitindo-se o paralelismo dos sistemas fiducial e intermediário com o sistema fotogramétrico, a correção é efetuada por meio de uma translação. Para realizar tal correção as coordenadas do ponto principal constantes no certificado de calibração da câmara são subtraídos das coordenadas do ponto medido na imagem:

$$x' = x_i - x_0 \quad (7)$$

$$y' = y_i - y_0 \quad (8)$$

onde, x' e y' são as coordenadas corrigidas do deslocamento do ponto principal (coordenadas fotogramétricas); x_i e y_i são as coordenadas do ponto no sistema intermediário (ou fiducial); x_0 e y_0 são as coordenadas do ponto principal constante no certificado de calibração.

2.3.3 DISTORÇÃO DAS LENTES

Este tipo de distorção acarreta desvios na trajetória do raio de luz quando este atravessa o sistema de lentes, ocasionando um deslocamento nos pontos da imagem em relação à sua posição ideal. Este tipo de distorção pode ser decomposta em dois componentes, a distorção radial simétrica e a distorção descentrada. A distorção radial simétrica é decorrente do processo de fabricação das lentes, por consequência, havendo um cuidadoso processo de projeto e fabricação, podendo ser reduzido para um valor muito pequeno (WOLF e DEWITT, 2000). A distorção descentrada, por outro lado, é causada pela impossibilidade do fabricante em alinhar perfeitamente os eixos ópticos das lentes que compõem uma objetiva (ANDRADE, 1998).

A distorção radial simétrica pode ser definida como sendo a parcela não desejável da refração sofrida por um raio de luz ao atravessar uma lente ou um sistema de lentes (ANDRADE, 1998). Tal distorção provoca os deslocamentos na

direção radial a partir do ponto principal. Um raio de luz que antes de penetrar a câmara forme um ângulo α com o eixo óptico, ao atravessar o sistema de lentes formará um ângulo $\alpha + \delta\alpha$ (Figura 7), causando um deslocamento δr no ponto na imagem (ANDRADE, 1998).

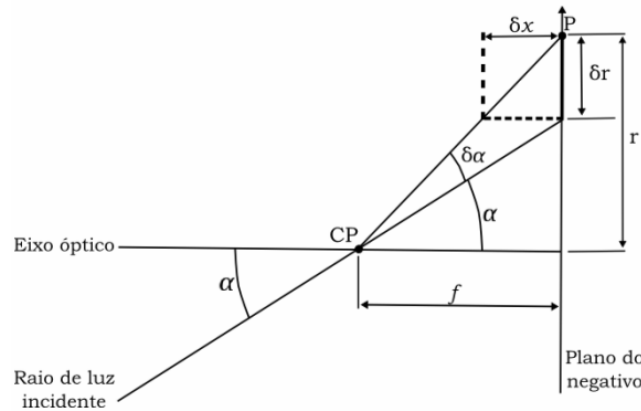


Figura 7: Representação gráfica da distorção radial simétrica. Fonte: Andrade (1998).

O deslocamento δr , chamado de distorção longitudinal, é determinado pelo modelo definido por Conrady, sendo expresso por um polinômio de ordem ímpar (Equação 9) (Andrade, 1998).

$$\delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 + \dots, \quad (9)$$

onde, δr é a distorção radial; r é a distância radial do ponto imagem ao ponto principal; e K_i é o coeficiente de distorção radial da lente.

A distância radial (r), é dada em função das coordenadas fotogramétricas (x', y') por:

$$r = \sqrt{x'^2 + y'^2}. \quad (10)$$

A Equação 9 permite o cálculo do valor δr para cada um dos valores de r . No entanto, na prática é necessário calcular a influência para cada um dos componentes individualmente (Figura 8).

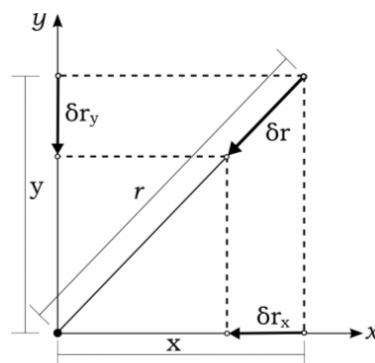


Figura 8: Distorção radial e as correções em x e y. Fonte: adaptado de Wolf e Dewitt (2000).

A partir da Figura 8 nota-se que os componentes de distorção radial, designadas por δx e δy , são obtidos por semelhança de triângulos. (WOLF e DEWITT, 2000):

$$\frac{\delta r}{r} = \frac{\delta r_x}{x} = \frac{\delta r_y}{y}. \quad (11)$$

Logo,

$$\delta r_x = x \cdot \frac{\delta r}{r} = x \cdot (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots), \quad (12)$$

$$\delta r_y = y \cdot \frac{\delta r}{r} = y \cdot (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots). \quad (13)$$

Com a origem do sistema de coordenadas já esteja no ponto principal, as coordenadas fotogramétricas corrigidas do efeito da distorção radial simétrica (x', y') são dadas por:

$$x' = x - \delta r_x, \quad (14)$$

$$y' = y - \delta r_y. \quad (15)$$

A distorção descentrada resulta em um deslocamento da imagem, sendo composta pelas distorções radial assimétrica e tangencial, conforme ilustrado na Figura 9 (ANDRADE, 1998)

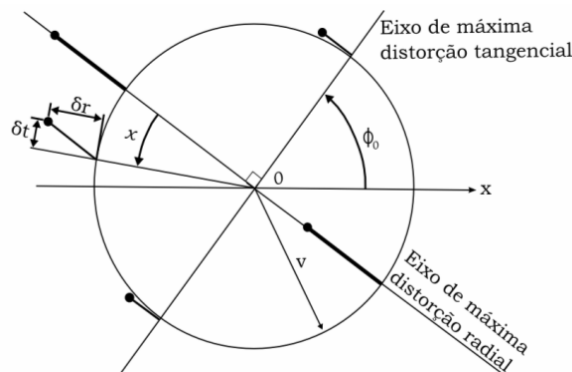


Figura 9: Componentes da distorção descentrada. Fonte: Andrade (1998).

Conrady estabelece as equações para os componentes de distorção que compõem a distorção descentrada, são elas (ANDRADE, 1998):

$$\delta r = 3 \cdot P_3 \cdot V^2 \cdot \cos x \quad (16)$$

$$\delta t = P_3 \cdot V^2 \cdot \sin x \quad (17)$$

onde δr é a distorção radial assimétrica; δt é a distorção radial tangencial; P_3 é uma constante; V é a distância angular entre o eixo óptico e o ponto imagem; x é o

ângulo medido no plano das imagens, do eixo de máxima distorção radial (um eixo perpendicular ao eixo de máxima distorção tangencial) até a radial que contém a imagem não distorcida do ponto.

Esse modelo sofreu algumas adaptações realizadas por Brown para aplicações fotogramétricas, transformando os componentes radial e tangencial em componentes δx e δy no sistema de coordenadas fotogramétricas. Dessa forma, as coordenadas afetadas pela distorção descentrada podem ser corrigidas por (ANDRADE, 1998):

$$\delta dx = [P_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot x^2) + 2 \cdot P_2 \cdot x \cdot y] \quad (18)$$

$$\delta dy = [2 \cdot P_1 \cdot x \cdot y + P_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot y^2)] \quad (19)$$

onde (x, y) são as coordenadas no sistema fotogramétricos; r é a distância radial do ponto imagem ao ponto principal; P_1 e P_2 coeficientes de distorção descentrada. Assim, as coordenadas corrigidas (x', y') da distorção descentrada podem ser obtidas por:

$$x' = x - \delta dx \quad (20)$$

$$y' = y - \delta dy \quad (21)$$

2.3.4 DISTORÇÕES DEVIDO A REFRAÇÃO ATMOSFÉRICA

O índice de refração atmosférica reduz com o aumento da altitude. Wolf e Dewitt (2000), em função dessa condição, destacaram que os raios de luz não percorrem um caminho retilíneo na atmosfera, ou seja, são continuamente flexionados, havendo então a necessidade de corrigir as coordenadas de imagem em trabalhos aerofotogramétricos, podendo ser utilizada para isto uma atmosfera padrão.

A Figura 10 ilustra uma situação na qual um raio luminoso que chega ao negativo a partir do ponto A, forma um ângulo α com a vertical. Se a refração atmosférica fosse ignorada, o raio de luz pareceria ser proveniente do ponto B e não do ponto A.

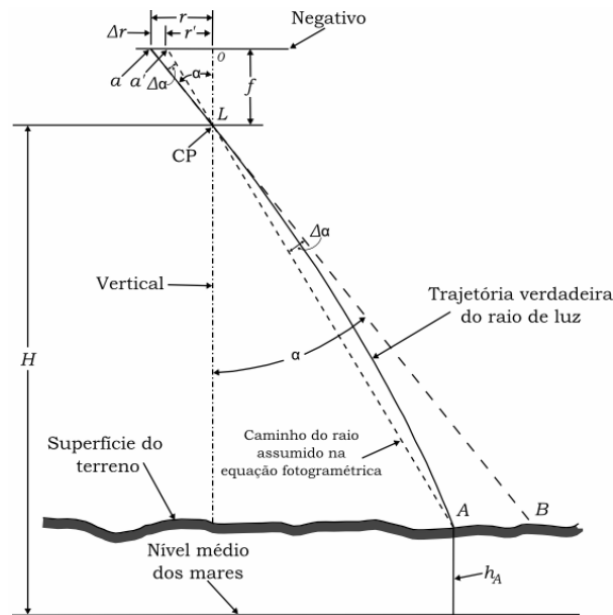


Figura 10: Refração atmosférica em fotografia aérea. Fonte: Wolf e Dewitt (2000).

Como se pode notar (Figura 10), a refração causa um deslocamento na posição dos pontos na imagem. As equações de colinearidade assumem que o raio de luz percorre um caminho retilíneo, o que implica na necessidade de corrigir o efeito de refração sobre as coordenadas dos pontos da imagem. Se o raio de luz proveniente do ponto A tivesse percorrido um caminho linear, o ponto imagem corresponderia a a' . A distorção angular devido a refração atmosférica é dada por $\Delta\alpha$, e a distorção linear na fotografia é representada por Δr . A magnitude da distorção devido à refração atmosférica aumenta com o aumento da altura de voo e do ângulo α . O efeito ocorre radialmente a partir do ponto principal sendo nulo na direção do nadir (WOLF e DEWITT, 2000).

A relação que expressa a distorção do ângulo $\Delta\alpha$ como uma função de α é expressa por (MIKHAIL et al., 2001; WOLF e DEWITT, 2000):

$$\Delta\alpha = k \cdot \tan \alpha \quad (22)$$

onde α é o ângulo formado entre a vertical e o raio de luz e k é uma constante relacionada com as condições atmosféricas, variando de acordo com a altura de voo.

Existem diferentes abordagens para calcular o valor de k , sendo que a maioria assume uma atmosfera padrão para isso. Um método conveniente para calcular k é dado por (WOLF e DEWITT, 2000):

$$k = (7,4 \cdot 10^{-4}) \cdot (H - h) \cdot [1 - 0,02 \cdot (2H - h)] \quad (23)$$

onde, H é a altura de voo e h é a altura do ponto objeto, ambos medidos em quilômetros.

A partir da distância radial r calculada pela Equação 10, a distorção linear (Δr) em função da refração atmosférica, é determinada pelas equações abaixo (WOLF e DEWITT, 2000).

$$\tan \alpha = \frac{r}{f} \quad (24)$$

Então, k (Equação 23) e a $\tan \alpha$ (Equação 24), são substituídos na Equação 22 para computar o ângulo de refração $\Delta \alpha$.

$$\Delta \alpha = k \cdot \frac{r}{f} \quad (25)$$

A distância radial r' do ponto principal para a localização corrigida da imagem pode ser calculada por:

$$r' = f \cdot \tan(\alpha - \Delta \alpha). \quad (26)$$

A mudança na distância Δr é então computada por:

$$\Delta r = r - r'. \quad (27)$$

Expressos os componentes, as coordenadas fotogramétricas corrigidas do efeito da refração atmosférica (x' , y') de um ponto na imagem (x , y), são obtidas por:

$$x' = x - \delta r a_x = x - \frac{\Delta r}{r} \cdot x \quad (28)$$

$$y' = y - \delta r a_y = y - \frac{\Delta r}{r} \cdot y \quad (29)$$

2.3.5 EFEITO DA CURVATURA TERRESTRE

As equações de colinearidade são escritas para transformações entre dois sistemas de coordenadas cartesianas. Contudo, a maioria dos trabalhos de medição em campo são realizados com base em sistemas de coordenados definidos por projeção cartográfica, tais como a UTM, com altura geométrica h . Se tais coordenadas não forem convertidas para coordenadas cartesianas antes de serem utilizadas em procedimentos fotogramétricos, uma correção para a curvatura terrestre deve ser aplicada às coordenadas (MIKHAIL et al., 2001).

Conforme ilustrado na Figura 11 um ponto P localizado sobre a superfície curva da Terra, de altura h , é localizado em P' sobre o plano de projeção.

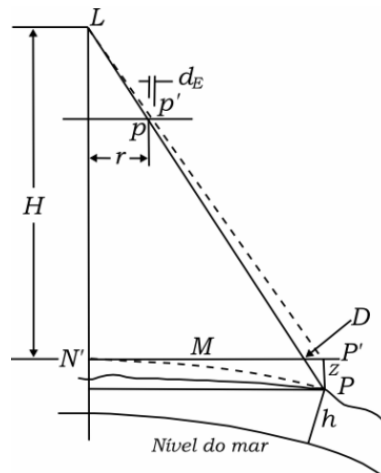


Figura 11: Efeito da curvatura da superfície terrestre. Fonte: Mikhail et al. (2001).

Se a altitude de voo é H , o raio médio da Terra é R , a distância focal da câmara é f (em milímetros), a distância radial do ponto a partir do ponto principal é r (em milímetros), a correção, em mm , é dada pela seguinte equação (MIKHAIL et al., 2001):

$$d_E = \frac{r^3 H}{2 f^2 R}. \quad (30)$$

As coordenadas fotogramétricas (x', y') corrigidas do efeito da curvatura terrestre são dadas por:

$$x' = \left(1 + \frac{d_E}{r}\right) \cdot x \quad (31)$$

$$y' = \left(1 + \frac{d_E}{r}\right) \cdot y \quad (32)$$

Se for adotado um sistema de coordenadas cartesiano local para os trabalhos no espaço-objeto, tais correções não são necessárias.

2.4 SISTEMAS DE COORDENADAS NO ESPAÇO-OBJETO

O espaço-objeto é a região tridimensional coberta por uma fotografia ou imagem, ou seja, a região que envolve o ponto nodal anterior e todos os pontos

fotografados (LUGNANI, 1987). Neste espaço pode-se referenciar as coordenadas de objetos por meio de sistemas cartesianos e geodésicos (ou geodésicos elipsoidais). Tais sistemas podem ter origem no centro de massa da terra (um sistema geocêntrico) ou em algum ponto local mais conveniente (um sistema topocêntrico). Os referenciais do espaço-objeto que se destacam nos trabalhos fotogramétricos são: Sistema Geodésico, Sistema Geodésico Cartesiano e o Sistema Geodésico Cartesiano Local. Têm-se ainda as projeções cartográficas, sendo corriqueiramente utilizada a projeção conforme UTM com altura geométrica h . Tais referenciais serão detalhados a seguir.

2.4.1 SISTEMA GEODÉSICO

Neste sistema, também chamado de Sistema Geodésico Elipsoidal, adota-se uma superfície (elipsóide de revolução) que sirva de referência para garantir uma concordância das coordenadas, e cujo modelo geométrico possibilite a simplificação dos cálculos. Tal elipsóide é definido pelos seus parâmetros f (achatamento) e a (semi-eixo maior). As coordenadas geodésicas que especificam a localização de objetos na superfície da Terra são estabelecidas por latitude φ , longitude λ e altura geométrica h . Os componentes latitude e longitude são componentes horizontais, enquanto a altura é a componente vertical (WOLF e DEWITT, 2000).

A altura geométrica h é a distância da superfície do elipsóide até o ponto P na superfície da Terra, na mesma direção da normal (Figura 12 e Figura 13). A elevação do ponto P sobre o geóide (H) é conhecida como altura ortométrica (normalmente considerada a elevação em relação ao nível médio dos mares).

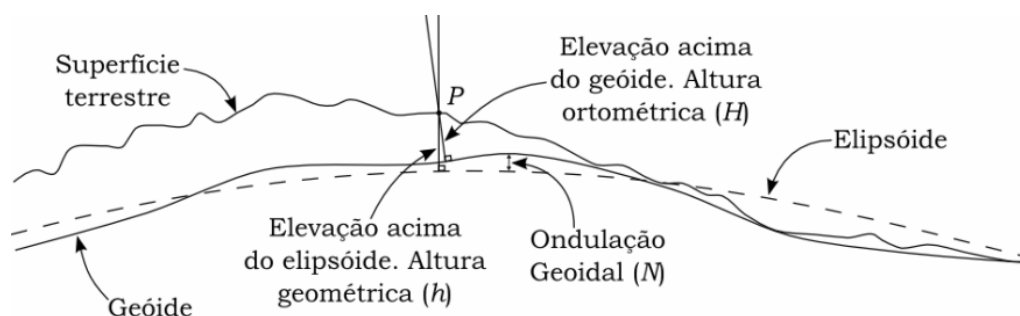


Figura 12: Ilustração das três superfícies de referência. Fonte: Wolf e Dewitt (2000).

Na Figura 13 tem-se um ponto P com uma reta passando através dele, perpendicular ao elipsóide e se estendendo até o eixo polar. Esta linha é denominada *normal*.

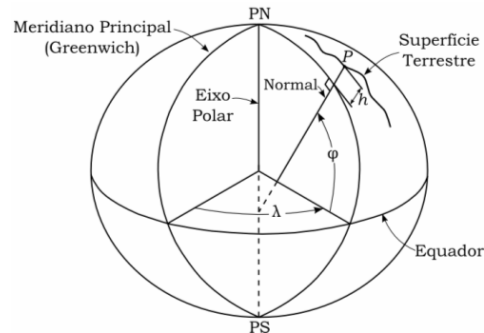


Figura 13: Coordenadas geodésicas. Fonte: Wolf e Dewitt (2000).

A longitude λ de um ponto P é dada por um ângulo, formado no plano do equador, em relação ao meridiano origem (Greenwich) para o meridiano local (meridiano interseccionado pela normal), com os valores negativos (0° a -180°) a oeste do meridiano principal e positivo (0° a 180°) a leste. A latitude ϕ de um ponto P é o ângulo do plano equatorial até a linha normal ao elipsóide no ponto P , com valores positivos (0° a 90°) ao norte do equador e negativo (0° a -90°) ao Sul.

2.4.2 SISTEMA GEODÉSICO CARTESIANO

No sistema de coordenadas geodésicas a posição tridimensional de um ponto é referenciada a uma superfície curva (elipsóide) e, como tal, não adequadas para a utilização dos modelos fotogramétricos. O Sistema Geodésico Cartesiano, também conhecido como Sistema Cartesiano Geocêntrico, por outro lado, é um sistema de coordenadas cartesianas no espaço tridimensional (XYZ), com origem no centro do elipsóide de revolução adotado como modelo (WOLF e DEWITT, 2000).

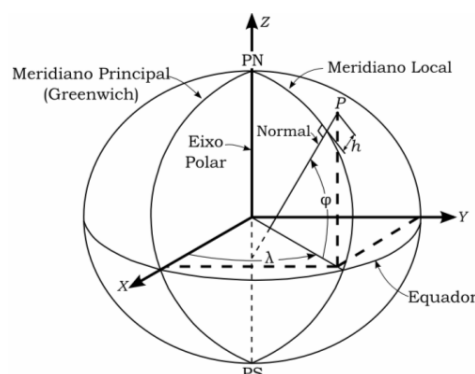
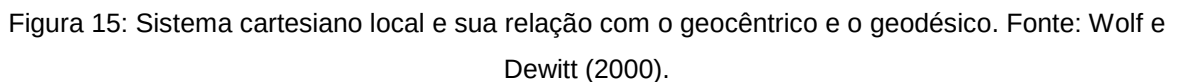


Figura 14: Relação entre sistema geodésico e geodésico cartesiano. Fonte: Wolf e Dewitt (2000).

O Sistema Geodésico Cartesiano Local, ou simplesmente Sistema Cartesiano Local é um sistema de referência cartesiano tridimensional XYZ no qual a origem é estabelecida como um ponto sobre o elipsóide ou sobre um ponto de altura geométrica h_0 , sobre o geóide ou nas imediações da superfície física da Terra (LUGNANI, 1987).



2.4.4 SISTEMA DE PROJEÇÃO UTM

As Projeções são formulações matemáticas para representar feições de uma superfície curva em outra plana. Existem diferentes projeções, uma das mais utilizada no Brasil é a UTM (*Universal Transverse Mercator*), derivada da

Projeção Cilíndrica Transversa de Mercator (TM). A projeção UTM tem por característica reduzir as deformações nos extremos do fuso. O cilindro que na projeção TM é tangente ao meridiano central, na UTM passa a ser secante ao elipsóide de revolução, conforme ilustrado na FIGURA 16 (GASPAR, 2000).



Figura 16: Cilindro secante da Projeção UTM. Fonte: <http://commons.wikimedia.org>.

De acordo com IBGE (BRASIL, 1999), algumas características básicas da projeção UTM são:

- 1) A Terra é dividida em 60 fusos, cada um com 6° de longitude, os quais são numerados de 1 a 60, a partir do anti-meridiano de Greenwich (de 180° a 174°). Os fusos são gerados a partir da rotação de um cilindro de forma que o meridiano de tangência (ou meridiano central - MC) divide o fuso em duas partes iguais de 3° ;
- 2) O quadriculado é associado a um sistema plano-retangular, sendo que o eixo N aponta para o Norte (coincidente com o MC) e E aponta para o outro eixo (coincidente com o equador);
- 3) O coeficiente de deformação no MC é igual a 0,9996 no MC e aproximadamente a 1,000997 nos extremos do fuso;
- 4) Cada fuso tem um sistema cartesiano métrico de referência, no qual a origem é 500.000 m para E e para N adota-se 10.000.000 m ou 0 m (zero) para o hemisfério sul e norte, respectivamente;
- 5) Cada fuso é prolongado $30'$ em ambos os extremos, obtendo uma superposição de 1° ;
- 6) O sistema UTM é usado entre as latitudes 84°N e 80°S .

As coordenadas (E, N) são componentes horizontais que indicam posições no plano UTM. O componente vertical (h), referido ao elipsóide, deve ser acrescido para expressar alturas, formando um sistema de referência híbrido.

2.5 TRANSFORMAÇÕES DE COORDENADAS NO ESPAÇO-OBJETO

As transformações de coordenadas entre os referenciais do espaço-objeto ocorrem por questões de compatibilidade, facilidade de manuseio e outros motivos. Nesta seção serão apresentados os modelos matemáticos utilizados para as transformações de coordenadas entre referenciais do espaço-objeto.

2.5.1 TRANSFORMAÇÕES ENTRE UTM E TM

As coordenadas de um ponto no sistema UTM (N, E) são transformadas para o sistema TM (x, y) por meio das equações que seguem (MALING, 1992):

$$x = \frac{N}{0,9996}, \quad (33)$$

$$y = \frac{(E - 500.000)}{0,9996}, \quad (34)$$

$$x = \frac{(N - 10.000.000)}{0,9996}, \quad (35)$$

$$y = \frac{(E - 500.000)}{0,9996}. \quad (36)$$

As Equações 33 e 34 se referem ao hemisfério Norte, enquanto as 35 e 36 ao hemisfério Sul. Os valores 10.000.000 m e 500.000 m promovem as translações e o valor 0,9996 é o fator de escala do meridiano central. A transformação de coordenadas TM (x,y) para UTM (N,E) é obtido pela inversão das Equações 33 a 36.

2.5.2 TRANSFORMAÇÕES ENTRE TM E GEODÉSICA

Conforme descrito por Fazan (2007), as coordenadas no sistema TM (x, y) podem ser transformadas em coordenadas geodésicas (ϕ , λ), por meio das seguintes equações tratadas em Yang et al. (2000):

$$\phi = B_f + t_f \frac{y^2}{2N_f^2} \left[u'_0 + \frac{y^2}{12N_f^2} u'_2 + \frac{y^4}{360N_f^4} u'_4 \right], \quad (37)$$

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{y}{\overline{N}_f \cos(B_f)} \left[1 + \frac{y^2}{6\overline{N}_f^2} v'_2 + \frac{y^4}{120\overline{N}_f^4} v'_4 \right]. \quad (38)$$

Com os parâmetros t_f e η_f^2 obtidos por:

$$t_f = \tan(B_f), \quad (39)$$

$$\eta_f^2 = e'^2 \cos^2(B_f). \quad (40)$$

Sendo os coeficientes u'_0 , u'_2 , u'_4 , v'_2 e v'_4 calculados em função de t e η :

$$u'_0 = -1 - \eta_f^2, \quad (41)$$

$$u'_2 = 5 + 3t_f^2 + 6\eta_f^2 - 6t_f^2\eta_f^2 - 3\eta_f^4 - 9t_f^2\eta_f^4, \quad (42)$$

$$u'_4 = -61 - 90t_f^2 - 45t_f^4 - 107\eta_f^2 + 162t_f^2\eta_f^2 + 45t_f^4\eta_f^2, \quad (43)$$

$$v'_2 = -1 - 2t_f^2 - \eta_f^2, \quad (44)$$

$$v'_4 = 5 + 28t_f^2 + 24t_f^4 + 6\eta_f^2 + 8t_f^2\eta_f^2. \quad (45)$$

O parâmetro B_f é a latitude inicial aproximada calculada em função da coordenada x e dos parâmetros do elipsóide de referência. O cálculo de B_f é dado inicialmente por:

$$B_f^{(i=0)} = \frac{x}{A}. \quad (46)$$

Com o valor de A sendo obtido pela Equação 55. A partir desse valor, calcula-se o valor do arco de meridiano ($S^{(i)}$) correspondente (Equação 53). Um valor melhorado pode ser calculado por:

$$B_f^{(i+1)} = B_f^{(i)} + \frac{x - S^{(i)}}{A}. \quad (47)$$

Após esse procedimento calcula-se novamente o valor do arco de meridiano correspondente e um valor melhorado para B_f . O processo termina quando o valor absoluto do termo $(x - S^{(i)})$ for menor que uma tolerância pré-estabelecida.

Já a transformação do sistema de coordenadas geodésicas (ϕ, λ) para o sistema de projeção TM (x, y) , apresentada por Fazan (2007), é obtida por meio das seguintes equações tratadas em Yang et al. (2000):

$$x = S + \frac{NL^2t}{2} \left[1 + \frac{L^2}{12}u_2 + \frac{L^4}{360}u_4 + \frac{L^6}{40320}u_6 \right], \quad (48)$$

$$y = NL \left[1 + \frac{L^2}{6}v_2 + \frac{L^4}{120}v_4 + \frac{L^6}{5040}v_6 \right], \quad (49)$$

Com os parâmetros L , t , η e S obtidos por:

$$L = \Delta\lambda \cos(\varphi), \quad (50)$$

$$t = \tan(\varphi), \quad (51)$$

$$\eta^2 = e'^2 \cos^2(\varphi), \quad (52)$$

$$S = a(1 - e^2) \left[A\varphi - \frac{B}{2}\sin(2\varphi) + \frac{C}{4}\sin(4\varphi) - \frac{D}{6}\sin(6\varphi) + \frac{E}{8}\sin(8\varphi) \right]. \quad (53)$$

Com

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 \quad (54)$$

e

$$A = 1 + \frac{3}{4}e^2 + \frac{45}{64}e^4 + \frac{175}{256}e^6 + \frac{11025}{16384}e^8, \quad (55)$$

$$B = \frac{3}{4}e^2 + \frac{15}{16}e^4 + \frac{525}{512}e^6 + \frac{2205}{2048}e^8, \quad (56)$$

$$C = \frac{15}{64}e^4 + \frac{105}{256}e^6 + \frac{2205}{4096}e^8, \quad (57)$$

$$D = \frac{35}{512}e^6 + \frac{315}{2048}e^8, \quad (58)$$

$$E = \frac{315}{16384}e^8. \quad (59)$$

Sendo λ_0 a longitude do meridiano central no fuso UTM; S é o comprimento do arco de meridiano entre o equador e o ponto de latitude φ ; e'^2 é o quadrado da segunda excentricidade do elipsóide adotado como modelo; os coeficientes u_2 , u_4 , u_6 , v_2 , v_4 e v_6 são calculados em função de t e η :

$$u_2 = 5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4, \quad (60)$$

$$u_4 = 61 - 58t^2 + t^4 + 270\eta^2 - 330t^2\eta^2, \quad (61)$$

$$u_6 = 1385 - 3111t^2 + 543t^4 - t^6, \quad (62)$$

$$v_2 = 1 - t^2 + \eta^2, \quad (63)$$

$$v_4 = 5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58t^2\eta^2, \quad (64)$$

$$v_6 = 61 - 479t^2 + 179t^4 - t^6. \quad (65)$$

2.5.3 TRANSFORMAÇÕES ENTRE COORDENADA GEODÉSICA E GEODÉSICA CARTESIANA

Um ponto de coordenadas geodésicas φ (latitude), λ (longitude) e h (altura geométrica), pode ser expresso em coordenadas cartesianas retangulares X, Y e Z, assumindo-se para isso um elipsóide de revolução com a mesma origem do sistema de coordenadas cartesianas (MONICO, 2000).

A relação entre esses sistemas é estabelecida por (SEEBER, 2003):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\bar{N} + h) \cos(\varphi) \cos(\lambda) \\ (\bar{N} + h) \cos(\varphi) \sin(\lambda) \\ (\bar{N}(1 - e^2) + h) \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (66)$$

com $\bar{N}$ sendo a grande normal passando pelo ponto de coordenadas geodésicas (φ, λ) e definido por

$$\bar{N} = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2(\varphi))^{\frac{1}{2}}} \quad (67)$$

com o termo a sendo o comprimento do semi-eixo maior do elipsóide de referência adotado e e^2 o quadrado da primeira excentricidade,

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = 2f_e - f_e^2 \quad (68)$$

f o achatamento do elipsóide,

$$f_e = \frac{a - b}{a}. \quad (69)$$

A transformação de coordenadas do sistema geodésico cartesiano para o sistema geodésico, tem solução direta pelas equações (IBGE, 1999; MONICO, 2000):

$$\varphi = \arctan \left(\frac{Z + e^2 a \cdot [(1 - f)(1 - e^2)]^{-1} \cdot \sin^3(u)}{(\sqrt{X^2 + Y^2}) - e^2 \cdot a \cdot \cos^3(u)} \right), \quad (70)$$

$$\lambda = \arctan \left(\frac{Y}{X} \right), \quad (71)$$

$$h = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos(\varphi)} - N, \quad (72)$$

nas quais,

$$\text{sen}(u) = \frac{\tan(u)}{\sqrt{1 + \tan^2(u)}}, \quad (73)$$

$$\cos(u) = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2(u)}}, \quad (74)$$

$$\tan(u) = \frac{Z}{\sqrt{(X^2 + Y^2)}} \frac{1}{1 - f}. \quad (75)$$

2.5.4 TRANSFORMAÇÕES ENTRE COORDENADAS GEODÉSICA CARTESIANA E GEODÉSICA CARTESIANA LOCAL

A transformação entre os sistemas geodésico cartesiano e geodésico cartesiano local é realizada por meio de translações e rotações, (WOLF e DEWITT, 2000):

$$\begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \end{bmatrix} = R_1(\pi/2 - \varphi_0) \cdot R_3(\pi/2 + \lambda_0) \cdot \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (76)$$

onde, φ_0 e λ_0 corresponde a latitude e a longitude do ponto adotado como origem no sistema cartesiano local; X , Y , Z são as coordenadas no referencial geodésico cartesiano de um ponto P ; X_0 , Y_0 , Z_0 são as coordenadas cartesianas da origem do sistema local obtidas pela Equação 66. R_1 e R_3 são as matrizes de rotação dadas em função de φ_0 e λ_0 do ponto origem:

$$R_1(\pi/2 - \varphi_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\pi/2 - \varphi_0) & \text{sen}(\pi/2 - \varphi_0) \\ 0 & -\text{sen}(\pi/2 - \varphi_0) & \cos(\pi/2 - \varphi_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{sen}\varphi_0 & \cos\varphi_0 \\ 0 & -\cos\varphi_0 & \text{sen}\varphi_0 \end{bmatrix} \quad (77)$$

$$R_3(\pi/2 + \lambda_0) = \begin{bmatrix} \cos(\pi/2 + \lambda_0) & -\text{sen}(\pi/2 + \lambda_0) & 0 \\ -\text{sen}(\pi/2 + \lambda_0) & \cos(\pi/2 + \lambda_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{sen}\lambda_0 & -\cos\lambda_0 & 0 \\ -\cos\lambda_0 & -\text{sen}\lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (78)$$

Para a transformação inversa (Geodésica Cartesiana Local para Geodésica Cartesiana), utiliza-se:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + R_3^T(\pi/2 + \lambda_0) \cdot R_1^T(\pi/2 + \varphi_0) \cdot \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} \quad (79)$$

2.6 RELAÇÃO ENTRE COORDENADAS NO ESPAÇO-OBJETO E ESPAÇO-IMAGEM

As equações de colinearidade, nas suas formas direta e inversa, definem um dos modelos matemáticos utilizado com o propósito de relacionar os espaços imagem e objeto por meio de transformações de coordenadas. Tais modelos requerem a determinação dos parâmetros de orientação exterior da imagem, ou seja, as três coordenadas X_{CP} , Y_{CP} , Z_{CP} do ponto onde foi coletada (centro perspectivo), bem como os ângulos $(\omega, \varphi, \kappa)$ que definem a atitude, de maneira que se aplicadas as rotações ao sistema terrestre fazem-no coincidir com o fotogramétrico. Para o desenvolvimento do método proposto nesta pesquisa os parâmetros $(X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}, \omega, \varphi, \kappa)$ considerados como conhecidos.

2.6.1 TRANSFORMAÇÕES DE COORDENADAS ENTRE ESPAÇO-IMAGEM E ESPAÇO-OBJETO

A transformação de coordenadas cartesianas locais (X_l, Y_l, Z_l) em fotogramétricas (x', y') faz uso das equações de colinearidade na sua forma direta (Equações 80 e 81). As equações de colinearidade são deduzidas com base na condição de que um ponto no espaço-objeto (A), seu correspondente no espaço-imagem (a) e o centro perspectivo (CP) pertençam a uma mesma reta (MIKHAIL et al., 2001), conforme:

$$x'_a = -f \frac{m_{11}(X_A - X_{CP}) + m_{12}(Y_A - Y_{CP}) + m_{13}(Z_A - Z_{CP})}{m_{31}(X_A - X_{CP}) + m_{32}(Y_A - Y_{CP}) + m_{33}(Z_A - Z_{CP})} \quad (80)$$

$$y'_a = -f \frac{m_{21}(X_A - X_{CP}) + m_{22}(Y_A - Y_{CP}) + m_{23}(Z_A - Z_{CP})}{m_{31}(X_A - X_{CP}) + m_{32}(Y_A - Y_{CP}) + m_{33}(Z_A - Z_{CP})} \quad (81)$$

com f sendo a distância focal; (x'_a, y'_a) as coordenadas fotogramétricas; (X_A, Y_A, Z_A) coordenadas do ponto no espaço-objeto referidas a um sistema local; (X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}) coordenadas do centro perspectivo no espaço-objeto referidas a um sistema local; m_{ij} elementos da matriz de rotação determinados em função dos ângulos de orientação exterior $(\kappa, \varphi, \omega)$.

A condição prevista nas Equações 80 e 81 é ilustrada na Figura 17, onde os pontos CP, a e A pertencem a uma mesma reta.

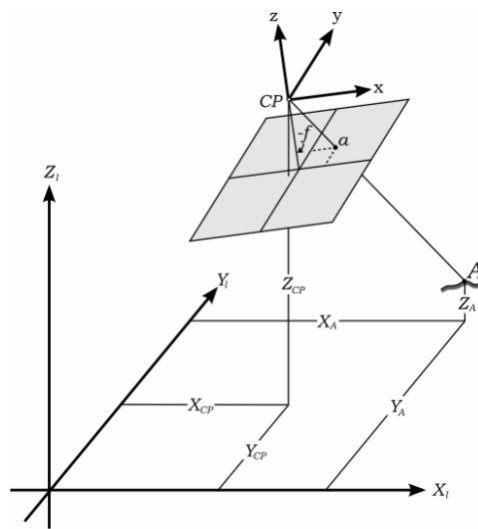


Figura 17: Condição de colinearidade. Fonte: Wolf e Dewitt (2000).

Na sua forma inversa (Equações 82 e 83) as equações de colinearidade permitem a transformação de coordenadas fotogramétricas (x', y') em coordenadas cartesianas locais (X_l, Y_l, Z_l) . Com X_l e Y_l obtidos pelas Equações 82 e 83 respectivamente, e Z_l por informações altimétricas do relevo (MDT).

$$X_A = X_{CP} + (Z_A - Z_{CP}) \frac{m_{11}x'_a + m_{21}y'_a - m_{31}f}{m_{13}x'_a + m_{23}y'_a - m_{33}f} \quad (82)$$

$$Y_A = Y_{CP} + (Z_A - Z_{CP}) \frac{m_{12}x'_a + m_{22}y'_a - m_{32}f}{m_{13}x'_a + m_{23}y'_a - m_{33}f} \quad (83)$$

As equações dadas não são, a rigor, equações inversas das Equações 80 e 81. Isto porque a determinação das coordenadas planimétricas (X_A, Y_A) depende do componente altimétrico (Z_A) , porém isto pode ser resolvido se houver disponibilidade de informações do relevo (DAL POZ, 1998).

2.6.2 TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS UTM PARA COORDENADAS DE IMAGEM

A transformação direta de coordenadas no sistema UTM (N, E) , com altura geométrica h , para o Sistema de Imagem (x_p, y_p) requer uma série de conversões intermediárias entre sistemas do espaço-objeto e espaço-imagem. Nas Equações 84 a 90 estão sistematizadas tais conversões, bem como os parâmetros envolvidos.

- UTM $\rightarrow$ TM

$$\begin{aligned} x &= f_{18}(N_i, E_i) \\ y &= f_{17}(N_i, E_i) \end{aligned} \quad (84)$$

- TM $\rightarrow$ Geodésica

$$\begin{aligned} \varphi &= f_{16}(a, f, x, y) \\ \lambda &= f_{15}(a, f, x, y) \end{aligned} \quad (85)$$

- Geodésica $\rightarrow$ Geodésica Cartesiana

$$\begin{aligned} X &= f_{14}(a, f, \varphi, \lambda, h_i) \\ Y &= f_{13}(a, f, \varphi, \lambda, h_i) \\ Z &= f_{12}(a, f, \varphi, \lambda, h_i) \end{aligned} \quad (86)$$

- Geodésica Cartesiana $\rightarrow$ Geodésica Cartesiana Local

$$\begin{aligned} X_l &= f_{11}(\varphi_0, \lambda_0, h_0, X, Y, Z) \\ Y_l &= f_{10}(\varphi_0, \lambda_0, h_0, X, Y, Z) \\ Z_l &= f_9(\varphi_0, \lambda_0, h_0, X, Y, Z) \end{aligned} \quad (87)$$

- Geodésica Cartesiana Local $\rightarrow$ Fotogramétrica

$$\begin{aligned} x' &= f_8(\kappa, \varphi, \omega, X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}, f, X_l, Y_l, Z_l) \\ y' &= f_7(\kappa, \varphi, \omega, X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}, f, X_l, Y_l, Z_l) \end{aligned} \quad (88)$$

- Fotogramétrica $\rightarrow$ Intermediário

$$\begin{aligned} x_i &= f_6((x', y', x_0, y_0), \text{erros}(\delta d_x, \delta r_x, \delta a_x, d_E)) \\ y_i &= f_5((x', y', x_0, y_0), \text{erros}(\delta d_y, \delta r_y, \delta a_y, d_E)) \end{aligned} \quad (89)$$

- Intermediário $\rightarrow$ Imagem

$$\begin{aligned} C_i &\Leftrightarrow x_p = f_4(\text{dimensões}(W, H, Sx, Sy), x_i, y_i) \\ L_i &\Leftrightarrow y_p = f_3(\text{dimensões}(W, H, Sx, Sy), x_i, y_i) \end{aligned} \quad (90)$$

Acompanhando o desenvolvimento das transformações nota-se que as coordenadas de Imagem (x_p, y_p) são obtidas em função das coordenadas (E, N, h) e de todos os parâmetros envolvidos nas transformações. Pode-se então formular um modelo global, tal como:

$$\begin{aligned} C_i &= f_2(P_{ar}, V_i), \\ L_i &= f_1(P_{ar}, V_i), \end{aligned} \quad (91)$$

onde (L_i, C_i) são as coordenadas linha e coluna no sistema de imagem de um ponto i ; P_{ar} é o vetor de parâmetros envolvidos (os parâmetros de orientação interior e exterior da imagem, os parâmetros geométricos elipsoidais e os parâmetros relacionados com a projeção UTM); e V_i é o vetor de coordenadas (E_i, N_i, h_i) do ponto i no sistema UTM com altura geométrica h . Considerando que vetor P_{ar} é conhecido, um ponto no espaço-imagem pode ser expresso em função somente de V_i .

2.7 PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

A programação dinâmica é uma técnica para resolver problemas de otimização quando nem todas as variáveis envolvidas estão simultaneamente inter-relacionadas (BALLARD e BROWN, 1982).

Esta estratégia de otimização para problemas combinatórios envolve a tomada de decisões sequenciais, aqui brevemente descrita por meio da análise da Figura 18, que apresenta o problema clássico da programação dinâmica (LI, 1997) expresso na forma de grafo. No grafo, deve-se encontrar o caminho ótimo entre os nós A e N . O primeiro passo consiste na escolha do caminho entre o nodo A e um dos três nós a ele relacionados (10, 11 ou 12). Se o nó 11 for o escolhido, então a próxima decisão deve ser tomada entre os nós 20, 21 e 22, assim por diante até atingir o nó N .

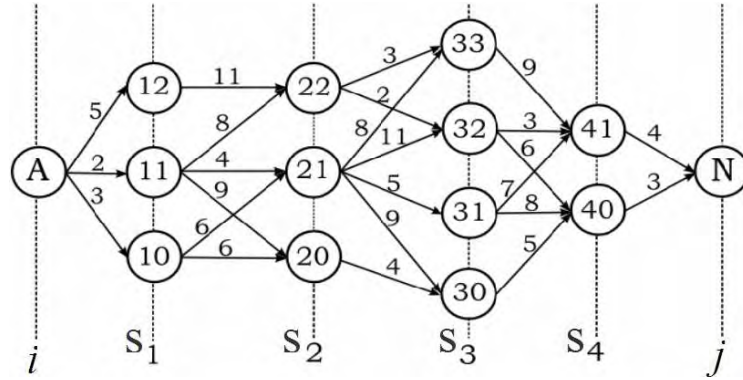


Figura 18: Problema clássico de programação dinâmica. Fonte: Li (1997).

Li (1997) formaliza tal problema definindo um conjunto de nós $\{P_i\}$, $i=1,2,\dots,n$, com uma matriz custo associada $[C_{ij}]$, na qual C_{ij} denota o custo para mover-se do nó P_i para o nó P_j .

Assumindo que uma função de duas variáveis $g(i, j)$ descreve o custo (função custo) para se mover do nó P_i ao nó P_j e s os nós ao longo do caminho, pode-se escrever a equação:

$$g(i, j) = g(i, s) + g(s, j) \quad (92)$$

Para definir o caminho ótimo entre os nós P_i e P_j , é necessário encontrar $g(i, j)$ e um conjunto de nós s que satisfaçam a condição imposta. A otimização do problema clássico apresentado na Figura 18 é obtida ao encontrar o menor custo global (ou custo mínimo) para ir do nó inicial P_A ao nó final P_N , bem como o caminho associado.

$$g(i, j) = \min_s [g(i, s) + g(s, j)] \quad (93)$$

Nas condições estabelecidas anteriormente, Ballard e Brown (1982) detalham os passos para obter o custo global e o caminho a ele associado, com i dependendo exclusivamente de s_1 em g_0 , s_1 dependendo de s_2 em g_1 e assim por diante até g_{N-1} , desta forma pode-se decompor o problema da forma como segue.

$$g(i, j) = \min_{s_i} [g_0(i, s_1) + g_1(s_1, s_2) + g_2(s_2, s_3) + g_3(s_3, s_4) + g_4(s_4, j)] \quad (94)$$

Selecionando o valor mínimo de i em g_0 e armazenando este valor ótimo de $g_0(i, s_1)$ para cada s_1 obtém-se $f_0(s_1)$.

$$f_0(s_1) = \min_{s_0} [g_0(i, s_1)] \quad (95)$$

No passo seguinte $g_1(s_1, s_2)$ será acrescido de $f_0(s_1)$ e o processo repetido:

$$f_1(s_2) = \min_{s_1} [f_0(s_1) + g_1(s_1, s_2)]. \quad (96)$$

Assim, sucessivamente até $\min_{s_N} f_{N-1}(s_N)$, que apresentará o custo mínimo global com o respectivo caminho associado, ou seja, $\min_{s_N} f_{N-1}(s_N) = \min_{s_i} g(s_1, \dots, s_n)$. Este procedimento pode ser generalizado para N variáveis, considerando o acréscimo a $g_0(i, s_1)$ em $f_0(s_1)$ igual a 0, por não haver custo parcial a ser acrescido.

$$f_{n-1}(s_n) = \min_{s_{n-1}} [f_{n-1}(s_{n-1}) + g_{n-1}(s_{n-1}, s_n)]. \quad (97)$$

No problema da Figura 18 o caminho ótimo é definido pelos nós $A, 11, 22, 32, 41, N$ e o custo mínimo associado é 19.

A formulação apresentada, que neste caso busca o custo mínimo, pode ser modificada para problemas de máximos, bastando substituir o operador $\min[.]$ pelo operador $\max[.]$ (LI, 1997).

2.8 MODELOS MATEMÁTICOS DE RODOVIA

Os modelos de rodovias são formulações matemáticas que englobam nos seus parâmetros as particularidades geométricas e radiométricas deste tipo de feição. Serão apresentados nas seções seguintes os diferentes modelos matemáticos para rodovias no espaço-imagem e espaço-objeto.

2.8.1 MODELO MATEMÁTICOS DE RODOVIA NO ESPAÇO-IMAGEM

Várias propriedades geométricas e radiométricas são usadas para formular um modelo de rodovia no espaço-imagem (GRUEN e LI 1997; DAL POZ e VALE, 2003; DAL POZ et al., 2006; GALLIS, et al. 2005). Assumindo que uma rodovia possa ser representada pela linha poligonal $P^j = \{p_1, \dots, p_n\}$, onde p_i é seu i -ésimo vértice, pode-se modelá-la matematicamente através da função objetivo (Equação 98) e da injeção de desigualdade (Equação 99), como segue (GRUEN e LI, 1997),

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} ([E_{p_1} - \beta E_{p_2} + \gamma E_{p_3}] \times (1 + \cos(\alpha_1 - \alpha_{i+1})) / |\Delta_{s_i}|) \quad (98)$$

$$C_i = |\alpha_i - \alpha_{i+1}| < T \quad (99)$$

onde, E_{p_1} é uma função que depende do vértice p_i e expressa o fato de que os pixels de rodovia são mais claros que seus vizinhos em ambas as margens da rodovia; E_{p_2} é uma função que depende de dois pontos consecutivos (p_{i-1} e p_i) da linha poligonal P^i e expressa o fato de que os níveis de cinza ou cor da rodovia não variam muito, sobretudo em curtas distâncias; E_{p_3} é uma função que depende do vértice p_i e expressa o fato de que uma rodovia é uma feição linear de alto valor de brilho; α_i é a direção do segmento de reta definido pelos pontos p_{i-1} e p_i ; β e γ são constantes positivas; $|\Delta_{s_i}|$ é a distância entre os pontos p_{i-1} e p_i ; e T é um limiar angular que limita a mudança de direção entre dois segmentos sucessivos da linha poligonal P^i .

A Equação 98 mostra que somente três pontos consecutivos (p_{i-1} , p_i , p_{i+1}) da linha poligonal P são simultaneamente inter-relacionados e que, em decorrência, pode ser decomposta numa soma de $n-1$ subfunções do tipo $E_i(p_{i-1}, p_i, p_{i+1})$, conforme mostra a Equação 100. Maiores detalhes podem ser visto em Gruen e Li (1997).

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) \quad (100)$$

A solução deste problema é uma linha poligonal $P^i = \{p_1, \dots, p_n\}$ que representa uma rodovia e corresponde ao máximo da função objetivo dada pela Equação 98 ou 100. Esta função é apropriada para a extração semi-automática de rodovias em imagens de baixa-resolução, com rodovias variando em espessura de 1 a 3 pixels. A fim de possibilitar a extração acurada do eixo de rodovia em imagens de maior resolução, Dal Poz e Vale (2003) propuseram uma modificação na Equação 100. Basicamente, um termo de injeção de borda foi adicionado na função objetivo original, forçando a linha poligonal extraída a coincidir com o eixo da rodovia. Na função objetivo modificada, somente os vértices consecutivos (p_{i-1} , p_i , p_{i+1}) da linha poligonal P^i e as larguras da rodovia (w_{i-1} , w_i , w_{i+1}) nestes vértices são simultaneamente inter-relacionados, ficando,

$$E^m = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, w_{i-1}, w_i, w_{i+1}) \quad (101)$$

A Equação 101 mostra que o objetivo do processo de otimização é similar ao que é baseado na Equação 100. A diferença básica é que o processo de otimização fornece não só a linha poligonal $P^j = \{p_1, \dots, p_n\}$ representando o eixo da rodovia, mas também as larguras da rodovia nos respectivos vértices.

2.8.2 MODELO MATEMÁTICO DE RODOVIA NO ESPAÇO-OBJETO PARA UMA IMAGEM ISOLADA

As Equações 100 e 101 podem ser modificadas a fim de expressar as rodovias em função de coordenadas 3D do espaço-objeto (GALLIS et al., 2005; DAL POZ et al., 2006). O sistema de coordenadas do espaço-objeto escolhido para representar os vértices 3D do eixo de rodovia é o UTM (*Universe Transverse Mercator*) (E, N) com altura elipsoidal ou geométrica (h). A relação matemática, entre um ponto $P(E, N, h)$ no espaço-objeto e seu correspondente ponto $p(L, C)$ no espaço-imagem, é estabelecida levando em conta três passos (GALLIS et al., 2005):

- Primeiro, tendo em vista uma solução rigorosa para o problema, é necessário relacionar matematicamente um ponto no sistema UTM com altura elipsoidal (h) ao correspondente ponto $P(X, Y, Z)$ no sistema cartesiano local de coordenadas.
- Segundo, as equações de colinearidade são usadas, juntamente com os parâmetros de orientação exterior, para transformar o ponto $P(X, Y, Z)$ no sistema de coordenadas fotogramétricas.
- Terceiro, o ponto resultante desta última operação matemática é transformado para o sistema de coordenadas de pixel (L, C), valendo-se do modelo de orientação interior e os parâmetros associados.

Assumindo que todas as operações matemáticas, entre as coordenadas de um ponto p_i no sistema de coordenadas de pixel (L_i, C_i) e as coordenadas do ponto correspondente no sistema de referência UTM com altura elipsoidal (E_i, N_i, h_i), possam ser estabelecidas através de duas funções conhecidas f_1 e f_2 (Equação 91), tem-se:

$$p_i(L_i, C_i) = p_i(f_1(V_i), f_2(V_i)) = p_i(f_1(E_i, N_i, h_i), f_2(E_i, N_i, h_i)). \quad (102)$$

Incorporando a expressão 102 na equação 100 obtém-se:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}(L_{i-1}, C_{i-1}), p_i(L_i, C_i), p_{i+1}(L_{i+1}, C_{i+1})) = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}(f_1(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), f_2(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1})), p_i(f_1(E_i, N_i, h_i), f_2(E_i, N_i, h_i)), p_{i+1}(f_1(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}), f_2(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}))) \quad (103)$$

A Equação 103 mostra que ela depende simultaneamente das coordenadas de três pontos sucessivos da linha poligonal que representa a rodovia no espaço-objeto, quais sejam: $P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1})$, $P_i(E_i, N_i, h_i)$ e $P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1})$. Assim a Equação 103 pode ser simplificada e escrita como segue:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), P_i(E_i, N_i, h_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1})). \quad (104)$$

A Equação 104 parece, em primeira análise, apropriada para a extração de rodovias no espaço-objeto usando apenas uma imagem de baixa-resolução. Isso não é possível porque a Equação 104 é ambígua, visto que existe uma classe não limitada de linhas poligonais que possibilitam obter um mesmo valor máximo para E. Isto decorre da conhecida propriedade da Equação 91, pela qual existem infinitos pontos no espaço-objeto que mapeiam para um mesmo ponto no espaço-imagem. Em Gallis et al. (2005) e Dal Poz et al. (2006) essa ambigüidade foi removida forçando a rodovia extraída a pertencer à superfície de um MDT.

Em se tratando de imagens de média e alta-resolução, demonstra-se que a Equação 100 pode ser modificada e expressa na forma (GALLIS et al., 2005; DAL POZ et al., 2006),

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), P_i(E_i, N_i, h_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}), W_{i-1}, W_i, W_{i+1}) \quad (105)$$

onde, W_{i-1} , W_i , e W_{i+1} são as larguras no espaço-objeto da rodovia nos pontos P_{i-1} , P_i , e P_{i+1} , respectivamente. A Equação 105 é desenvolvida seguindo os mesmos princípios para se obter a Equação 104. Nesse caso é necessário também transformar as larguras da rodovia no espaço-imagem ($w_1, \dots, w_{n-1}$) para as correspondentes larguras no espaço-objeto ($W_1, \dots, W_{n-1}$).

2.8.3 MODELO MATEMÁTICO DE RODOVIA NO ESPAÇO-OBJETO PARA UM ESTÉREO PAR DE IMAGENS

A Figura 19 ilustra o princípio do método desenvolvido por Gallis (2006) e apresentado nesta seção, onde R é uma rodovia no espaço-objeto, cujas as correspondentes nas imagens da esquerda e da direita são respectivamente r e r' . Para traçar uma rodovia no espaço-objeto, via otimização de um modelo matemático de rodovia, é necessário que as propriedades geométricas e radiométricas de rodovia, além das relações matemáticas entre pontos de ambos os espaços envolvidos, sejam modeladas. A solução para este problema difere da solução fotogramétrica seqüencial geralmente empregada para extrair rodovias e outros objetos em 3D. A solução fotogramétrica seqüencial emprega três etapas básicas: a extração de rodovias homólogas (r e r') em ambas as imagens; a determinação de correspondência, geralmente ponto a ponto (p e p'), entre as rodovias r e r' ; a projeção das rodovias homólogas para o espaço-objeto, a fim de obter a rodovia R . A solução proposta por Gallis (2006) integra todas estas etapas numa única, tendo por base o modelo matemático de rodovia a ser desenvolvido abaixo.

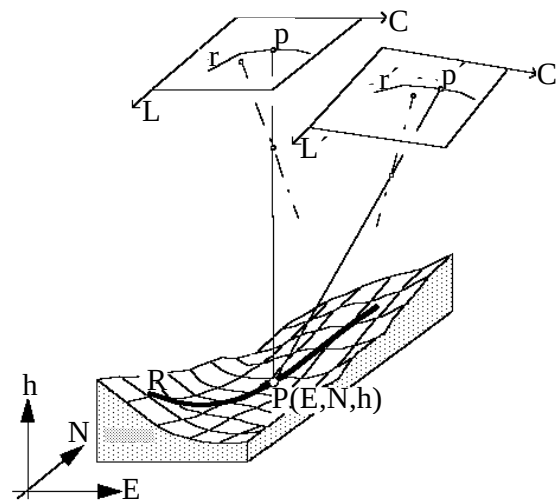


Figura 19: Extração da rodovia no espaço-objeto. Fonte: Gallis (2006).

O desenvolvimento do modelo matemático de rodovia no espaço-objeto, que leva em conta informações radiométricas provenientes de um estéreo par de imagens, requer que a Equação 105 seja escrita para cada imagem (GALLIS, 2006),

$$\begin{aligned}
 E^l &= E_1^l(P_0(E_0, N_0, h_0), P_1(E_1, N_1, h_1), P_2(E_2, N_2, h_2), W_0, W_1, W_2) + \\
 &E_2^l(P_1(E_1, N_1, h_1), P_2(E_2, N_2, h_2), P_3(E_3, N_3, h_3), W_1, W_2, W_3) + \dots + \\
 &E_{n-1}^l(P_{n-2}(E_{n-2}, N_{n-2}, h_{n-2}), P_{n-1}(E_{n-1}, N_{n-1}, h_{n-1}), P_n(E_n, N_n, h_n), W_{n-2}, W_{n-1}, W_n)
 \end{aligned} \tag{106}$$

$$\begin{aligned}
E^r = & E_1^r(P_0(E_0, N_0, h_0), P_1(E_1, N_1, h_1), P_2(E_2, N_2, h_2), W_0, W_1, W_2) + \\
& E_2^r(P_1(E_1, N_1, h_1), P_2(E_2, N_2, h_2), P_3(E_3, N_3, h_3), W_1, W_2, W_3) + \dots + \\
& E_{n-1}^r(P_{n-2}(E_{n-2}, N_{n-2}, h_{n-2}), P_{n-1}(E_{n-1}, N_{n-1}, h_{n-1}), P_n(E_n, N_n, h_n), W_{n-2}, W_{n-1}, W_n)
\end{aligned} \quad (107)$$

onde, E^l é o modelo matemático de rodovia escrito para a imagem esquerda e E^r para a imagem direita.

Seja $P = \{P_0(E_0, N_0, h_0); \dots; P_n(E_n, N_n, h_n)\}$ uma linha poligonal representando uma rodovia no espaço-objeto. Assim, a linha poligonal P , juntamente com as larguras corretas da rodovia nos vértices de P , maximizam as Equações 106 e 107. Entretanto, a solução P não pode ser obtida usando a Equação 106 ou 107 isoladamente porque as mesmas são ambíguas. É possível provar que a soma das funções E^l e E^r não é ambígua, isto é, ela possui uma solução única (P) para o eixo da rodovia R (GALLIS, 2006; DAL POZ, 2010), preservando a estrutura da Equação 105, o que é fundamental para a aplicação do algoritmo de otimização por programação dinâmica.

Seja P' uma linha poligonal que maximiza a função E^l . Se P' não coincide com o eixo da rodovia R (isto é, P' é uma falsa solução de E^l), então ela não maximizará a função E^r . Se o mesmo raciocínio for aplicado para uma outra linha poligonal P'' , tem-se então uma falsa solução da função E^r . Em outras palavras, P' e P'' maximizariam ambas as funções E^l e E^r , se e somente se, $P' = P'' = P$. Como E^l e E^r são funções positivas, P é a única solução de máximo do modelo matemático de rodovia definido pela soma das funções E^l e E^r . Somando então as funções E^l e E^r e agrupando os termos, obtém-se o modelo matemático de rodovia (E^T) formulado no espaço-objeto para um estéreo par de imagens, como segue:

$$\begin{aligned}
E^T = E^l + E^r = & [E_1^l(P_0(E_0, N_0, h_0), P_1(E_1, N_1, h_1), P_2(E_2, N_2, h_2), W_0, W_1, W_2) + \\
& E_1^r(P_0(E_0, N_0, h_0), P_1(E_1, N_1, h_1), P_2(E_2, N_2, h_2), W_0, W_1, W_2)] + \dots + \\
& [E_{n-1}^l(P_{n-2}(E_{n-2}, N_{n-2}, h_{n-2}), P_{n-1}(E_{n-1}, N_{n-1}, h_{n-1}), P_n(E_n, N_n, h_n), W_{n-2}, W_{n-1}, W_n) + \\
& E_{n-1}^r(P_{n-2}(E_{n-2}, N_{n-2}, h_{n-2}), P_{n-1}(E_{n-1}, N_{n-1}, h_{n-1}), P_n(E_n, N_n, h_n), W_{n-2}, W_{n-1}, W_n)]
\end{aligned} \quad (108)$$

Na Equação 108 pode-se notar que o i -ésimo termo entre colchete depende de três vértices sucessivos (P_{i-1} , P_i , e P_{i+1}) da linha poligonal e das respectivas larguras de rodovia (W_{i-1} , W_i , e W_{i+1}). Assim, a notação acima pode ser

simplificada, substituindo os termos entre os colchetes ($i = 1, \dots, n-1$) com base na seguinte expressão geral,

$$E_i^T (P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), P_i(E_i, N_i, h_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}), W_{i-1}, W_i, W_{i+1}) = \\ [E_i^l (P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), P_i(E_i, N_i, h_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}), W_{i-1}, W_i, W_{i+1}) + \\ E_i^r (P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), P_i(E_i, N_i, h_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}), W_{i-1}, W_i, W_{i+1})] \quad (109)$$

possibilitando escrever a equação 108 na forma,

$$E^T = \sum_{i=1}^{n-1} E_i^T (P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), P_i(E_i, N_i, h_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}), W_{i-1}, W_i, W_{i+1}) \quad (110)$$

A Equação 110 mostra que a estrutura da Equação 105 foi plenamente preservada. Embora esta equação tenha 12 variáveis inter-relacionadas simultaneamente, é possível reduzir o número de variáveis e, conseqüentemente, diminuir também o esforço computacional. De forma análoga, tendo por base agora a equação 110, pode-se desenvolver uma equação para um estéreo par de imagens de baixa resolução, sem as injunções de bordas. O resultado desse desenvolvimento é apresentado na Equação 111.

$$E^T = \sum_{i=1}^{n-1} E_i^T (P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), P_i(E_i, N_i, h_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1})) \quad (111)$$

No Capítulo 3 esta equação será retomada para desenvolvimento da metodologia.

2.9 MODELAGEM DE SUPERFÍCIE

A utilização do conceito de modelo digital para representar a superfície terrestre é relativamente recente. No artigo de autoria dos engenheiros Charles Miller e R. A. LaFlamme do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), intitulado *The digital terrain model – theory and applications*, publicado em 1958 na revista *Photogrammetric Engineering*, v.24, p. 433-442; o termo Modelo Digital de Terreno (MDT), foi utilizado pela primeira vez. No referido trabalho o MDT é definido como uma modelagem matemática da superfície contínua do terreno por um número de pontos que permita atingir o grau de exatidão requerida (MILLER e LAFLAMME, 1958 *apud* EL-SHEIMY, 1999).

A representação digital da superfície terrestre está atualmente associada a uma estrutura de dados, um conjunto de funções matemáticas para a realização das interpolações entre os pontos amostrados e a exatidão esperada na obtenção dos dados altimétricos. (MIKHAIL et al., 2001).

Com o avanço das técnicas e aplicações dos modelos digitais de terreno, diferentes terminologias surgiram. Egels e Kasser (2002) fazem referência aos termos MDE, MDT e MDS. Os autores definem Modelo Digital de Elevação (MDE) como uma representação matemática e digital de um objeto e seu ambiente, destacando que, por se tratar de um conceito genérico, pode-se referir a elevação do terreno, mas também a qualquer nível acima dele. Quando a informação é limitada a elevação do terreno, o MDE é chamado de Modelo Digital do Terreno (MDT) e fornece informações sobre a elevação de qualquer ponto do terreno. Quando a informação se refere a elevação máxima de cada ponto, provenientes do terreno ou acima dele, o MDE é chamado de Modelo Digital de Superfície ou MDS (EGELS e KASSER, 2002).

2.9.1 FONTES DE DADOS PARA GERAÇÃO DO MDT

A construção do MDT consiste em um processo de amostragem dos dados originais do terreno (elevações) e o estabelecimento das relações entre eles. Tais dados são obtidos de diferentes formas, sendo as mais comuns curvas de nível digitalizadas, métodos fotogramétricos ou levantamento de campo. Outras fontes de dados estão disponíveis atualmente, tais como radar, laser altimétrico e radar de abertura sintética (SAR) interferométrico.

As curvas de nível são obtidas normalmente por digitalização de mapas analógicos, que constituem uma fonte abundante de dados devido aos acervos disponíveis. O levantamento de campo só é viável para projetos específicos que envolvam pequenas áreas pois demandam muito tempo na coleta. Já os dados obtidos por Fotogrametria derivam de duas fontes principais: as fotografias aéreas e as imagens de satélite.

Segundo Schenk (1996) a geração do MDT a partir de um estereomodelo orientado compreende três etapas principais:

1. Correspondência de imagens: consiste em encontrar pontos homólogos;

2. Modelagem de superfície: consiste em interpolar e densificar uma superfície e;

3. Controle de qualidade: consiste em verificar e editar o MDT.

Atualmente os sistemas fotogramétricos digitais executam de forma automática as duas primeiras etapas, ficando a cargo do operador a terceira etapa, que consiste no controle de qualidade.

2.9.2 ESTRUTURAS DE DADOS PARA MDT'S

Para construir um MDT é necessário estabelecer as relações topológicas entre os elementos amostrais, bem como o modelo de interpolação utilizado para aproximar o comportamento da superfície. Assim, um modelo de superfície eficiente deve possuir as seguintes características (EL-SHEIMY,1999):

- Representar a superfície dentro da acurácia desejada;
- Ser adequado para a eficiente coleta de dados;
- Minimizar os requisitos de armazenamento de dados;
- Maximizar a eficiência na manipulação de dados; e
- Ser adequado para a análise de superfície.

Três métodos são comumente utilizados para representar superfícies na forma digital: curvas de nível, malha regular e rede irregular de triângulos (TIN).

2.9.2.1 CURVAS DE NÍVEL

Representações comuns da superfície as curvas de nível ou isolinhas indicam elevações por meio de contornos. El-Sheimy (1999) destaca como uma das principais desvantagens deste tipo de representação o fato de indicarem as elevações da superfície somente ao longo das isolinhas, assim as anomalias entre duas curvas não podem ser representadas. A elevação de pontos entre as isolinhas é obtida por interpolação.

2.9.2.2 MALHA REGULAR

A malha regular ou *grid* é uma estrutura matricial de dados que armazena uma amostra de pontos com uma origem comum e uma distância de amostragem constante nas direções X e Y, ou seja, com dados planimétricos indicados por linha e coluna da matriz. Cada ponto da malha possui um valor de elevação Z (EL-SHEIMY, 1999)

Neste tipo de representação de superfície, o valor Z de pontos vizinhos aos amostrados pode ser obtido de forma aproximada por meio de interpolações entre os pontos adjacentes amostrados na malha.

El-Sheimy (1999) destaca que se pode aumentar a acurácia desta representação diminuindo o intervalo entre os pontos, porém é importante destacar que:

- Um intervalo muito grande entre os pontos provoca a perda de variações de relevo da superfície,
- Diminuindo a distância entre os pontos pode resultar em um aumento na redundância dos dados. Isso principalmente nas áreas de superfície onde não existe uma variação de relevo muito grande (áreas planas).

2.9.2.3 REDE IRREGULAR DE TRIÂNGULOS (TIN)

A Rede Irregular de Triângulos, ou TIN (*Triangulated Irregular Network*) sigla em inglês, é um modelo que gera uma superfície a partir de um conjunto de pontos irregularmente distribuídos. Ao contrário do modelo de malha regular, nesta estrutura os pontos amostrais irregularmente distribuídos podem ser adaptados ao terreno, com mais pontos nas áreas mais acidentadas do terreno e menos pontos nas áreas mais suaves (EL-SHEIMY, 1999). Desta forma a amostragem irregularmente espaçada é mais eficiente na representação de superfícies com variação de relevo do que a amostragem regularmente espaçada.

No modelo TIN os pontos amostrais são conectados por linhas que formam triângulos e, em cada triângulo, a superfície é geralmente representada como um plano. O modelo da superfície gerado é contínuo, uma vez que cada superfície de triângulo é definida pelas elevações dos três vértices e os triângulos são adjacentes.

Uma das vantagens deste modelo é que os pontos de amostragem distribuídos irregularmente podem ser adaptados para o terreno com mais pontos em áreas de terreno acidentado e menos em áreas de terreno liso. Assim, o modelo TIN é atraente por causa da simplicidade e economia (EL-SHEIMY, 1999).

Embora haja uma série de algoritmos disponíveis para a formação de um TIN a partir de dados irregularmente distribuídos, geralmente, existem três requisitos básicos (LI et al., 2004):

1. Para um dado conjunto de pontos, o TIN resultante deve ser único se o mesmo algoritmo é utilizado, embora se possa iniciar a partir de diferentes lugares, por exemplo, o centro geométrico, o canto superior esquerdo, canto inferior esquerdo ou outros pontos.
2. As formas geométricas dos triângulos resultantes são ótimas, isto é, cada triângulo é aproximadamente equilátero se não há condições específicas.
3. Cada triângulo é formado pelos pontos vizinhos mais próximos, ou seja, a soma dos três lados do triângulo é mínima.

Entre as alternativas possíveis, a triangulação de Delaunay é a mais utilizada, pois satisfaz os três requisitos (LI et al., 2004). A triangulação de Delaunay pode ser derivada a partir do diagrama de Voronoi (Figura 20). Assim, uma abordagem é construir um diagrama de Voronoi e, em seguida, obter a triangulação de Delaunay .

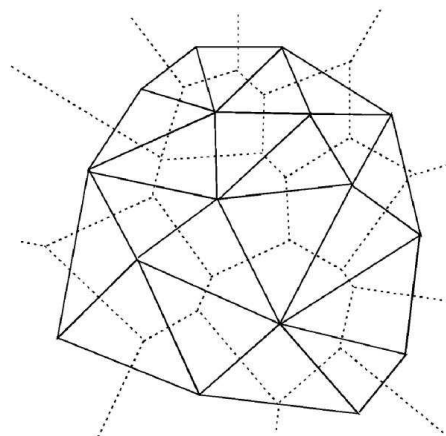


Figura 20: Diagrama de Voronoi e Triangulação de Delaunay. Fonte: Li et al. (2004).

Uma das condições da triangulação de Delaunay é garantir que um círculo circunscrito (circunferência) em cada triângulo não possua outros pontos.

2.10 B-SPLINE

Em geral, uma curva que possua forma complexa pode ser modelada por várias outras curvas conectadas em seus pontos extremos. A maneira como tais curvas estarão conectadas é definida por diferentes níveis de continuidade (FIGURA 21). O nível mais simples de continuidade é de ordem zero (C^0) e assegura que uma curva ou a união de curvas não terá descontinuidade. O nível seguinte é de primeira ordem (C^1) e indica que a inclinação ou sua derivada primeira da curva é constante em todos os pontos. A continuidade de segunda ordem (C^2) implica em continuidade na derivada segunda da curva e assim por diante (AZEVEDO e CONCI, 2003).

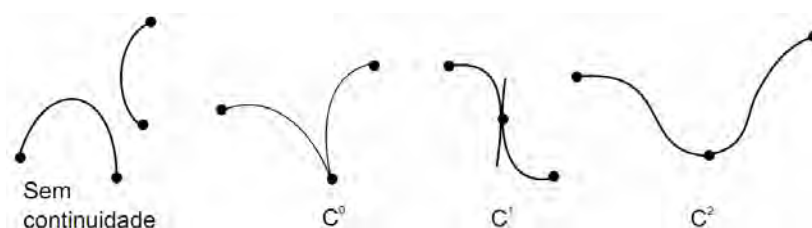


Figura 21: Níveis de continuidade na união de duas curvas. Fonte: Azevedo e Conci (2003).

Uma curva modelada usando os vértices de um polígono de controle é dependente de algum método de interpolação ou de aproximação para estabelecer a relação entre a curva e o polígono de controle. Esta e outras características da curva são definidas pela função base utilizada na modelagem. Nesta pesquisa foi adotada para a modelagem da curva o método de aproximação por meio de uma função base B-Spline (Base Spline), que é uma função Spline.

A teoria das curvas Splines foi desenvolvida por Schoenberg na década de 60 e faz alusão ao termo da língua inglesa (*Spline*) utilizado para designar a régua flexível usada para desenhar curvas livres suaves, com continuidade de segunda ordem (C^2). A expressão matemática que descreve essa régua é denominada Spline Cúbica Natural. Nessa expressão alterações em qualquer um dos pontos de controle provocam alterações em toda a curva. (AZEVEDO e CONCI, 2003).

A B-spline é uma “versão” da Spline Natural, que apresenta um comportamento não global, pois cada vértice B_i afeta a forma da curva somente em uma faixa de valores de parâmetro em que a sua função base associada é diferente

de zero. A B-spline permite também alterar a ordem da função base e, portanto, o grau da curva resultante, sem alterar o número de vértices do polígono de controle, ou seja, o grau do polinômio pode ser selecionado de maneira independente do número de pontos de controle (ROGERS, 2001; AZEVEDO e CONCI, 2003). Ao contrário da Spline, a função B-Spline não passa pelos pontos de controle (FIGURA 22). Tais características tornam a B-Spline bastante eficiente na modelagem de curvas longas e complexas que possuam abundante número de pontos de controle.

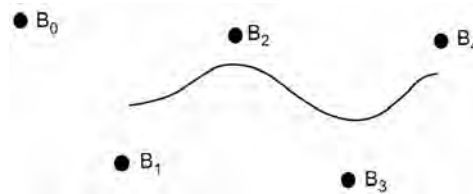


Figura 22: A função B-Spline não passa pelos pontos de controle. Fonte: Azevedo e Conci (2003).

Do ponto de vista matemático, sendo $P(t)$ o vetor posição em função do parâmetro t ao longo da curva, um conjunto de funções de base $N_{i,k}(t)$ combina o efeito dos pontos de controle B_i ($i = 0, 1, \dots, n$) para gerar a curva B-Spline:

$$P(t) = \sum_{i=0}^n B_i N_{i,k}(t) \quad (112)$$

O parâmetro k controla a ordem de continuidade da curva, e n o número de pontos de controle usados. $N_{i,k}$ representa as funções polinomiais. Cada uma das funções $N_{i,k}(t)$ é definida de maneira recursiva pelas equações de Cox - e de Boor (ROGERS, 2001; AZEVEDO e CONCI, 2003):

$$N_{i,1}(t) = \begin{cases} 1 & \text{para } t_i \leq t \leq t_{i+1} \\ 0 & \text{nos demais intervalos} \end{cases} \quad (113)$$

$$N_{i,k}(t) = \left(\frac{t - t_i}{t_{i+k-1} - t_i} \right) N_{i,k-1}(t) + \left(\frac{t_{i+k} - t}{t_{i+k} - t_{i+1}} \right) N_{i+1,k-1}(t) \quad (114)$$

Essa formulação requer a escolha de um conjunto de valores t_i chamados nós, que se relacionam ao parâmetro t . Como o denominador pode se tornar zero, a convenção $0/0 = 0$ é adotada. Os valores de t_i são elementos de um vetor nó que satisfaçam a relação $t_i \leq t_{i+1}$. Um mesmo valor t_i não deve aparecer mais que k vezes. Os valores dos nós influenciam bastante as funções de combinação $N_{i,k}(t)$ e, portanto, a curva gerada (ROGERS, 2001; AZEVEDO e CONCI, 2003).

3 METODOLOGIA PARA EXTRAÇÃO DE RODOVIAS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo será apresentada a metodologia semi-automática de extração de rodovias no espaço-objeto baseado na otimização por programação dinâmica, integrando um estéreo par de imagens aéreas de baixa resolução e um MDT. O texto está organizado em duas seções, sendo descritas na primeira (Seção 3.2) as etapas previstas pela metodologia e, em seguida (Seção 3.3) é apresentada uma descrição ilustrativa das etapas da metodologia de extração, tendo por base dados reais.

3.2 METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta faz uso de um estéreo par de imagens aéreas de baixa resolução e um MDT gerado com pontos altamente adensados, para realizar a reconstrução da cena no espaço-objeto (Figura 23), possibilitando a aplicação dos procedimentos de extração semi-automática da malha viária neste domínio. Considera-se uma imagem de baixa resolução aquela que contenha rodovias cuja largura no espaço-imagem seja igual ou inferior a 3 pixels (VALE, 2003). O uso do estéreo par viabiliza ainda o acesso a dados radiométricos da cena, capturados em diferentes momentos, para minimizar os problemas de oclusão. O MDT em questão pode ser gerado automaticamente em sistemas fotogramétricos digitais, preferencialmente com imagens com média ou alta resolução, garantindo assim maior precisão à superfície gerada.

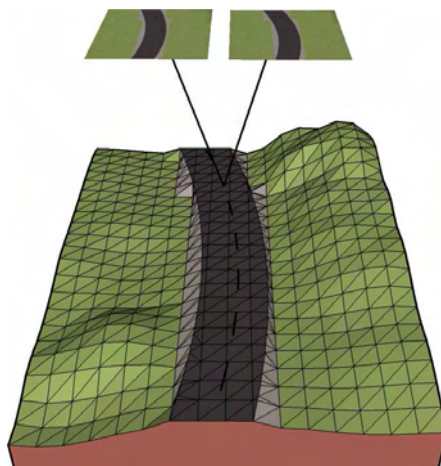


Figura 23: Reconstrução por estéreo par e MDT da cena contendo a rodovia.

O processo de extração inicia com uma linha poligonal definida por alguns pontos sementes marcados pelo operador no espaço-imagem. Tais pontos podem ser fornecidos de várias maneiras, inclusive diretamente sobre o estéreo par por meio de pontos que em seguida são projetados no espaço-objeto. Como os pontos sementes projetados no espaço-objeto necessitam apenas de localização aproximada, ao longo ou próxima da rodovia, uma determinação grosseira dos pontos homólogos no estéreo par é suficiente, ou até mesmo dispensável.

Nas etapas seguintes a linha poligonal inicial (Figura 24a) é progressivamente adensada e refinada em um ciclo iterativo de otimização, de forma a descrever o eixo da rodovia. A densificação é realizada via interpolação linear de pontos centrais entre cada par de vértices preexistentes. A Figura 24b ilustra o procedimento indicando os novos vértices interpolados na cor vermelha.

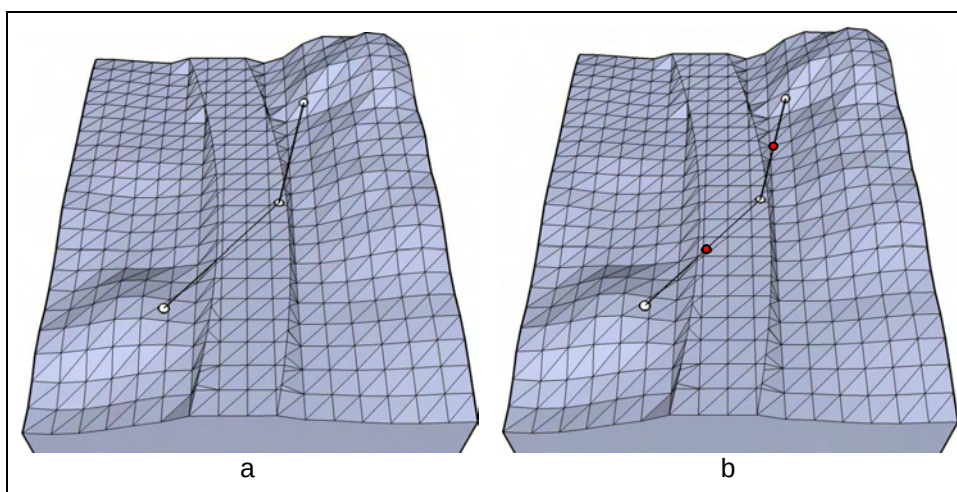


Figura 24: (a) Linha poligonal definida por três pontos sementes. (b) Dois novos vértices interpolados.

Cada vértice da linha poligonal adensada serve de referência para gerar um espaço de busca composto pelos vértices das linhas poligonais candidatas à linha poligonal ótima na iteração atual. As linhas poligonais candidatas são geradas durante o ciclo de otimização deixando cada vértice da linha poligonal de referência mover-se em torno da sua respectiva posição inicial. Em geral, se m for o número de vértices candidatos numa janela de busca e n a quantidade de vértices que formam cada linha poligonal candidata, haveria m^n linhas poligonais candidatas no espaço de busca. Para minimizar o número de vértices candidatos a serem analisados, o espaço de busca será limitado em cada vértice a uma linha, denominada *linha de busca* (Figura 25b).

As linhas de busca serão definidas em cada vértice pela intersecção de planos perpendiculares à linha poligonal de referência, com o poliedro constituído a partir do MDT (Figura 25a,b).

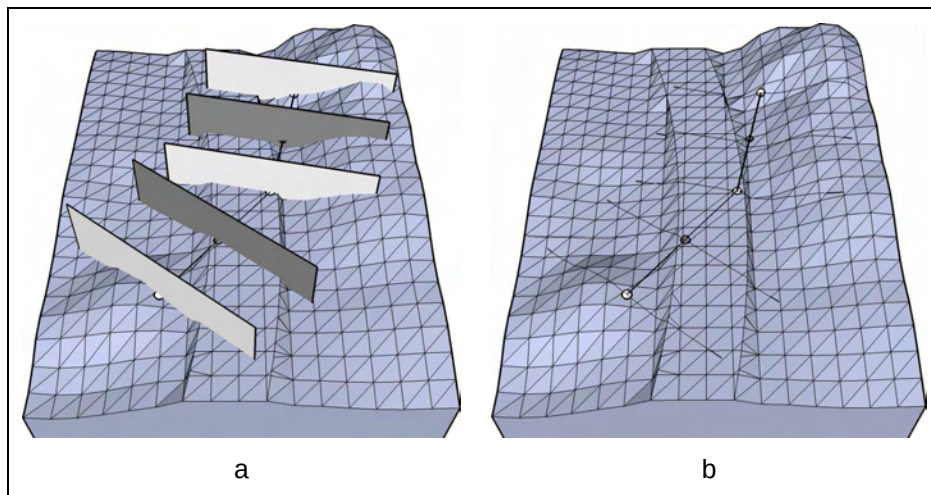


Figura 25: (a) Planos perpendiculares a linha poligonal de referência.(b) Linhas de busca definidas.

A Figura 25b ilustra um conjunto de linhas de busca obtidas conforme detalhado, sendo importante salientar que as linhas de busca são linhas poligonais, isto é, formadas por segmentos de reta conectados. Cada ponto de coordenadas (E_i, N_i, h_i) , ao longo das linhas de busca, é parametrizado em função do parâmetro t_i (da equação da reta na forma paramétrica tridimensional), de um dos segmentos de reta da linha poligonal. Assim a Equação 111 poderá ser reescrita na forma:

$$E^T = \sum_{i=1}^{n-1} E_i^T (P_{i-1}(t_{i-1}), P_i(t_i), P_{i+1}(t_{i+1})) \quad (115)$$

Cada linha de busca abriga uma quantidade infinita de vértices candidatos, sendo necessário definir um intervalo fixo para amostrar os vértices a serem considerados no processo de otimização. Como o vértice da linha poligonal de referência está localizado no centro da linha poligonal de busca, parte-se dele para as extremidades amostrando pontos, conforme ilustrado na Figura 26a. Essa estrutura permite que o problema seja formulado de maneira semelhante ao descrito na Seção 2.7, podendo então ser otimizado via programação dinâmica, que descreverá o caminho ótimo a cada iteração (Figura 26b) e o eixo da rodovia na última iteração (Figura 27a), de acordo com a função custo descrita pela Equação 115.

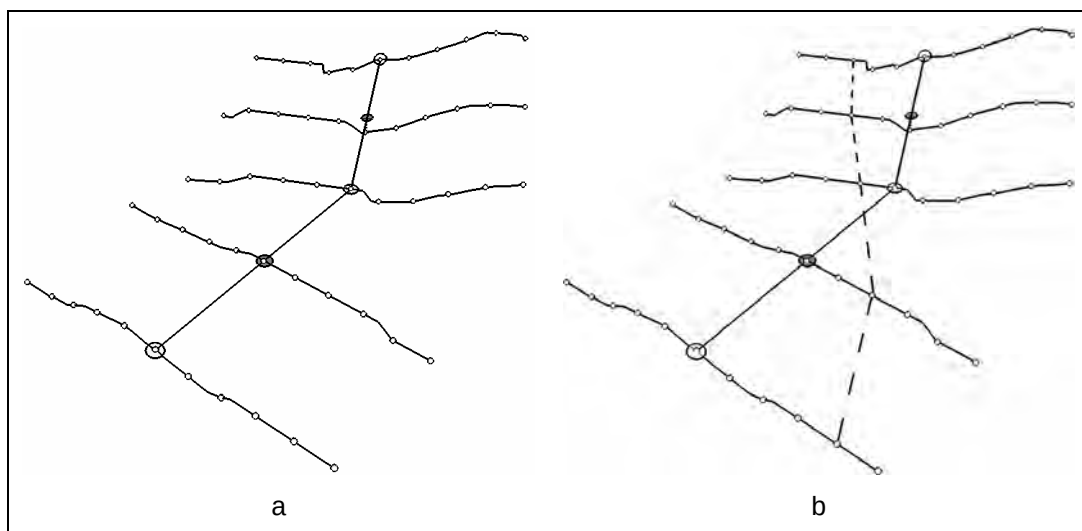


Figura 26: (a) Linha de busca amostrada.(b) Linha poligonal obtida pela primeira iteração.

No exemplo ilustrado na Figura 26b, nota-se que após o primeiro ciclo de otimização a linha poligonal de referência inicial (linha contínua), é substituída por uma nova (linha tracejada), que passa a ser a linha de referência na próxima iteração. As iterações com o processo de otimização por programação dinâmica prosseguem até um ou mais critérios de parada serem atingidos. Os critérios podem levar em consideração a distância entre os vértices que formam o eixo da rodovia ou o deslocamento destes entre uma iteração e outra, de forma a indicar que todos os novos vértices inseridos linearmente permaneçam, após um ciclo de otimização, colineares em relação aos vértices vizinhos, assim se tem um conjunto de vértices com coordenadas no espaço-objeto que descrevem o eixo da rodovia. (Figura 27a,b).

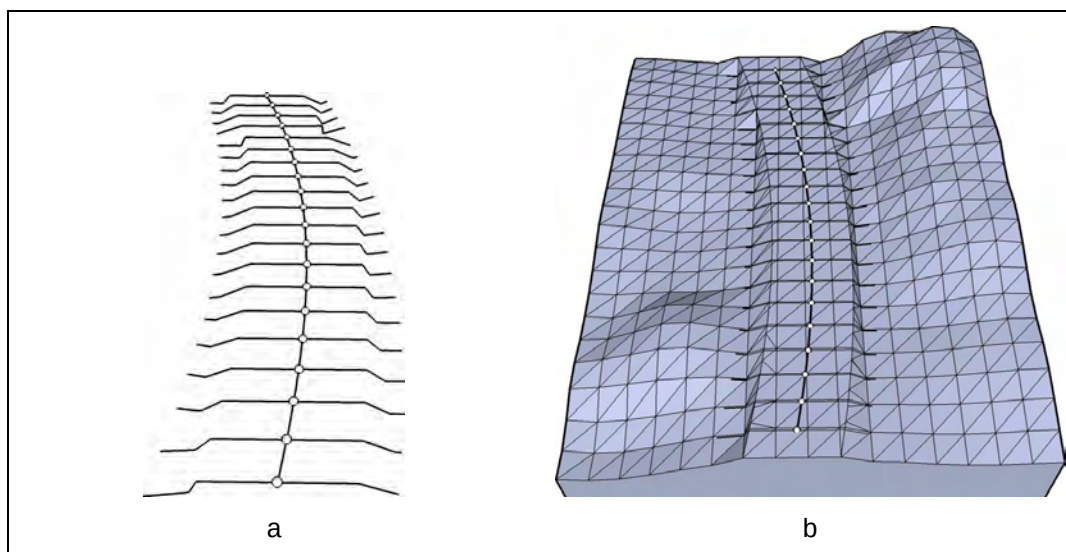


Figura 27: (a) Resultado final dos ciclos de otimização. (b) Sobreposição do resultado no MDT.

Para dar maior suavidade ao eixo extraído e reduzir o número de vértices da linha poligonal que o descreve, ocorrerá uma modelagem por meio de uma função B-Spline, em razão de suas características descritas na Seção 2.10.

Duas estratégias serão usadas para melhorar a eficiência computacional do processo de otimização. A primeira baseia-se no uso de linhas de busca de resolução variável (multiresolução). Visando aumentar o raio de convergência, nas primeiras iterações serão usadas linhas de busca de baixa resolução e de grande extensão espacial (Figura 26a). Visando obter alta precisão e pequeno espaço de busca, nas últimas iterações serão usadas linhas de busca pequenas e de alta-resolução (Figura 27a). Outra importante estratégia para reduzir o espaço de busca consiste em selecionar apenas linhas poligonais suaves, visto que a suavidade é uma das características geométricas das rodovias. Assim, os ângulos de deflexão horizontal em cada vértice da linha poligonal candidata devem estar abaixo de limiares pré-estabelecidos.

A Figura 28 apresenta um fluxograma da metodologia proposta, possibilitando uma visão geral das etapas descritas anteriormente.

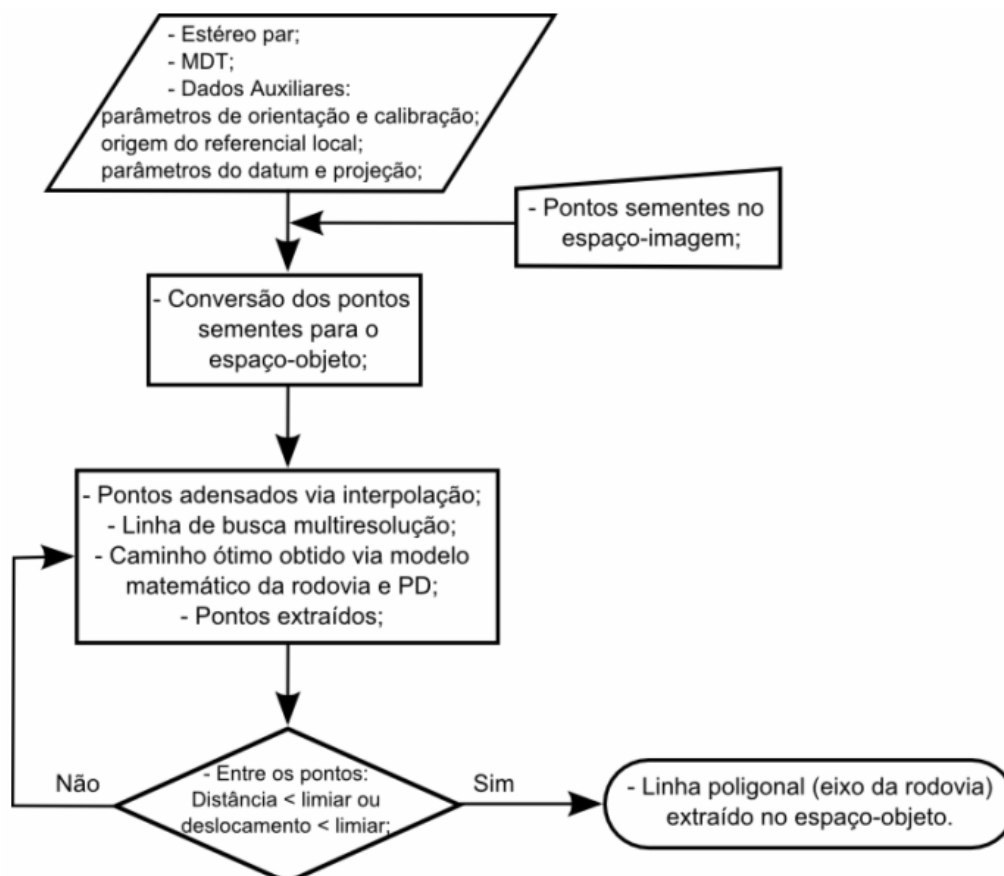


Figura 28: Fluxograma com as etapas da metodologia proposta.

Para melhor compreensão das relações entre as ações realizadas no espaço-objeto e os resultados obtidos em ambos os espaços (imagem e objeto), a próxima seção ilustrada por meio de dados reais o desenvolvimento de uma extração completa.

3.3 DESCRIÇÃO ILUSTRATIVA DA METODOLOGIA

A sequência de figuras a seguir apresenta visualmente o desenvolvimento da metodologia de extração descrita na seção anterior, utilizando dados reais, e tem caráter ilustrativo quanto à forma de interpretação dos resultados obtidos nos espaços imagem e objeto.

A Figura 29 apresenta o quadro inicial do processo de extração, já com os pontos sementes (indicados por setas) sobrepostos ao MDT (Figura 29b) e sua respectiva representação na imagem (Figura 29a). A Figura 29c exibe o MDT

em perspectiva, de maneira a evidenciar os pontos sobrepostos acompanhando o relevo do terreno.

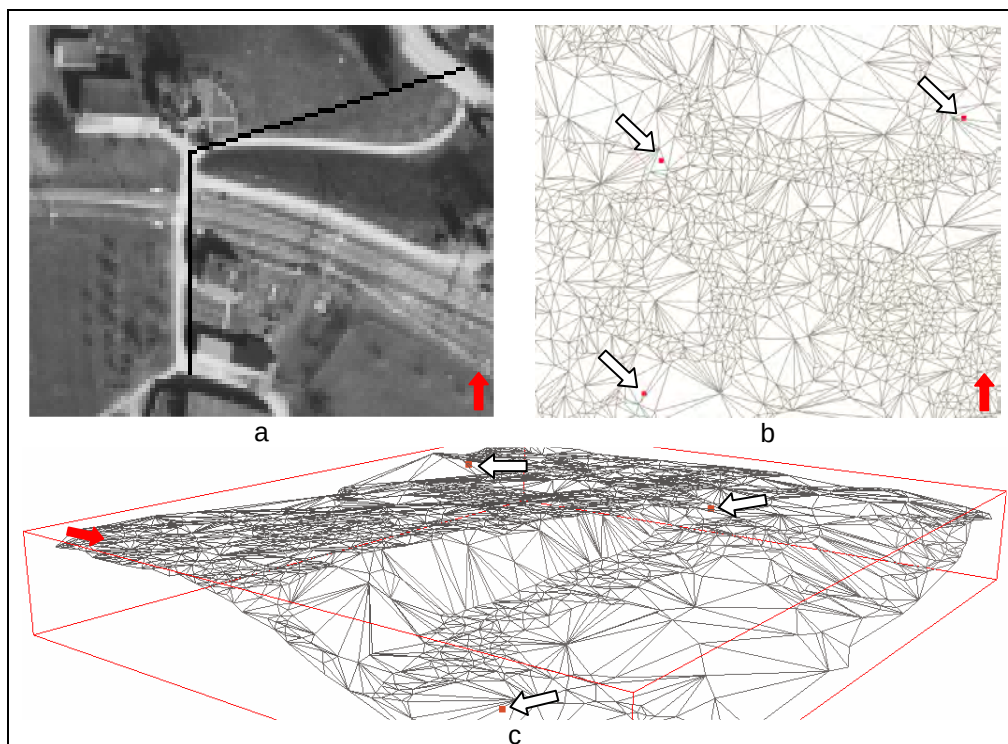
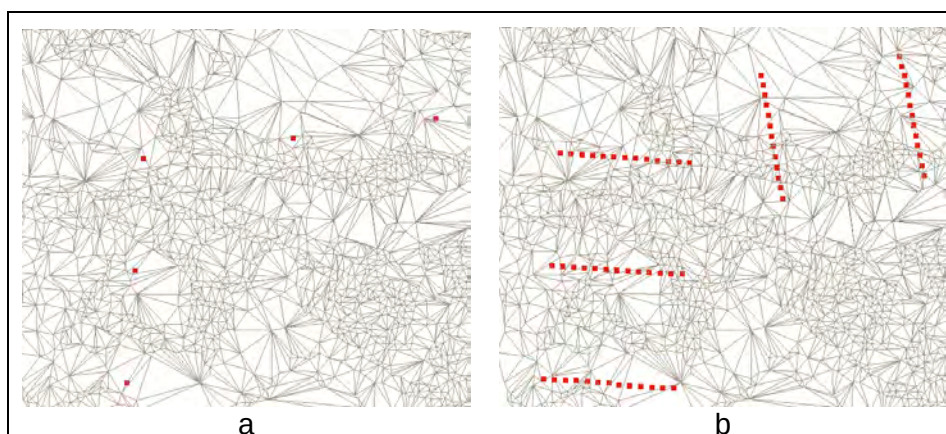


Figura 29:(a) Representação na imagem.(b) Pontos sementes sobre o MDT.(c) Visão em perspectiva.

Iniciando a primeira iteração os pontos sementes no espaço-objeto são adensados (Figura 30a), então são abertas as linhas de busca em cada vértice (Figura 30b), e em seguida o caminho ótimo (indicado por pontos verdes na Figura 30c) é definido via programação dinâmica, e passa a ser os pontos iniciais da próxima iteração (Figura 30d).



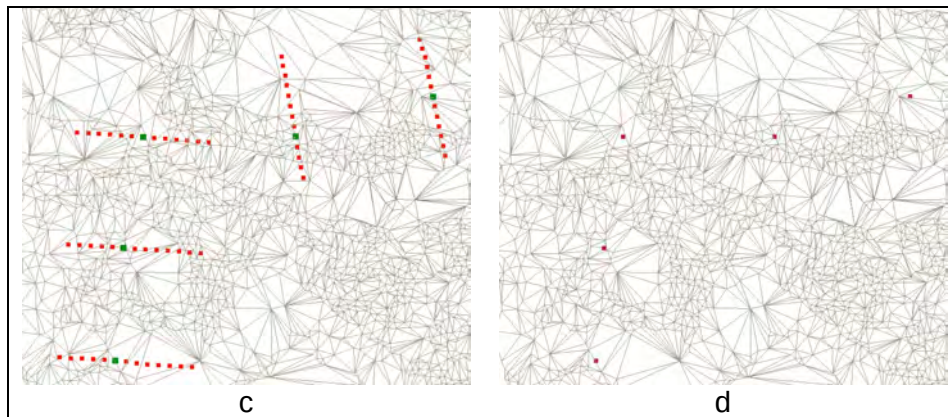


Figura 30: (a) Pontos adensados. (b) Linhas de busca. (c) Caminho ótimo. (d) Resultado da 1ª iteração.

Conforme comentado, a primeira iteração encerra tendo como resultado os pontos exibidos sobre o MDT (Figura 30d), que serão os pontos iniciais da segunda iteração (Figura 31b), e podem ser utilizados para traçar na imagem uma linha poligonal (Figura 31a). As iterações seguintes irão cumprir as mesmas etapas apresentadas na Figura 30.

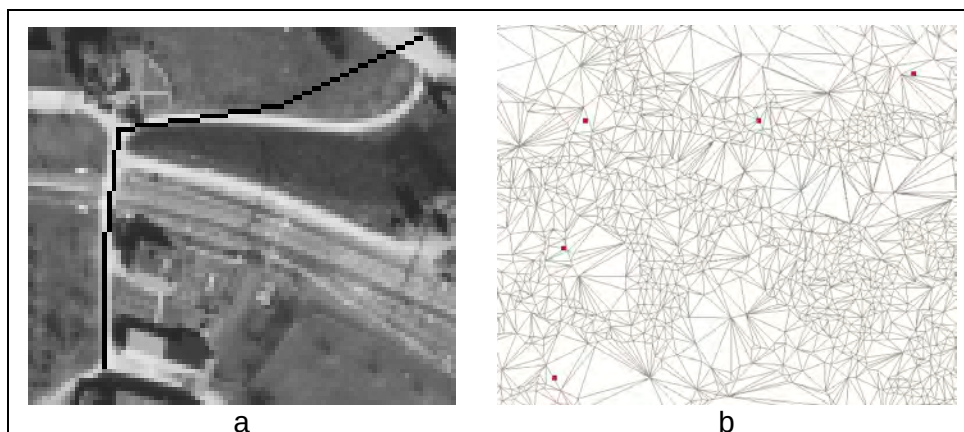


Figura 31: (a) Linha poligonal formada com os pontos da 1ª iteração. (b) Pontos sobre o MDT.

Ao final da segunda iteração (Figura 32), já é possível verificar o adensamento dos pontos que descrevem o eixo (Figura 32b), e o deslocamento sofrido em relação à primeira iteração (Figura 32a).

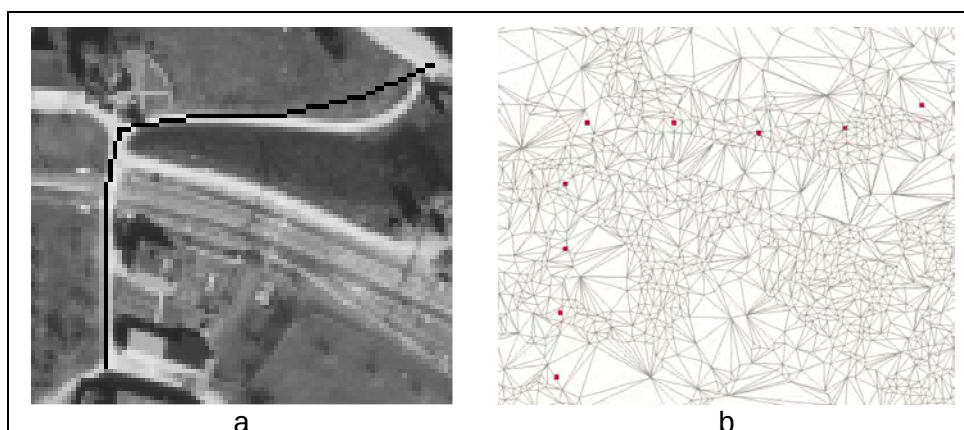


Figura 32: Linha poligonal formada com os pontos da 2ª iteração. (b) Pontos sobre o MDT.

As iterações continuam até determinado critério de parada ser acionado. Neste exemplo, os pontos resultantes da terceira iteração (Figura 33), atingiram o critério de parada (descrito na Seção 4.3), sendo eles os pontos que descrevem o eixo da rodovia no espaço-objeto (Figura 33b,c).

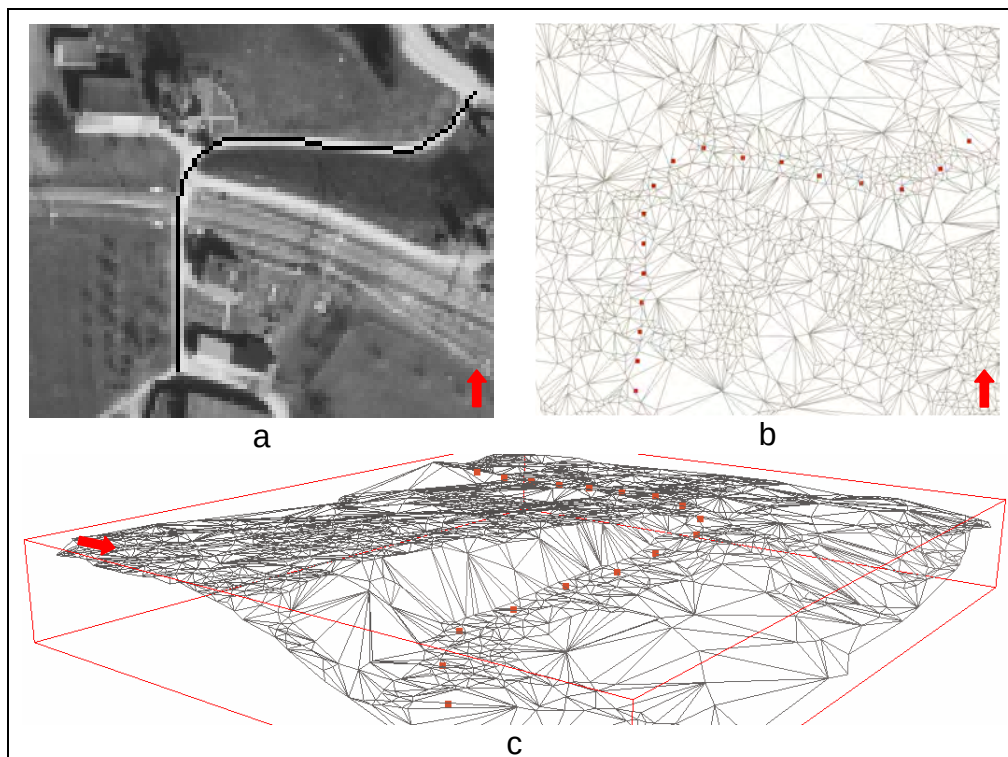


Figura 33: (a) Representação na imagem.(b) Eixo da rodovia sobre o MDT.(c) Visão em perspectiva.

Os pontos que formam o eixo da rodovia extraído acompanham a componente vertical do MDT, conforme pode ser observado na Figura 33c.

4 EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o processo de extração de rodovias usando programação dinâmica no espaço-objeto, além dos pormenores das diversas fases que compõem a metodologia desenvolvida. Estão detalhados os dados utilizados nos experimentos (Seção 4.2); os aspectos computacionais envolvidos na implementação da metodologia (Seção 4.3); as particularidades na inicialização do processo de extração (Seção 4.4); as formas de análise dos resultados alcançados nos experimentos (Seção 4.5); e os experimentos realizados (Seção 4.6).

4.2 DADOS UTILIZADOS

Para a realização dos experimentos foram utilizadas três imagens aéreas de uma região da Suíça que integram um projeto demonstrativo do sistema fotogramétrico *Leica Photogrammetry Suite (LPS)*, combinadas de maneira a formar dois estéreo pares que recobriu uma área comum de densa malha rodoviária, correspondente a região destacada pelo pontilhado na Figura 34.



Figura 34: Composição com as Imagens 0667, 0669 e 0671 utilizadas nos experimentos.

As imagens originalmente possuíam 9286 x 9496 pixels em uma escala de 1:9200, resultando no tamanho do pixel no terreno de aproximadamente 0,22 m. Como a metodologia proposta neste trabalho é formulada para baixa resolução, as imagens foram reamostradas para 1/6 das dimensões originais, assim passou-se a ter uma imagem de 1547 x 1582 pixels com o tamanho do pixel no terreno de 1,3 m, sendo suficiente para disponibilizar rodovias com largura variando de 2 a 6 pixels. Tais imagens não foram submetidas a processos de melhoramento, pois apresentam bom contraste, conforme pode ser verificado nos histogramas dispostos na Figura 35.

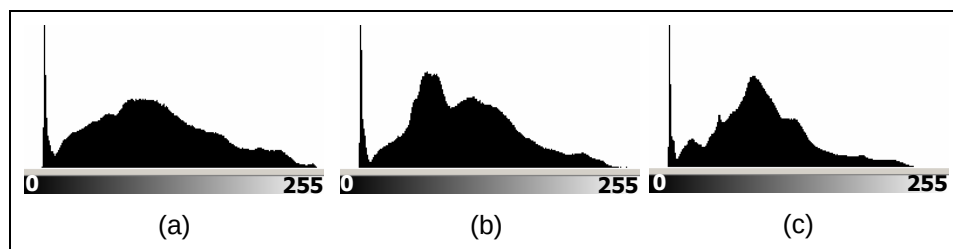


Figura 35: Histogramas das imagens (a) 0667, (b) 0669 e (c) 0671.

Justamente com as imagens, foram necessários os parâmetros de orientação interior e exterior, bem como o Modelo Digital do Terreno (MDT). O MDT foi obtido a partir do estéreo par original no software LPS pelo método de Rede Irregular de Triângulos (TIN), com resolução de um metro (Figura 36) e dimensões 1.914 x 2.029 m, resultando em 300.792 pontos.



Figura 36: Visão ortogonal da nuvem de pontos do modelo digital do terreno.

A malha de pontos gerada passou por uma edição realizada via módulo de visão estéreo do LPS para detecção e correção de erros grosseiros.

4.3 ASPECTOS COMPUTACIONAIS

A implementação da metodologia proposta foi realizada por meio das linguagens C/C++ no compilador *Visual Studio Express 2005*, na forma de aplicação de console para o sistema operacional *Windows XP*, em uma máquina *notebook* com processador Intel Core 2 Duo de 1.20 GHz e 2 GB de memória RAM. Foram utilizados recursos das bibliotecas *OpenCV*¹ (*Open Source Computer Vision Library*), *CGAL*² (*Computational Geometry Algorithms Library*) e *OSG*³ (*OpenSceneGraph*), além de implementações próprias, totalizando mais de duas mil e quinhentas linhas de código. A seguir serão apresentadas as três bibliotecas citadas e a sequência de operação do programa implementado.

A biblioteca *OpenCV* foi utilizada para operar as imagens do estéreo par por meio de suas funções de leitura e gravação, acesso e mudança de cor do pixel, além do gerenciamento otimizado da memória. Trata-se de uma biblioteca de visão computacional escrita nas linguagens C/C++, multiplataforma, concebida para ter alta eficiência computacional com foco nas aplicações de visão em tempo real, fornecendo atualmente mais de 500 funções de alto nível e suporte a 11 formatos de imagem (BMP, PGM, RAS, TIFF e outros), além de possibilitar a criação de soluções personalizadas a partir de suas funcionalidades. Desenvolvida pela empresa Intel no final da década de 90, seu uso comercial e científico é promovido por meio do licenciamento que garante uma biblioteca aberta e livre. O código fonte pode ser utilizado ou incorporado (no todo ou em parte) em outros aplicativos comerciais ou científicos, sem que haja obrigação deste aplicativo ser de código aberto ou livre. No entanto, se o utilizador julgar necessário um nível maior de otimização, poderá comprar as bibliotecas IPP (*Integrated Performance Primitives*) disponibilizadas pela Intel e que consistem em rotinas de baixo nível otimizadas.

Estruturalmente a *OpenCV* é organizada em cinco componentes principais, quatro dos quais são mostrados na Figura 37. O componente CV contém os algoritmos de processamento de imagem e visão computacional; *ML* é o módulo de aprendizagem de máquina que inclui muitos classificadores estatísticos e

¹ Disponível em <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/>.

² Disponível em <http://www.cgal.org/>.

³ Disponível em <http://www.openscenegraph.org/projects/osg>.



ferramentas de cluster. O módulo *HighGUI* contém rotinas de entrada e saída, além das funções de armazenamento e carregamento de vídeo e imagens. O *CXCore* contém as estruturas de Base de Dados e Álgebra Linear. Por fim o *CvAux*, que é o quinto componente, abriga os algoritmos experimentais que podem futuramente passar a fazer parte efetivamente das funções da biblioteca.

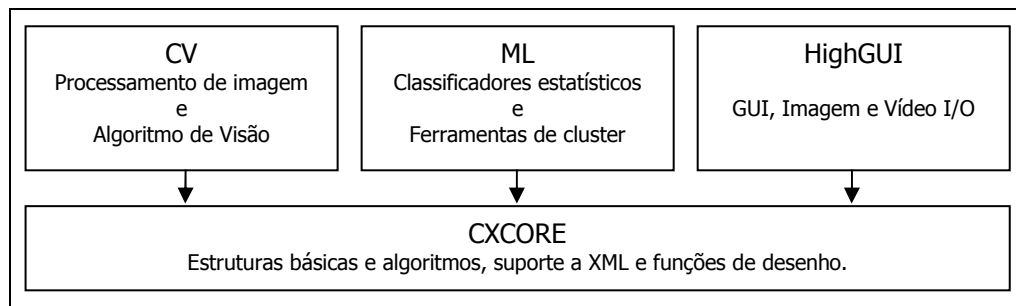


Figura 37: Representação do núcleo da biblioteca *OpenCV*.

Empresas como IBM, Microsoft, Intel, Sony, Siemens e Google, além de centros de pesquisa tais como Stanford, MIT, Cambridge, CMU e INRIA, fazem uso da *OpenCV* em seus projetos.

Em contrapartida, a biblioteca *CGAL* forneceu as estruturas para realização das operações geométricas com as coordenadas do espaço-objeto. Tais operações envolvem a realização da Triangulação de *Delaunay*, transformações geométricas e manipulação de objetos geométricos tais como pontos e retas, dentre outras. Escrita em C++ a *CGAL* é uma biblioteca de Geometria Computacional cujo desenvolvimento iniciou em 1997, tendo os desenvolvedores o objetivo de disponibilizar recursos geométricos otimizados para a indústria e comunidade científica, com a finalidade de viabilizar a implementação de aplicações complexas em diferentes áreas. Atualmente o projeto está sendo mantido por grupos de pesquisa da Europa e Israel, dentre os quais se destacam a Universidade de Utrecht (Holanda), ETH Zurich (Suíça), Freie Universität Berlin (Alemanha), Martin Luther-Universität Halle (Alemanha), INRIA Sophia-Antipolis (França), Max-Planck-Institut für Informatik, Saarbrücken (Alemanha), RISC Linz (Áustria) e a Universidade de Tel-Aviv (Israel). Esta biblioteca é distribuída sob uma licença de regime duplo, podendo ser usada tanto de forma gratuita para fins de pesquisa, quanto paga (licença comercial) para fins empresariais. Independente da finalidade ela é estruturada em três camadas, conforme apresentado na Figura 38. O *Geometric Kernel* prevê as dimensões das aplicações, abrigando objetos simples e predicados geométricos. Tal

camada abriga ainda dois tipos de representações numéricas (coordenadas cartesianas e coordenadas homogêneas sem sinal), além de alguns tipos especiais de números com maior precisão em relação aos tipos básicos do C++. A *Basic Library* faz uso do *Geometric Kernel* e contém as estruturas de dados e objetos geométricos complexos com suas respectivas operações. A *Core Library*, por sua vez contém funcionalidades básicas não-geométricas.

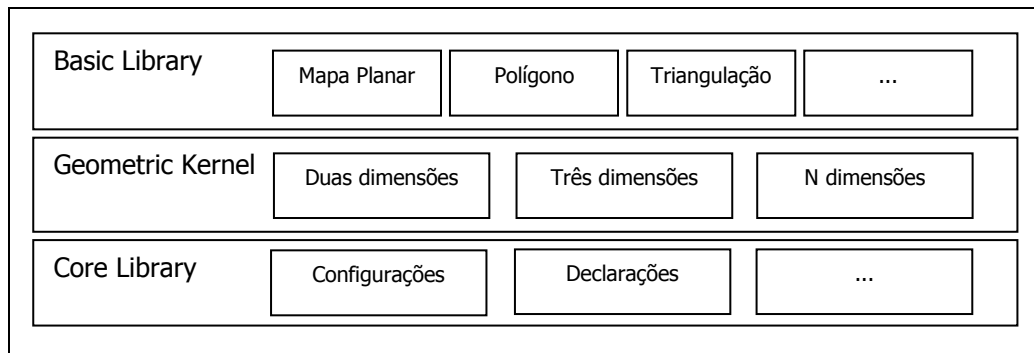


Figura 38: Representação do núcleo da biblioteca CGAL.

Na biblioteca CGAL, cada camada está subdividida em pequenas unidades modulares. Assim é possível perceber uma pequena parte sem ter qualquer conhecimento de outras peças, o que facilita o processo de implementação pelo usuário.

A última biblioteca utilizada foi a *OpenSceneGraph*, cujas funções gráficas possibilitaram a visualização dos dados operados pela CGAL, tais como a Triangulação de *Delaunay* e o eixo extraído. Trata-se de uma biblioteca multiplataforma que possui código aberto e implementação em C++ e *OpenGL*, oferecendo um conjunto de ferramentas de alta performance para geração de gráficos tridimensionais, com emprego em campos como a simulação, jogos, realidade virtual, visualização científica e modelagem.

Conhecidas as bibliotecas, torna-se importante o detalhamento das etapas de execução do programa de extração de rodovias implementado, pois se trata da concretização da metodologia proposta via programação. Inicialmente, ao executar o programa as imagens que formam o estéreo-par são lidas e armazenadas na memória, bem como seus respectivos parâmetros de orientação interior e exterior, além da nuvem de pontos do MDT que será utilizada para a obtenção das coordenadas altimétricas (via interpolação na Triangulação de Delaunay), dos pontos obtidos pelo algoritmo de programação dinâmica. Em seguida

é exibida a janela de instruções ao usuário (Figura 39a) e uma das imagens do estéreo-par para o operador realizar a coleta dos pontos sementes, no sistema de coordenadas da imagem, selecionando os pixels próximos ou sobre a rodovia (Figura 39b). O operador tem liberdade de inserir quantos pontos sementes achar necessário, garantindo um mínimo de dois. Boa parte destas ações estão baseadas na biblioteca *OpenCV*.

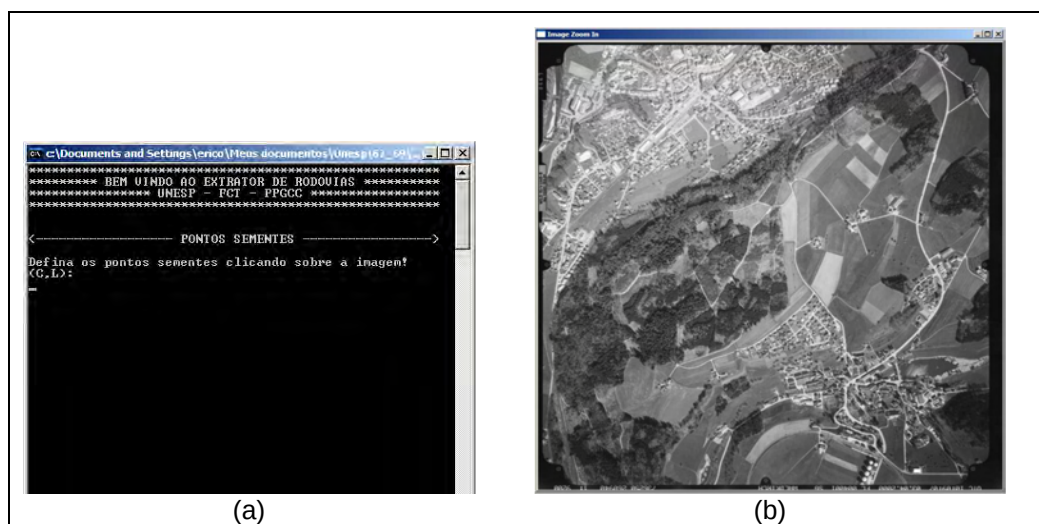


Figura 39: (a) Janela de instruções e (b) imagem para coleta de pontos sementes.

Em seguida os pontos sementes, por meio das equações de colinearidades inversa, têm suas coordenadas projetadas para o espaço-objeto (Figura 40). É importante destacar que essa transformação (espaço-imagem para espaço-objeto) ocorre uma única vez durante a extração, e que não se faz necessária a procura de pontos homólogos na segunda imagem do estéreo par, tão pouco é exigido um tratamento rigoroso dos erros, pois basta uma projeção grosseira dos pontos sementes admitindo uma altura inicial estimada pela média das alturas do MDT.

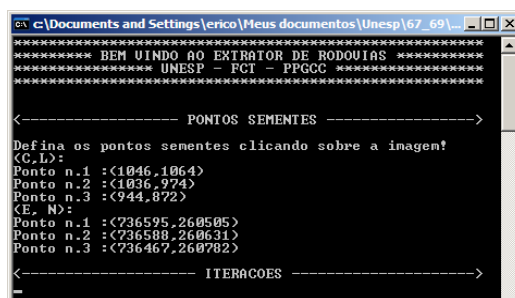


Figura 40: Apresentação das coordenadas dos pontos sementes em ambos os espaços.

Com os pontos sementes definidos no espaço-objeto é dado início aos procedimentos iterativos detalhados na seção 3.3 da metodologia. Nesta etapa a CGAL é utilizada para manipular a linha de busca, que tem sua resolução inicial definida pelo usuário, para uma ou mais extrações, e sofre reduções a cada iteração. A linha de busca pode, por exemplo, iniciar com 45,5 m de comprimento (13 pontos distanciados 3,5 m entre si) e na décima iteração estar com 1,4 m (5 pontos distanciados 0,28 m entre si). Note que a redução acontece no número de pontos amostrados e no intervalo da amostragem.

A cada iteração são fornecidas informações para o usuário como a distância média e o deslocamento médio entre os pontos do eixo (Figura 41a). O ciclo de iterações só é interrompido quando um critério de parada for atingido (Figura 41b).



Figura 41: (a) Informações sobre a progressão do processo e (b) finalização da extração.

Foram definidos dois critérios de parada: o primeiro estabelece que a média das distâncias ($\dots, d_j, d_{j+1}, \dots$) entre os pontos que formam o eixo da rodovia deve ser inferior a 1 m (Figura 42a); o segundo estabelece que entre uma iteração e outra, o deslocamento médio ($\dots, d_k, d_{k+1}, d_{k+2}, \dots$) dos pontos que formam o eixo deve ser inferior ao limiar de 0,2 m (Figura 42b), indicando estabilidade.

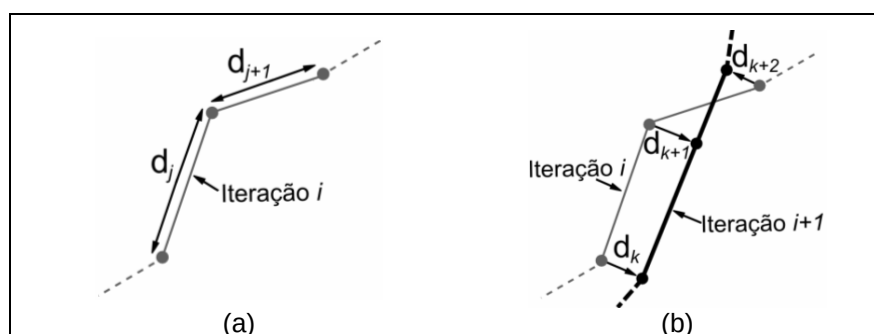


Figura 42: (a) Distâncias entre pontos no eixo. (b) Deslocamentos dos pontos entre as iterações.

Com a finalização das iterações pelos critérios estabelecidos os pontos extraídos pertencentes ao eixo são então modelados por meio de uma curva B-Spline e os relatórios da extração bem como o arquivo com as coordenadas do eixo da rodovia no espaço-objeto podem ser acessados na árvore de diretórios. O usuário é então questionado se deseja realizar nova extração ou sair do programa. Caso escolha uma nova extração, a imagem para coleta dos pontos sementes será novamente carregada e o processo reinicia, com isto é poupado esforço computacional, pois não há necessidade de nova leitura das imagens e do MDT, que já estão carregados na memória. Se o usuário optar por encerrar as extrações, utilizando a biblioteca *OpenSceneGraph* o eixo da rodovia será então sobreposto ao MDT e exibido em um modelo tridimensional (Figura 43a), possibilitando a avaliação visual da extração realizada.

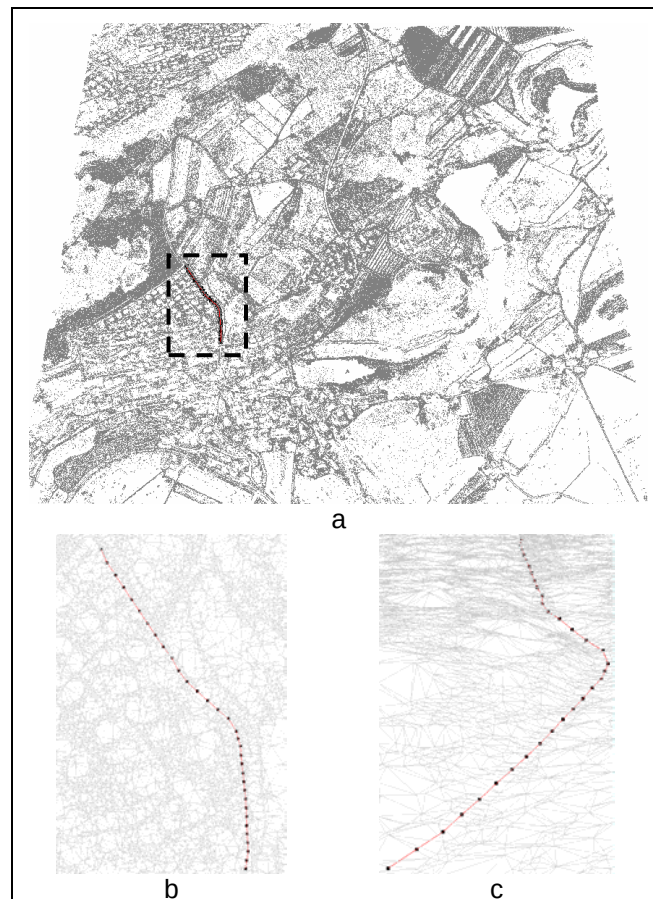


Figura 43: (a) MDT com o eixo sobreposto.(b) Ampliação com visão ortogonal e (c) em perspectiva.

Esta visualização é obtida pela biblioteca *OpenSceneGraph* que aceita operações como rotação, translação e zoom, permitindo visualizar o eixo em diferentes perspectivas, conforme mostram a Figura 43b e a Figura 43c. Ao sair desta janela o programa é encerrado.

4.4 INICIALIZAÇÃO DO PROCESSO

Conforme descrito no Capítulo 3, para inicializar o processo de extração é necessário que o operador forneça alguns pontos sementes sobre ou próximo à rodovia de interesse. A quantidade e posição desses pontos influenciam o resultado da extração, conforme descrito a seguir.

É relevante que o polígono inicial, definido pelos pontos sementes, descreva grosseiramente o comportamento geométrico da feição de interesse. Assim, nos trechos em que a rodovia apresenta variações angulares acentuadas é esperada uma quantidade maior de pontos sementes (Figura 44b,c), caso contrário pode haver um comprometimento na qualidade da extração (Figura 44a). Em contrapartida, nos trechos lineares ou de curvatura tênue poucos pontos são necessários.

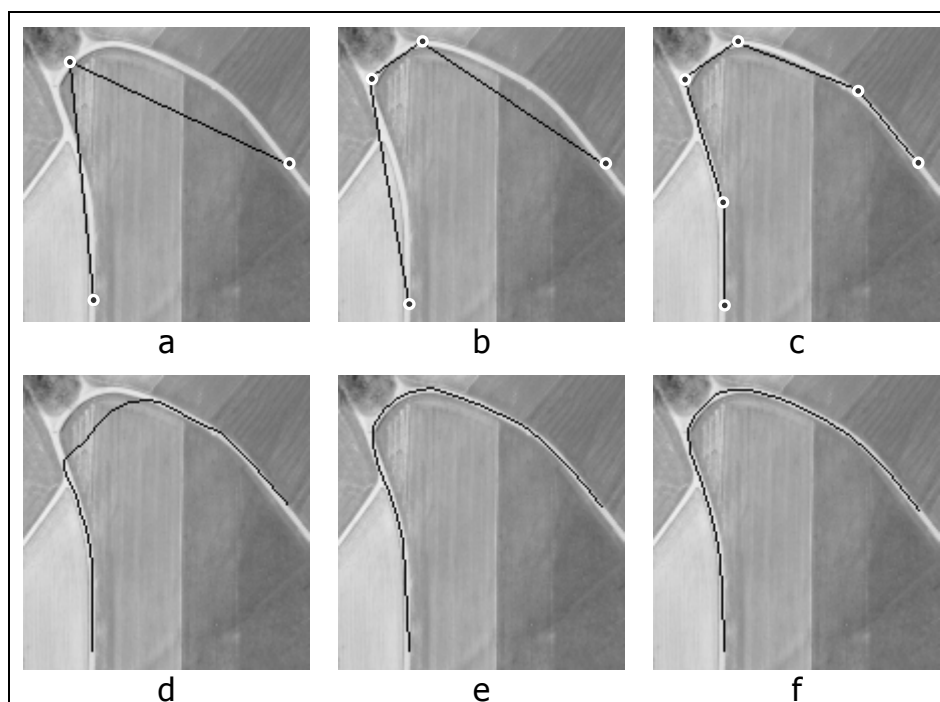


Figura 44: (a, b, c) Diferentes configurações de pontos sementes. (d, e, f) Respetivos resultados para as três configurações de pontos sementes.

É importante destacar que havendo por parte do operador o cuidado em observar o comportamento geométrico do trecho a ser extraído e fazer uso de uma quantidade adequada de pontos sementes, alterações nas posições destes pontos pouco interfere no resultado (Figura 45a,b,c), desde que a rodovia esteja ao alcance das linhas de busca a serem geradas nas iterações.

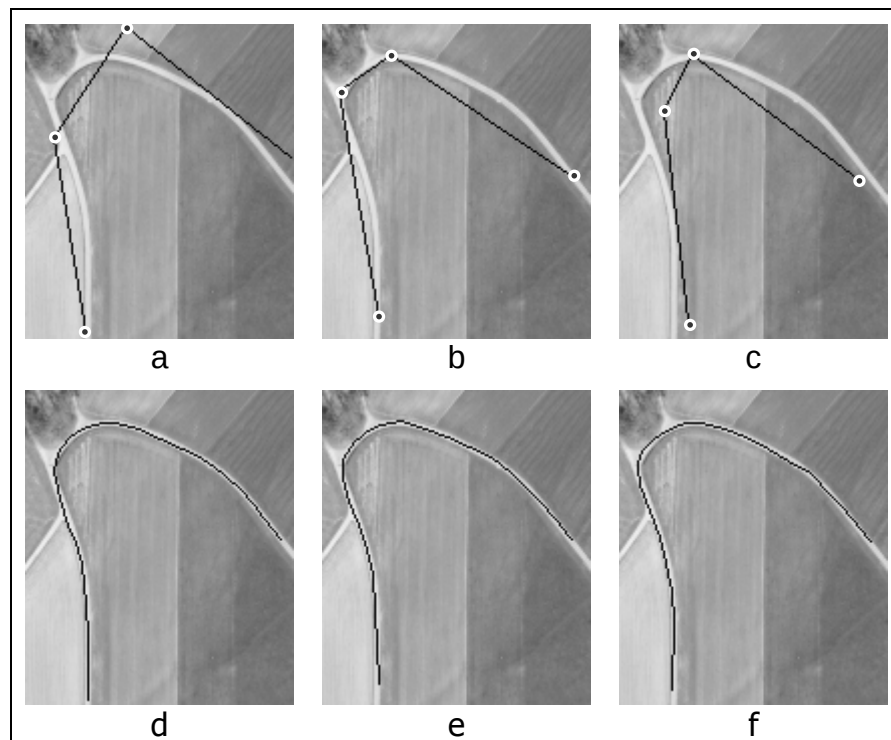


Figura 45: Quatro pontos sementes fornecidos em diferentes posições.

As Figura 45d,e,f apresentam três extrações, realizadas com quatro pontos sementes fornecidos em diferentes posições (Figuras 45a,b,c). É possível observar que os resultados expressos pelas respectivas linhas poligonais são similares.

Em um caso ideal, os pontos sementes seriam fornecidos sobre a rodovia, uniformemente espaçados e adensados, fazendo com que o polígono inicial descrevesse da melhor maneira possível a geometria do trecho a ser extraído. No entanto, tais condições dificilmente são exequíveis em um conjunto extenso de extrações. Assim, os experimentos foram executados com pontos que cumprissem as premissas de quantidade e posição anteriormente descritas, sem estarem ajustados a uma situação ideal.

4.5 FORMAS DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção são descritos os métodos de avaliação visual e numérico de extrações realizadas pela metodologia proposta. A avaliação visual consiste basicamente no operador analisar a linha poligonal formada pelos pontos

extraídos e sobrepostos nas imagens, verificando seu comportamento em relação às dificuldades apresentadas, tais como oclusão, baixa resposta radiométrica, falsos positivos e outros. Segundo Wiedemann e Hinz (1999), a avaliação numérica baseia-se nas distâncias (discrepâncias) entre os pontos da linha poligonal extraída pela metodologia proposta e os pontos da linha poligonal definida manualmente por operador humano e chamada de linha de referência ou eixo de referência. Como no presente trabalho os resultados das extrações são coordenados no espaço-objeto, as discrepâncias foram obtidas em metros, com medidas realizadas no software MicroStation (Bentley).

Estabelecida as discrepâncias (d), passa-se a categorizar os segmentos que compõem o eixo extraído. Para isso, serão utilizados os tipos definidos por Maia (2003), que levam em consideração a largura (W) da rodovia.

- Tipo 1 – Segmentos extraídos com ótima qualidade (SE): Segmento com discrepância menor ou igual ao limiar $W/4$.
- Tipo 2 – Segmentos extraídos com boa qualidade (SEBQ): Segmento com discrepância dentro do intervalo de $[W/4, W/2]$.
- Tipo 3 – Segmentos extraídos com péssima qualidade (SEPQ): Segmento com discrepância maior do que o limiar $W/2$.

Categorizados os diferentes tipos de segmentos, pode-se definir os parâmetros de qualidade conforme apresentados por Wiedemann e Hinz (1999):

- Completeza (COM):

$$COM = \frac{\sum_{i=1}^m SE_i + \sum_{i=1}^k SEBQ_i}{S} \quad (116)$$

- Correção (COR):

$$COR = \frac{\sum_{i=1}^m SE_i}{\sum_{i=1}^m SE_i + \sum_{i=1}^k SEBQ_i} \quad (117)$$

sendo S o comprimento da linha poligonal ou eixo de referência, m o número de segmentos extraídos com ótima qualidade, k o número de segmentos extraídos com boa qualidade. Maiores detalhes podem ser obtidos em Maia (2003).

4.6 EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os experimentos realizados utilizando o programa cuja implementação foi detalhada na Seção 4.3, fazendo uso dos dados descritos na Seção 4.2. O operador possuía conhecimento do comportamento dos pontos sementes, conforme detalhado na Seção 4.4. Por fim, os resultados dos experimentos foram avaliados segundo os critérios descritos na Seção 4.5.

Durante a fase de experimentos foram extraídos ao todo 40 trechos de rodovia com diferentes tamanhos e comportamento geométrico. No primeiro estéreo par, representado pela imagem na Figura 46a, foram realizadas 26 extrações com comprimento variando de 150 a 2.200 m, totalizando 12.705 m de rodovias (Figura 46b). Em média foram necessárias 4 iterações por trecho, sendo 6 o número máximo e 3 o mínimo. A média de pontos sementes utilizada foi de um para cada 100 m.



Figura 46: (a) Imagem da esquerda do primeiro estéreo par. (b) Malha extraída do estéreo par.

No segundo estéreo par, conforme mostra a imagem na Figura 47a, foram realizadas 9 extrações com trechos variando de 130 a 1.108 m, totalizando 5.037 m extraídos (Figura 47b), sendo necessárias em média 5 iterações, com o máximo de 6 o mínimo de 4. Em média foi utilizado um ponto semente para cada 111 m extraídos.

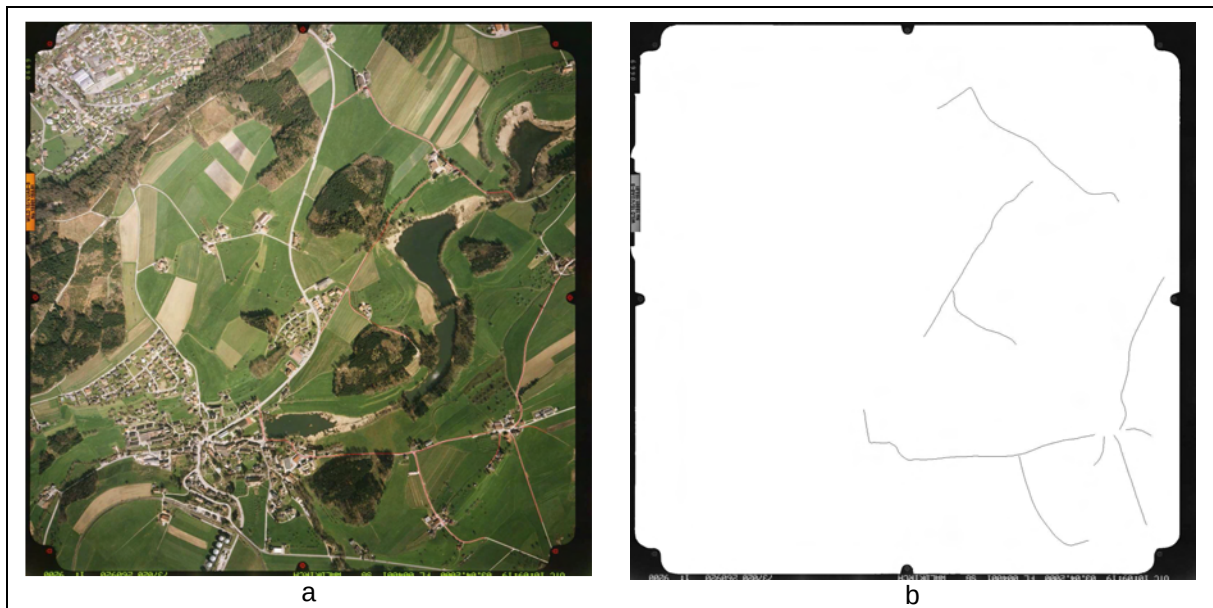


Figura 47: (a) Imagem da esquerda do segundo estéreo par. (b) Malha extraída do estéreo par.

Devido à complexidade do processo de avaliação e diante da numerosa quantidade de extrações realizadas durante o período de experimentos, fez-se necessário a seleção e organização de algumas extrações representativas do conjunto, ou seja, que ilustrem os pontos positivos e negativos do método proposto. Tendo como critério o tempo de processamento, que variou nos experimentos entre 90 e 400 s, em um *notebook* com processador Intel Core 2 Duo de 1.20 GHz e 2 GB de memória RAM, foram fixados as seguintes faixas de tempo de processamento:

- Faixa 1: tempo igual ou inferior a 150 s;
- Faixa 2: tempo superior a 150 s e inferior a 300 s;
- Faixa 3: tempo igual ou superior a 300 s.

Analisando os trechos extraídos pertencentes as três diferentes faixas de tempo, constata-se que o tempo demandado na extração está diretamente relacionado ao comprimento da feição extraída. Sendo confirmada essa relação, optou-se por fazer referência aos grupos organizados não pelo tempo de extração (que pode variar de um computador para outro), mas sim pelo comprimento da feição. Assim, tem-se:

- Trechos Curtos (TC): Abrigam as rodovias com comprimento de até 500 m e se situam na faixa 1 de processamento;
- Trechos Médios (TM): Abrigam as rodovias com comprimento entre 501 e 1.000 m e se situam na faixa 2 de processamento;

- Trechos Longos (TL): Abrigam as rodovias com comprimento acima de 1.000 m e se situam na faixa 3 de processamento.

Para as duas primeiras categorias foram selecionados quatro experimentos, enquanto que para a última categoria foram selecionados dois.

Apesar dos resultados das extrações serem apresentados por meio de linhas poligonais definidas pelos pontos extraídos e sobrepostas na imagem, é importante destacar que esta é uma representação plana do eixo obtido com coordenadas tridimensionais (E, N, h).

4.6.1 EXTRAÇÕES DE TRECHOS CURTOS

Nesta subseção serão apresentadas as extrações realizadas em Trechos Curtos (TC) que, conforme pode ser verificado na Tabela 1, são aqueles com até 500 m de comprimento. O objetivo é verificar o desempenho da metodologia em situações em que os critérios de parada podem ser atingidos rapidamente. É esperado que se tenha extrações com elevada completeza e correção.

Tabela 1: Resumo das extrações de trechos curtos (TC).

Extração	Extensão extraída (m)	Pontos Sementes	Iterações	Pontos Extraídos	Largura da Rodovia (m)
TC1	410	2	6	31	2,65
TC2	412	4	4	23	2,21
TC3	444	2	6	31	3,53
TC4	345	4	4	23	6,62

A imagem apresentada na Figura 48a,b possui um conjunto de características muito favorável ao processo de extração, destacando-se as seguintes características em relação a rodovia: bom nível de contraste com o restante da paisagem, largura constante, aspecto geométrico próximo a de uma reta e ausência de entroncamentos ou oclusões. Os pontos sementes foram propositalmente inseridos de forma a não coincidir com o eixo da rodovia (Figura 48a).

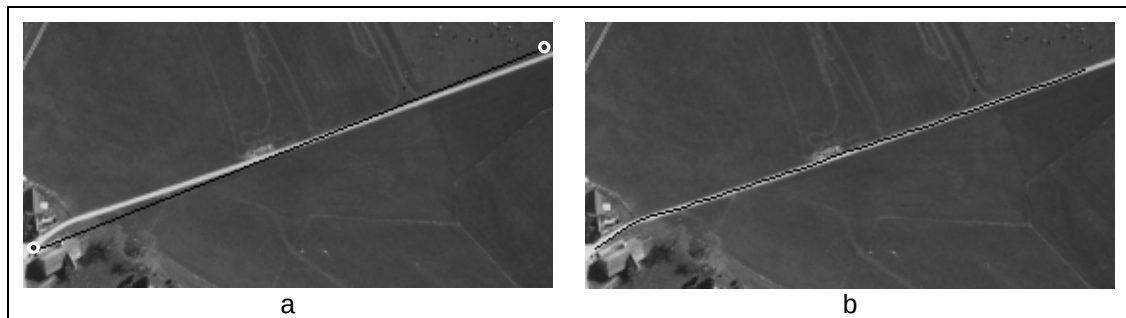


Figura 48: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TC1.

A via de tráfego presente na imagem da Figura 49a,b não possui cobertura asfáltica, apresentando um quadro desfavorável a extração, com baixo nível de contraste, ausência de delineamento no contorno da feição, largura variada e aspecto geométrico complexo. Os pontos sementes foram inseridos de maneira a dar um contorno aproximado (Figura 49a). O propósito desta extração é averiguar a eficiência do método mesmo em situações de baixa resposta radiométrica.

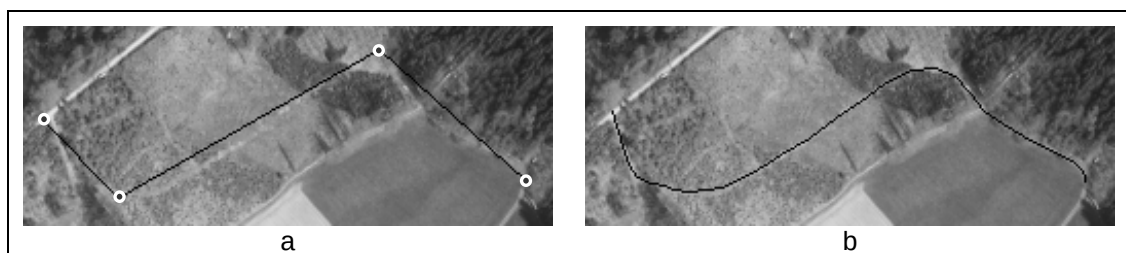


Figura 49: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TC2.

A imagem da Figura 50a,b possui um conjunto de construções que encobrem parte da rodovia ou mesmo projetam sombras sobre ela. Mesmo verificando essa situação, foram inseridos somente dois pontos sementes (Figura 50a) nos extremos da feição de interesse. Devido ao traçado curvo da rodovia o primeiro ponto médio a ser gerado na interpolação estará a uma distância de 12 m dela.



Figura 50: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TC3.

A imagem da Figura 51a,b mostra um trecho (TC4) com as seguintes características: leves obstruções provocadas por edifícios adjacentes e geometria tão complexa quanto no TC2. Foram fornecidos 4 pontos sementes ao longo ou nas adjacências da feição de interesse (Figura 51a). É importante notar que esta rodovia não se enquadra na categoria de baixa resolução, pois apesar de cobrir o mesmo tamanho do terreno no pixel que as extrações anteriores (1,3 m), ela possui uma largura superior a 3 pixels, contrariando o critério adotado neste trabalho para definir baixa resolução. No entanto o experimento se justifica para a inferência quanto à progressão desta metodologia em trabalhos futuros para imagens de média ou alta resolução.



Figura 51: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TC4..

A análise visual das extrações evidencia que a metodologia obteve um bom desempenho em trechos curtos. Os trechos com curvas acentuadas necessitam de mais pontos sementes e, apesar de ser recomendado a inserção deles sobre a rodovia, as extrações foram realizadas com sucesso mesmo para aqueles casos cujos pontos sementes foram semeados fora da rodovia. As principais dificuldades encontradas nas extrações dessa subseção se referem a mudanças na largura das rodovias.

A análise numérica baseia-se nos dados que compõem a Tabela 2 e embasam as observações realizadas na análise visual. Como era esperado, o trecho com menor resposta radiométrica e largura variada da rodovia (TC2) apresentou o pior resultado no quesito completeza (85%). Já o trecho TC3 teve somente 71% no item Correção, resultado que pode ser explicado, em parte, pelo deslocamento do eixo provocado pela sombra das construções projetadas sobre a rodovia.

Tabela 2: Resultados da análise numérica nos trechos curtos (TC).

Extração	Figura	Completeza (%)	Correção (%)
TC1	Figura 48	100	85
TC2	Figura 49	85	79
TC3	Figura 50	100	71
TC4	Figura 51	100	88

De forma geral as extrações se comportaram conforme o esperado para trechos curtos. O TC4, pelos motivos descritos na Seção 4.4, não atingiria um contorno aceitável com menos de 4 pontos sementes e, o fato de terem sido inseridos sobre ou bem próximo à rodovia ajudou no resultado da extração, pois não se trata de uma feição de baixa resolução.

O experimento TC1 apresenta características que indicam a relevância dos critérios de parada descritos na Seção 4.3. Tal extração foi interrompida na 6ª iteração, ao atingir um deslocamento médio inferior a 0,2 m entre os pontos que formam o eixo da rodovia (critério de parada por estabilidade dos pontos). Considerando que no instante em que a extração foi interrompida a distância média entre os pontos era de 13 m, se não houvesse o referido critério de parada por estabilidade, ocorreriam mais quatro iterações até convergir pelo critério de distância média entre os pontos (distância média inferior a 1 m), exigindo um esforço computacional desnecessário.

Já o experimento TC3 destaca a importância da linha de busca multiresolução. Com o primeiro ponto interpolado a uma distância de 12 m da rodovia, a extração só foi possível em virtude da linha de busca multiresolução, que tinha nas primeiras iterações um comprimento longo (45 m) e uma resolução grosseira, de forma a garantir no mínimo um ponto sobre a rodovia. Havendo em seguida gradativa redução de comprimento e resolução nas iterações seguintes, conforme descrito no Capítulo 3.

4.6.2 EXTRAÇÃO DE TRECHOS MÉDIOS

Os trechos médios computam 6.663 m de extrações e caracterizam-se pela geometria mais complexa, apresentando consequentemente maiores

condições de serem afetados por anomalias. Como critério de seleção dos experimentos para esta subseção foi considerado a quantidade de feições contidas nas imagens e o comportamento geométrico das feições rodovias, procurando alternar entre simples e complexo. As informações gerais dos experimentos selecionados estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3: Resumo das extrações de trechos médios (TM).

Extração	Extensão extraída (m)	Pontos Sementes	Iterações	Pontos Extraídos	Largura da Rodovia (m)
TM1	504	3	5	31	3,75
TM2	655	3	6	63	2,21
TM3	672	4	5	22	5,08
TM4	924	6	5	79	3,31

O primeiro trecho de médio comprimento (TM1) apresenta uma cena muito favorável, sendo possível notar um acentuado contraste entre a rodovia e o restante da imagem. A rodovia também apresenta um bom comportamento geométrico, com mudanças angulares suaves (Figura 52a,b).



Figura 52: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TM1.

Na imagem seguinte (Figura 53a,b) a utilização de somente três pontos sementes (Figura 53a) foi proposital e teve a intenção de averiguar a robustez da metodologia diante de feições sinuosas combinadas com obstáculos. A complexidade desta extração pode ser observada pelas áreas demarcadas por retângulos na Figura 53b. O retângulo maior destaca uma área com alta resposta radiométrica (solo exposto), tangenciando a rodovia e podendo causar um falso

positivo. No retângulo menor está destacada uma área suburbana com construções e pavimentação de cruzamento.

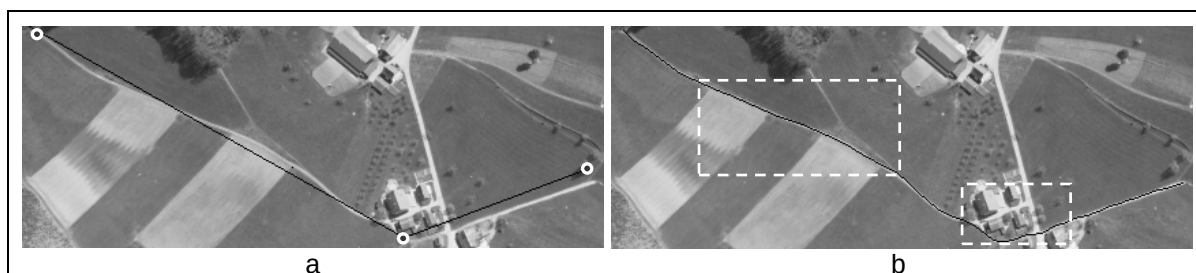


Figura 53: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TM2.

A rodovia presente na imagem da Figura 54a,b descreve uma curva prolongada, com duas regiões de oclusões (destacadas por retângulos na Figura 54b). O retângulo menor indica um conjunto de construções e sombras que são projetadas ocultando a feição de interesse. O retângulo maior destaca uma área de bosque as margens da rodovia, que provoca uma redução no contraste. Nessa extração foram semeados três pontos afastados do eixo da rodovia (Figura 54a). Este trecho não se enquadra nos critérios de baixa resolução, ou seja, a rodovia possui mais de três pixels de largura. No entanto, trata-se de uma extração importante, pois oferece obstáculos encontrados comumente no processo de extração de rodovias.

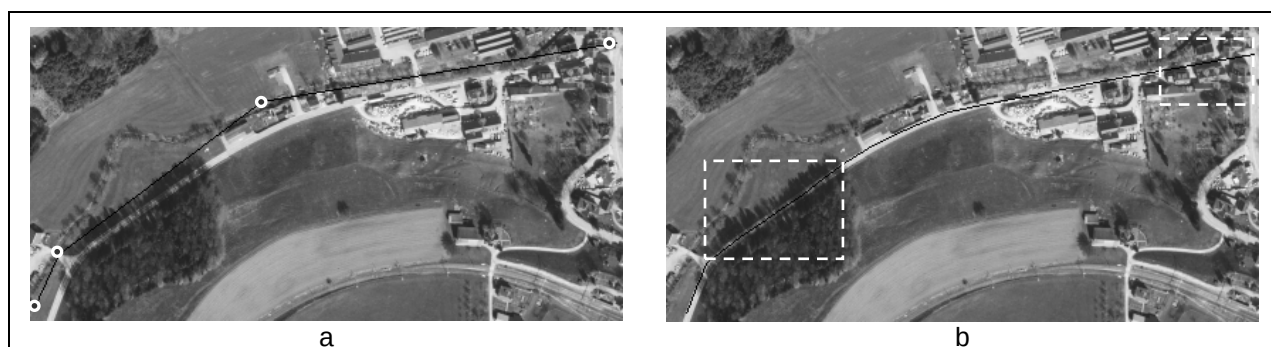


Figura 54: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TM3.

A rodovia na imagem da Figura 55a,b possui um comportamento geométrico bem variado, exigindo a inserção de um número maior de pontos sementes (Figura 55a). O retângulo na Figura 55b chama a atenção para a área de completa oclusão da rodovia próxima às construções e região de cruzamento.

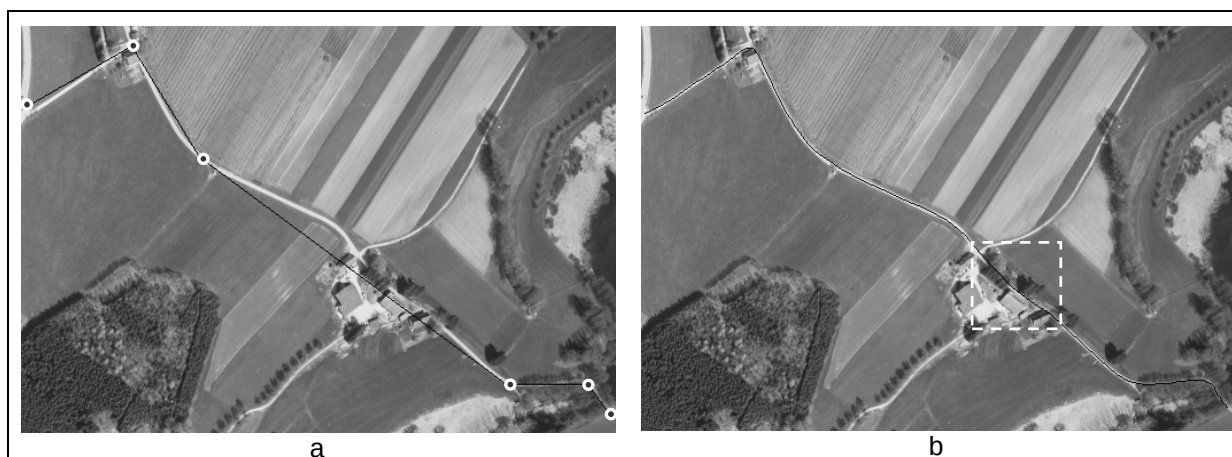


Figura 55: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TM4.

A análise visual indica que os obstáculos geométricos e radiométricos foram superados de maneira satisfatória, em grande parte devido às injunções geométricas presentes no modelo e que forçam uma suavidade ao eixo. Em contrapartida, a ausência de injunções de bordas comprometeram a qualidade das extrações nas regiões mais largas da rodovia, como no TM3 (FIGURA 54), o que não significa falha da metodologia, que foi elaborada para imagens de baixa resolução, com rodovias variando de um a três pixels.

A Tabela 4 apresenta dados para subsidiar a análise numérica, que podem respaldar as observações elaboradas a partir da análise visual.

Tabela 4: Resultados da análise numérica nos trechos médios (TM).

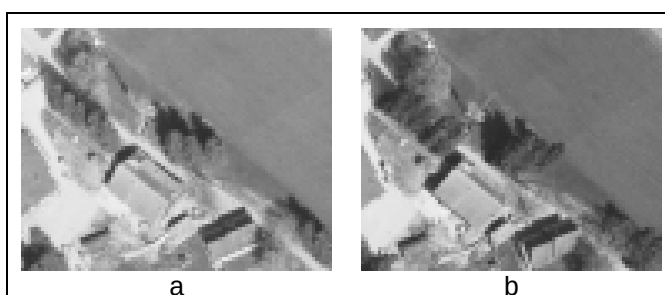
Extração	Figura	Completeza (%)	Correção (%)
TM1	Figura 52	100	83
TM2	Figura 53	81	62
TM3	Figura 54	100	77
TM4	Figura 55	100	84

Conforme pode ser verificado na TABELA 4, o pior resultado foi obtido na extração TM2 (Figura 53b), e pode ser explicado, em parte, pelas áreas de solo exposto (retângulo maior). Em virtude das injunções geométricas presentes no modelo, tais regiões não chegaram a deslocar o eixo para fora da rodovia, mas acabaram por forçá-lo a tangenciar a borda. A área suburbana destacada na imagem (retângulo menor) também influenciou a degradação do resultado, principalmente por ser um ponto de cruzamento com mudança brusca de direção. Já

a extração TM4 (Figura 55b), apresentou os melhores resultados de completeza e correção, mesmo tendo uma geometria mais complexa que o TM2. Isto se deve a uso de um número maior de pontos sementes distribuídos próximos ou sobre a rodovia, concentrados principalmente nas regiões com mudanças bruscas de direção (curvas).

Contando com boa geometria e resposta radiométrica, a extração TM1 (Figura 52) evidencia, mais uma vez, a importância das linhas de busca de multiresolução, conforme discutido na avaliação do TC3, pois devido à maneira como foram inseridos os pontos sementes (Figura 52a), o primeiro ponto a ser criado via interpolação estará a mais de 21 m do contorno da rodovia.

Apresentando 100% de Completeza e 77% de Correção, a extração TM3 (Figura 54b) possui resultados razoáveis, principalmente se for considerado o fato da rodovia não ter largura igual ou inferior a 3 pixels (baixa resolução). Assim para melhorar o valor de Correção (77%) seria necessário incluir na metodologia um procedimento de injunção de bordas. Cabe aqui um detalhamento das regiões em destaque na imagem (Figura 54b). Na área do retângulo maior a baixa resposta radiométrica provocada pela projeção de sombras sobre a rodovia não prejudicou a extração, demonstrando que a metodologia se comporta bem em trechos com essas características, conforme verificado anteriormente na extração do TC2 (Figura 49b). Na segunda área, marcada com um retângulo menor, o efeito da oclusão foi minimizado pelas injunções geométricas do modelo e atenuado, dentro do possível, pela redundância e complementação dos dados radiométricos provenientes do uso de um estéreo par. Isto se torna possível em função das imagens serem capturadas em momentos e ângulos diferentes, assim a imagem da esquerda (Figura 56a) e da direita (Figura 56b), fornecem diferentes informações radiométricas. A imagem da esquerda exhibe trechos da rodovia que na imagem da direita estão ocultos por árvores e construções.



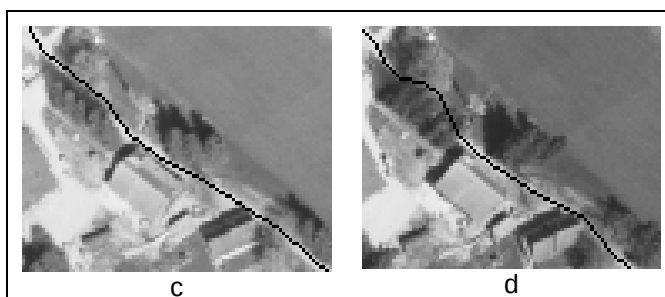


Figura 56: Recorte na (a,c) imagem da esquerda e na (b,d) imagem direita do estéreo par.

Para melhor visualizar a contribuição radiométrica individual das imagens deste estéreo par, Na Figura 56 (c,d) são apresentados os resultados da extração utilizando isoladamente a resposta radiométrica da imagem da esquerda (Figura 56c) e da direita (Figura 56d). Como se pode notar, em uma das imagens a rodovia sofre oclusão em um trecho menor que o da outra, oferecendo então melhor resposta radiométrica e consequentemente uma extração mais suave. Logo, o uso do estéreo par garante uma atenuação nos casos de oclusão, o que seria impossível no caso mono por possuir somente uma fonte de dados radiométricos.

4.6.3 EXTRAÇÕES DE TRECHOS LONGOS

Serão apresentados dois experimentos deste grupo, que devido à extensão prolongada abrigam diferentes comportamentos geométricos e radiométricos. A soma desses dois trechos ultrapassa os 4.000 m, conforme detalhado na Tabela 5.

Tabela 5: Resumo das extrações de trechos longos (TL).

Extração	Extensão extraída (m)	Pontos Sementes	Iterações	Pontos Extraídos	Largura da Rodovia (m)
TL1	1741	7	5	97	4,20
TL2	2261	9	5	64	7,73

No primeiro trecho longo foram utilizados 7 pontos sementes (Figura 57a), para uma extensão de 1.741 m (Figura 57b), correspondendo em média a um ponto semente a cada 240 m. Os pontos sementes foram propositalmente posicionados distantes do eixo da rodovia, porém acompanhando a trajetória. Neste experimento, a variação na largura da rodovia consiste no maior obstáculo para uma extração de qualidade. Não há áreas com grandes oclusões, porém as construções

estão presentes em aproximadamente 25% do trecho. Com uma largura média de 4,2 m, os resultados desta extração devem ser considerados relevantes para avaliar a metodologia proposta, pois os trechos fora das áreas suburbanas cumprem o requisito de largura igual ou inferior a três pixels.



Figura 57: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TL1.

Para a extração do trecho de rodovia mostrado na Figura 58b, foi utilizado em média um ponto semente a cada 251 m, tendo esta feição 2.261 m. A exemplo da extração anterior os pontos sementes foram inseridos sobre ou próximo à rodovia (Figura 58a). Este trecho não apresenta áreas de oclusão, porém a rodovia varia de largura em vários trechos, e acompanhando uma de suas bordas há uma faixa de acostamento com alta resposta radiométrica. Este trecho possui largura bem superior aos 3 pixels fixados para a categoria de baixa resolução. No entanto a extração é relevante para apurar o comportamento da presente metodologia neste cenário, permitindo assim compor hipóteses para trabalhos futuros de extensão desta metodologia.

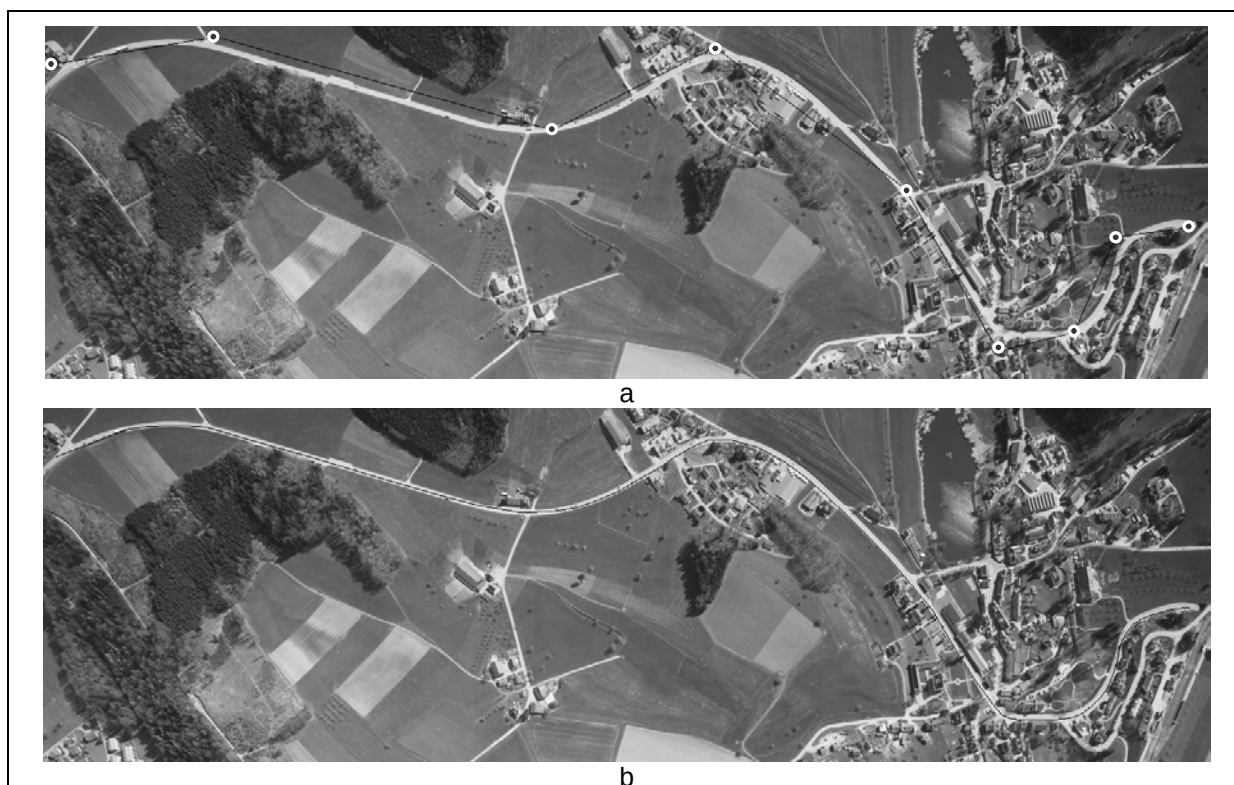


Figura 58: (a) Pontos sementes e (b) respectivo eixo extraído no TL2.

Na análise visual, observando as imagens da Figura 57b e Figura 58b, pode-se averiguar que as rodovias foram extraídas, ou seja, o eixo está sobre a rodovia. Porém, a falta de uma inunção de bordas no processo de extração faz com que o eixo se desloque com facilidade, tangenciado uma das bordas da rodovia.

Tabela 6: Resultados da análise numérica nos trechos longos (TL).

Extração	Completeza (%)	Correção (%)
TL1	95	84
TL2	89	55

Considerando a complexidade da feição, a extração TL1 (Figura 58b) atingiu bons níveis de Completeza (95%) e Correção (84%). A extração TL2 (Figura 58) não atingiu um bom índice de Correção (55%), porém a Completeza (89%) indica que a rodovia foi descrita pelo eixo extraído, mas sem precisão. Nos dois casos os trechos com largura superior a três pixels ocasionaram um deslocamento do eixo sobre a rodovia. A solução para melhorar os índices de Correção seria introduzir no modelo uma inunção de bordas.

De uma forma geral as extrações foram eficientes, atingindo índices de completeza e correção relativamente altos, sobretudo se considerar que a metodologia proposta é para imagens de baixa resolução. As informações numéricas confirmam as observações elaboradas pela análise visual.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia semi-automática para extração de rodovias a partir de um estéreo par de imagens aéreas de baixa resolução e do respectivo Modelo Digital de Terreno, tendo por base a otimização por programação dinâmica no espaço-objeto. Esta metodologia pode ser utilizada na atualização de base de dados cartográficos (Sistemas de Informações Georreferenciadas - SIGs), pois os pontos sementes são indicados por um operador podem facilmente ser substituído por projeções grosseiras de pontos amostrados nas rodovias presentes em bases cartográficas, para respectiva atualização.

A metodologia consiste em um processo iterativo que é iniciado com os pontos sementes definidos no espaço-imagem. Estes pontos são então projetados para o espaço-objeto e passam a descrever uma linha poligonal. Iniciando a primeira iteração a linha poligonal é adensada por meio de pontos médios entre os vértices já existentes. Em seguida sobre cada vértice existente, é aberta uma linha de busca multiresolução perpendicular à linha poligonal por eles definida. O caminho ótimo é descrito por Programação Dinâmica e os pontos que formam esse caminho passam a compor a linha poligonal para a próxima iteração. O processo se repete até que um dos critérios de parada seja atingido. O resultado final é um conjunto de pontos que descrevem o eixo da rodovia com coordenadas (E, N, h).

Na avaliação experimental da metodologia foram utilizados dois estéreos pares de baixa resolução de uma região da Suíça e um MDT gerado em um sistema fotogramétrico digital. Inicialmente todas as rodovias presentes nos estéreos pares foram extraídas totalizando 17.742 m divididos entre 40 extrações. Para a avaliação dos resultados experimentais foram realizadas as análises visuais e numéricas (completeza, correção), em dez extrações previamente selecionadas e organizadas em três grupos, inicialmente segundo o critério de tempo de processamento e posteriormente pelo comprimento da feição extraída, ficando: Trechos Curtos (TC) - rodovias com comprimento de até 500 m; Trechos Médios (TM) - rodovias com comprimento entre 501 e 1.000 m; Trechos Longos (TL) - rodovias com comprimento acima de 1.000 m. As observações sobre o comportamento das extrações de cada grupo estão expostas a seguir:

- Trechos Curtos (TC): Os trechos curtos apresentaram resultados satisfatórios, inclusive nas rodovias com largura maior que 3 pixels. Isso se deve a necessidade de poucos pontos sementes e baixa complexidade geométrica em curtas distâncias. Em trechos curtos a estabilidade dos pontos que formam o eixo é atingida em poucas iterações, assim o critério de parada implementado foi responsável por não haver iterações desnecessárias após a estabilidade do eixo. As linhas de busca multiresolução se destacaram como uma forma de garantir a convergência para o eixo da rodovia dos pontos inicialmente distantes.

- Trechos Médios (TM): nos experimentos com trechos médios as oclusões evidenciaram a eficiência das injunções impostas ao modelo, que forçam uma suavidade ao eixo, não sendo afetada por problemas radiométricos pontuais. Nestes experimentos também foram apresentados argumentos quanto a redundância e complementação de dados radiométricos oferecidos pela adoção de um estéreo par.

- Trechos Longos (TL): os experimento com trechos longos demonstraram a robustez da metodologia para extrações de feições com geometria complexa.

A avaliação experimental da metodologia por meio de dados reais demonstrou que o uso de injunções globais, de natureza geométrica, como a de suavidade e a que força a entidade a pertencer à superfície do MDT conferem robustez à metodologia proposta.

As principais recomendações para trabalhos futuros são:

- Adaptar o modelo de injunções de bordas (VALE, 2007) para obter melhores resultados de Correção em imagens de média e alta resolução;
- Desenvolver um modelo que explore as características de textura da feição rodovia, num MDT de altíssima resolução, para aumentar a robustez da metodologia em grandes trechos de oclusão;
- Desenvolver soluções envolvendo imagens de diferentes sensores (quadro, lineares, LiDAR);
- Desenvolver aplicações que possam se beneficiar das características da metodologia, tais como a atualização e refinamento de base de dados cartográficos.

6 REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998, 258p.

AZEVEDO, E. CONCI, A. **Computação Gráfica: teoria e prática**. Rio de Janeiro: Campus, 2003, 384p.

BAJCSY, R., TAVAKOLI, M. **Computer recognition of roads from satellite picture**. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v. 6, p. 76 – 84, 1976.

BALLARD, D. H., BROWN, C. M. **Computer Vision**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1982, 523 p.

BAUMGARTNER, A., STEGER, C., MAYER, H., ECKSTEIN, W. and EBNER, H. **Automatic Road Extraction Based on Multi-Scale, Grouping and Context**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 65(7). pp. 777–785, 1999.

DAL POZ, A. P. **Um modelo fotogramétrico inverso**: Aplicações na Cartografia. Revista Brasileira de Engenharia e Ciências Aplicadas, São Paulo, v.4, p.98-116, 1998.

DAL POZ, A. P., VALE, G. M. **Dynamic programming approach for semi-automated road extraction from medium- and high-resolution images**. In: ISPRS Commission III Symposium – PIA'03. Munich, Germany, p. 87-92, 2003.

DAL POZ, A. P., GALLIS, R. B. A., SILVA, J. F. C. **Semiautomatic road extraction by dynamic programming optimisation in the object space: Single image case**. In: ISPRS Commission III Symposium – PCV'06, Munich, Germany, p. 215-220, 2006.

DAL POZ, A. P., GALLIS, R. B. A.; SILVA, J. F. C. **Three-Dimensional Semiautomatic Road Extraction from a High-Resolution Aerial Image by Dynamic Programming Optimization in the Object-Space**. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters (Print), v. 7, p. 796-800, 2010a.

DAL POZ, A. P., GALLIS, R. B. A., SILVA, J. F.C. **Extração semi-automática de rodovia baseada em um par estéreo de imagens aéreas e em otimização por programação dinâmica no espaço-objeto**. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 16, p. 189-209, 2010b.

EGELS, Y.; KASSER, M. **Digital Photogrammetry**. New York: Taylor & Francis, 2002. 351p.

EL-SHEIMY, N. **Digital terrain modelling**. Calgary: Department of Geomatics Engineering of the University of Calgary, 1999.

FAZAN, A. J. **Predição de sombras de edifícios sobre vias urbanas com base em um modelo digital de elevações e dados de imagens aéreas de alta-resolução**. 2007. 102 f. Dissertação (Ciências Cartográficas), Faculdade de Ciência e Tecnologia, Presidente Prudente. Disponível no endereço www4.fct.unesp.br/pos/cartografia/docs/teses/d_fazan_aj.pdf

GALLIS, R. B. A., DAL POZ, A. P., BARBOSA, R. L., SILVA, J. F. C. **Extração semi-automática de rodovias através de otimização por programação dinâmica no espaço-objeto: caso mono**. In: RBC – Revista Brasileira de Cartografia. n. 57, p 168-179, 2005.

GALLIS, R. B. A. **Extração semi-automática da malha viária em imagens aéreas digitais de áreas rurais utilizando otimização por programação dinâmica no espaço objeto**. 2006. 167 f. Tese (Ciências Cartográficas), Faculdade de Ciência e Tecnologia, Presidente Prudente.

GASPAR, J. A. **Cartas e Projeções Cartográficas**. 2 ed., Lisboa: LIDEL, 2000. 292 p.

GRUEN, A., LI, H. **Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-snakes**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 63, n. 8, pp 985-995,, 1997.

HU, X., TAO, C.V., HU, Y. **Automatic Road Extraction from Dense Urban Area by Integrated Processing of High Resolution Imagery and Lidar Data**. In: XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 2004, (CD-ROM).

HU, J.; RAZDAN, A.; FEMIANE, J. C.; CUI, M.; WONKA, P., 2007. **Road network extraction and intersection detection from aerial images by tracking road footprints**. IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing, 50(12), pp. 4144-4157.

IBGE. **Noções básicas de cartografia**. Manuais técnicos em geociências n. 8, Rio de Janeiro, 1999. 130p.

KASS, M., WITKIN, A., TERZOPOULOS, D. **Snakes: Active Contour Models**. In: 1st International Conference on Computer Vision, London, England: 259-268, 1987.

KIM, T., PARK, S-R., KIM, M-G., JUNG, S., KIM, K-O. **Tracking road centerlines from high resolution remote sensing images by least squares correlation matching**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing , v. 70, n. 12, pp. 1417-1422, 2004.

LI, H. **Semi-automatic road extraction from satellite and aerial images**. 1997. 161 f. Tese (Technical Sciences), Swiss Federal Institute of Technology Zurich.

LUGNANI, J. B. **Introdução a Fototriangulação**. Curitiba: Editora UFPR, 1987,. p. 133.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology**. CRC PRESS, 2004, 323p.

MAIA, J. L. **Metodologia para avaliação de rodovias extraídas computacionalmente em imagens digitais**. 2003. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - FCT/Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2003.

MAKAROVIC, B., **Digital mono-plotters**. ITC Journal, p. 583-599, 1973.

MCKEOWN, D. M., DENLINGER, J. L., 1988. **Cooperative methods for road tracking in aerial imagery**. In: Workshop of Comp. Vision and Pattern Recogn., p. 662-672.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; McGLONE, J. C. **Introduction to modern Photogrammetry**. John Wiley & Sons, 2001. 479p.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**. 1.ed. São Paulo: Unesp, 2000. 287p.

QUAM, A. **Road tracking and anomaly detection in aerial imagery**. In: DARPA Image Understanding Workshop, p. 51-55, 1978.

ROGERS, D. F. **An introduction to NURBS: with historical perspective**. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001, 324p.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003.

SCHENK, T. **Automatic Generation of DEM's**. In: **Manual of Photogrammetry Addendum**. USA: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1996.

SILVEIRA, F.J.C., BRITO, J.L.N.S. **Fototriangulação Pelo Método Dos Feixes Perspectivos**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Programa de Pós-graduação em Engenharia de Computação – Geomática.

STOICA, R., DESCOMBES, X., ZERUBIA, J. **A Gibbs Point Process for Road Extraction from Remotely Sensed Images**. International Journal of Computer Vision, v. 57, n. 2, p. 121-136, 2004.

VALE, G. M.; DAL POZ, A. P. **Extração semi-automática do eixo de rodovia em imagens de média e alta resolução usando programação dinâmica**. In: III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2003, Curitiba. Anais do III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas (CD-ROM). 2003.

WIEDEMANN, C.; HINZ, S. **Automatic extraction and evaluation of road networks form satellite imagery**. In: International Archives of Photogrammetry and remote Sensing, Vol. 32, CD-ROM, 1999.

WOLF, P. R., DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry with Applications in GIS**. McGraw-Hill, 3rd Ed, Boston, MA, USA, 2000, p. 624.

YANG, Q.; SNYDER, J. P.; TOBLER, W. R. **Map projection transformations: Principles and applications**. Hong Kong: Taylor and Francis, 2000, 367p.