

Rodrigo Bruno Zanin



**EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE CRUZAMENTOS
SIMPLES E COMPLEXOS DE RODOVIAS EM
IMAGENS DIGITAIS DE ALTA RESOLUÇÃO**

Tese de Doutorado

Presidente Prudente
2012

Rodrigo Bruno Zanin

**EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE CRUZAMENTOS
SIMPLES E COMPLEXOS DE RODOVIAS EM
IMAGENS DIGITAIS DE ALTA RESOLUÇÃO**



Tese apresentada ao Programa de
Pós – Graduação em Ciências
Cartográficas da Faculdade de
Ciências e Tecnologia – UNESP,
como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de
doutor em Ciências Cartográficas.

**Orientador : Prof. Dr. Aluir
Porfírio Dal Poz**

Presidente Prudente
2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Z35e Zanin, Rodrigo Bruno.
Extração automática de cruzamentos simples e complexos de rodovias em imagens digitais de alta resolução / Rodrigo Bruno Zanin. - Presidente Prudente : [s.n], 2012
132 f. : il.

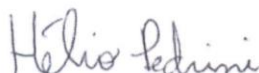
Orientador: Aluir Porfírio Dal Poz
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. Extração de rodovias. 2. Extração de cruzamentos de rodovias. 3. Modelagem topológica. I. Dal Poz, Aluir Porfírio. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

BANCA EXAMINADORA

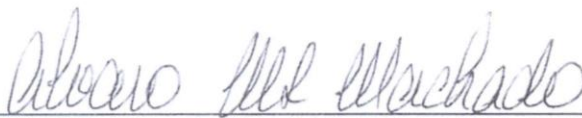


PROF. DR. ALUIR PORFIRIO DAL POZ- ORIENTADOR



PROF. DR. HELIO PEDRINI

Instituto de Computação / Universidade Estadual de Campinas



PROF. DR. ALVARO MURIEL LIMA MACHADO
Universidade Federal do Paraná-UFPr



PROF. DR. AYLTON PAGAMISSE
FCT/UNESP



PROF. DR. JOAO FERNANDO CUSTODIO DA SILVA
FCT/UNESP



RODRIGO BRUNO ZANIN

PRESIDENTE PRUDENTE (SP), 23 DE NOVEMBRO DE 2012

RESULTADO: Aprovado.

Dedico este trabalho.

Primeiro a Deus, pois sem ele nada sou.

Aos meus pais e irmão (família primeira) que me ensinaram a ser o
ser humano que me tornei.

Principalmente a minha esposa Daniela que sempre soube ser
compreensiva me apoiando nos momentos difíceis que passei na
elaboração desse trabalho.

E por fim, as minhas filhas Maria Eduarda e Maria Fernanda que
sofreram com minhas faltas para dedicar-me a este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Estadual Paulista pela formação em nível de graduação e pós-graduação, estendendo essa gratidão a cada funcionário e professor que, de uma forma ou de outra, contribuíram para que esta etapa fosse alcançada.

Agradeço à Universidade do Estado de Mato Grosso por permitir que parte do tempo que lhe deveria ser dedicado fosse utilizado na formação adquirida aqui.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso – FAPEMAT pelo apoio financeiro na forma de bolsa.

Agradeço ao professor Dr Aluir Porfírio Dal Poz pela confiança e dedicação empregada com o intuito de concluir esse trabalho.

Agradeço aos amigos atuais e passados da sala de permanência da pós-graduação, e em especial os amigos que me acompanham na carreira profissional (Érico, Marion, Claudio, Giovane Maia, Miguel, Teldo dentre outros que com certeza não teria espaço aqui para listar, mas que sempre colaboraram e torceram por mim nessa dura caminhada).

“... A vida é como andar de bicicleta. Para manter o equilíbrio, é preciso manter em movimento...”

Albert Einstein (1879 – 1955), em carta a seu filho
em 5 de fevereiro de 1930.

RESUMO

Os primeiros trabalhos relacionados à extração de rodovias em imagens digitais já contam com mais de trinta anos. No entanto, as pesquisas vinculadas à extração de rodovias e, consequentemente da malha viária, ainda estão em plena expansão, integrando métodos das áreas de Fotogrametria Digital, Processamento Digital de Imagens e Análise de Imagens. Isto é resultado da grande importância que os processos de extração da malha viária apresentam em inúmeras aplicações, tais como atualizações de Sistemas de Informações Geográficas (SIG's), planejamento viário e monitoramento de frotas. Dentre os vários desafios relacionados com as pesquisas sobre extração de malha viária, certamente pode-se incluir a extração de cruzamentos de rodovias. Considerando a complexidade e diversidade dos cruzamentos de rodovias, são poucas as informações, a priori, que podem ser utilizadas na criação de um modelo para sua extração. Neste contexto, o presente trabalho propõe um método para extração de cruzamentos de rodovias, classificados como simples e complexos, em imagens digitais de alta resolução. O método proposto utiliza alguns processos tradicionais da área de Análise de Imagens, dividindo-se em três etapas sequenciais a serem aplicadas em regiões que contenham cruzamentos de rodovias. As etapas são: pré-processamento, modelagem e filtragem topológica e o delineamento do elemento cruzamento. A avaliação experimental do método proposto foi realizada com base em cinco imagens aéreas, das quais a maioria dos cruzamentos foram selecionados para serem extraídos, totalizando 143 cruzamentos. Os resultados mostram que o método proposto é robusto e flexível. A robustez é evidenciada pelas taxas de erros obtidas de 7% e 8% respectivamente para os critérios de completeza e correção. Já a flexibilidade é evidenciada pelo fato do método de extração de cruzamentos, simples e complexos, utilizar sempre os mesmos parâmetros.

Palavras-Chave: Extração de Rodovias; Extração de Cruzamentos de Rodovias; Esqueletização de Imagens; Modelagem Topológica e Level Set.

ABSTRACT

The first works related to road extraction in digital images already have over thirty years. However, research related to the extraction of roads and consequently the road network are still in expanding, integrating methods from the fields of Digital Photogrammetry, Digital Image Processing and Image Analysis. This is result of the great importance that the process of extraction of road network present in numerous applications, such as updates to Geographic Information Systems (GIS), road planning and fleet monitoring. Among various challenges related to research on extraction of road network, certainly one can include the extraction of road junctions. Considering the complexity and diversity of road crossings, there is little information, a priori, that can be used in creating a model for extraction of road junctions. In this context, this paper proposes a method for extracting road junctions in high-resolution digital images, classified as simple and complex junctions. The proposed method uses some traditional processes in the area of Image Analysis, dividing itself into three sequential steps to be applied in regions containing road junctions. The steps are: pre-processing, modeling and topological filtering and delineation of road junction. The experimental evaluation of the proposed method was based on five aerial images, of which the majority of road junctions were selected to be extracted, totaling 143 road junctions. The results show that the proposed method is robust and flexible. The robustness is evidenced by the error rates obtained 7% and 8%, respectively, for the criteria of completeness and correctness. Already flexibility is evidenced by the fact that the extraction methods of road junctions, simple and complex, always use the same parameters.

Keywords: Road Extraction, Extraction of Road Junctions, Skeletization of Images, Modeling Topological, Level Set.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Contextualização do problema de extração de cruzamentos, nas pesquisas de extrações de feições em imagens digitais.	17
Figura 02 – Exemplo de cruzamentos simples e complexos de primeira e segunda classe; (a) Cruzamento simples em forma de X; (b) Cruzamento simples em forma de T ou Y; (c) Cruzamento complexo de primeira classe (sem ilhas); (d – e) Cruzamentos complexos de segunda classe (presença de ilhas).	18
Figura 03 – Resumo da classificação dos tipos de cruzamentos utilizados na avaliação do método.	19
Figura 04 – (a) imagem original; (b) imagem na banda vermelha – R; (c) imagem na banda verde – G; (c) imagem na banda azul – B.	30
Figura 05 – (a) Imagem resultante da aplicação do <i>Nanda</i> ; (b) Imagem resultante da aplicação do <i>DoA</i>	31
Figura 06 – Exemplo de aplicação do método para imagens que não sejam de microscopia. (RUIFROK e JOHNSTON, 2001).	35
Figura 07 – (a) Imagem original; (b-e) Suavização via EDP do calor (BARCELOS, 2002).	37
Figura 08 – Exemplo de imagem sendo interpretada como uma superfície. (a) Imagem original. (b) Superfície representando a imagem.	38
Figura 09 – (a) Exemplo de uma imagem pancromática; (b) histograma e indicação de limiar ótimo.	42
Figura 10 - Objeto ou forma com os elementos que compõem a geração do Esqueleto (adaptado de Choi et al. (1997)).	47
Figura 11 – Exemplo de discos máximos com seus respectivos graus em cada um dos pontos, p e q	48
Figura 12 – Definição de eixo médio (PEIXOTO e CARVALHO, 2000).	49
Figura 13 – Eixo Médio, representado pelos segmentos internos, para um objeto retangular.	49
Figura 14 – Exemplo de objetos com seus esqueletos (PEDRINI e SCHWARTZ, 2007).	50
Figura 15 – Exemplo da Transformada de Distância. (a) Bordas do objeto; (b) Resultado da Transformada da Distância; (c) Esqueleto do objeto.	51
Figura 16 – Transformada de Distância. (a) Imagem Binária; (b) Resultado da Transformada de Distância Euclidiana. (PEDRINI e SCHWARTZ, 2007).	51
Figura 17 – Contorno ativo com velocidades sendo aplicadas nas direções normais.	53
Figura 18 – Propagação pela curvas de nível da função ϕ no tempo (OSHER e SETHIAN, 1988).	55

Figura 19 – Tratamento do contorno ativo como uma função ϕ (Level Set) (OSHER e SETHIAN, 1988).....	56
Figura 20 – Exemplo de aplicação do <i>Level Set</i> ; (a) Imagem original com ponto inicial; (b) Resultado do algoritmo de <i>Level Set</i>	57
Figura 21 – Fluxograma do método proposto.....	58
Figura 22 – (a) Imagem original com cruzamentos destacados na forma de sub-imagens; (b – c) Exemplos de regiões de cruzamentos.	59
Figura 23 – Exemplo das Etapas do pré-processamento aplicado em uma região de cruzamento. (a) Imagem Original; (b) Imagem Suavizada; (c) Aplicação do índice espectral; (d) Binarização.	60
Figura 24 – Método de Otsu aplicado nas imagens com e sem etapas de pré-processamento. (a) imagem original; (b) imagem resultante da suavização; (c) imagem resultante do índice espectral; (d) imagem sem suavização e sem aplicação do índice espectral de rodovia; (e - f) histogramas; (g - h) resultados das limiarizações de Otsu (1979).	62
Figura 25 – Exemplos de imagens de regiões de cruzamentos, com as respectivas resultantes do pré-processamento e as estruturas espúrias. (a - b) Problemas de estruturas geradas por edificações; (c - d) Problemas de estruturas geradas por solo exposto.....	63
Figura 26 – Determinação dos EORCs: (a - d) Exemplos de aplicações da transformada do eixo médio para as regiões de cruzamento na sua forma binária, indicando os EORCs que compõem a região.	64
Figura 27 – Modelo Topológico para as estruturas presentes na região de cruzamento esqueletizada; (a) Pixels de esqueleto rotulados; (b) Ramos ou braços modelados; (c) Modelos de estruturas semânticas; (d) EORC.	65
Figura 28 – Tipos de rótulos para os pixels que formam o esqueleto. (a) Imagem Binária; (b) Esqueleto com seleção de exemplo; (c) Exemplo de pixels rotulados.	66
Figura 29 – Exemplo de modelagem topológica com duas estruturas semânticas (IE01 e IE02), que compõem o EORC, com suas respectivas informações.	67
Figura 30 – Exemplo de uma região de cruzamento com o EORC. (a) Imagem Binária da região; (b) EORC sobreposto à imagem original.	69
Figura 31 – Exemplo de uma região de cruzamento com o EORC. (a) Imagem Binária da região; (b) EORC sobreposto sobre a imagem original.....	71
Figura 32 – Pontos de interesse da estrutura filtrada sobrepostos na imagem binária.....	73
Figura 33 – Exemplo de delineamento do cruzamento em uma região na sua forma binária utilizando o algoritmo <i>Level Set</i>	74
Figura 34 – Exemplo de aplicação do algoritmo <i>Level Set</i> ; (a) Pontos de Interesse como pontos iniciais ao <i>Level Set</i> na região binária; (b) Resultado do delineamento do cruzamento entre as outras estruturas na região; (detectado e delineado); (c) Sobreposição do Cruzamento Extraído na imagem original.....	74
Figura 35 – Representações para o cruzamento de referência; o cruzamento extraído e a intersecção entre os cruzamentos de referência e extraído.....	78
Figura 36 – Ortoimagens da câmara ADS40; (a) ADS1; (b) ADS2.....	80

Figura 37 – Ortoimagens geradas das imagens aéreas. (a) Aerial_1; (b) Aerial_2; (c) Aerial_3	81
Figura 38 – Exemplos de cruzamentos da imagem ADS1. (a) Cruzamento 08. (b) Cruzamentos 09.	83
Figura 39 – Taxa de ruído para um conjunto de 30 imagens originais e após a aplicação de três conhecidas formas de atenuação de ruídos (fluxo de curvatura média, difusão anisotrópica, mediana).	85
Figura 40 – Exemplo de cruzamento com estruturas detectadas na forma de bordas, plotadas sobre a imagem.....	86
Figura 41 – Exemplo de uma da imagem de cruzamento com σ_i variando no intervalo $\left[\frac{k_0}{5}, 5k_0\right]$ e os respectivos números de estruturas detectadas $\#E_i$	87
Figura 42 – Gráfico da média dos números de estruturas detectadas em função do nível de suavização para cada um dos conjuntos de cruzamentos utilizados neste trabalho.	88
Figura 43 – Comparação dos histogramas da região de cruzamento com os histogramas da imagem mais abrangente para os canais RGB. (a) Região de cruzamento de rodovias com os seus histogramas para os canais RGB; (b) Imagem mais abrangente com seus respectivos histogramas nos canais RGB.....	90
Figura 44 – Gráfico de refletância em função do comprimento de onda de alguns elementos que podem compor uma região de cruzamento. Fonte (BOWKER, 1985).....	91
Figura 45 – (a) Região de cruzamento com suas respectivas amostras; (b) Amostra de região de vegetação rasteira – Quadro 01; (c) Amostra de região de vegetação densa – Quadro 02; (d) Amostra da região de rodovia – Quadro 03; (e) Matriz com vetores de indicações de cores para os elementos da região de cruzamento de rodovias.	92
Figura 46 – Resultados do índice utilizado. (a) Vegetação rasteira; (b) Vegetação densa; (c) Rodovias.....	93
Figura 47 – Imagem teste 01 (ADS1) – 15 cruzamentos selecionados.	95
Figura 48 – Resultado da Extração para os cruzamentos inferior a 80%. (a) Cruzamento 04; (b) Cruzamentos 06; (c) Etapas de pré-processamento.	96
Figura 49 – Resultado da extração para o cruzamento 15, cuja correção foi inferior a 80%.	97
Figura 50 – Exemplo de Resultados satisfatórios para cruzamentos da imagem teste 01. (a) Cruzamento 09; (b) Cruzamento 10.....	97
Figura 51 – Exemplo do resultado da extração de um cruzamento complexo com a presença de ilha. Imagem teste 01 – Cruzamento 05.	98
Figura 52 – Imagem teste 02 (ADS2) – 19 cruzamentos selecionados.	100
Figura 53 – Resultados das Extrações dos cruzamentos sobrepostos sobre as imagens originais. (a) cruzamento 13; (b) cruzamento 16.....	101

Figura 54 – Exemplo de resultado da extração insatisfatória para completeza. (a) Resultado da segmentação e do delineamento; (b) Sobreposição do cruzamento extraído sobre imagem original para o cruzamento 17.....	101
Figura 55 – Cruzamentos 01 e 12. (a – b) Resultados das Extrações plotados sobre as imagens originais; (c – d) Resultados do pré-processamentos e delineamentos dos cruzamentos com exemplos de estruturas espúrias.....	102
Figura 56 – Resultado da extração dos cruzamentos frente a problemas comuns, sobrepostos sobre as imagens originais. (a) Cruzamento 03; (b) Cruzamento 05.....	103
Figura 57 – Resultados da extração sobrepostos sobre as imagens originais. (a) Cruzamento 10; (b) Cruzamento 11.	104
Figura 58 – Imagem teste 03 (Aerial_1) – 30 cruzamentos selecionados.	105
Figura 59 – Resultado da extração do cruzamento 21, sobreposto sobre a imagem original.....	107
Figura 60 – Resultado da extração para cruzamentos que apresentaram problemas de correção na imagem teste 03; (a) Cruzamento 06; (b) Cruzamento 07.....	107
Figura 61 – Resultados para Extração de cruzamentos complexos de segunda classe. (a) Cruzamento 13; (b) Cruzamento 22.	108
Figura 62 – Exemplo da importância do pré-processamento. (a – b) Resultados dos pré-processamentos e delineamentos para os cruzamentos 20 e 23; (c) Resultado da extração plotado sobre imagem original do cruzamento 20; (d) Falha total para o cruzamento 23.....	109
Figura 63 – Resultado da extração para os cruzamentos 25 e 26. (a) Resultado sobreposto sobre imagem original do cruzamento 25; (b) Resultado sobreposto sobre imagem original do cruzamento 26; (c – d) Resultados do pré-processamentos com esqueletos e cruzamentos delineados.	110
Figura 64 – Imagem teste 04 (Aerial_2) – 40 cruzamentos selecionados.	111
Figura 65 – Exemplos de extração com problemas de sombra para imagem teste 04. (a) Resultado da extração para o cruzamento 04; (b) Resultado da extração para o cruzamento 32; (c) Resultado do pré-processamento e do delineamento do cruzamento 32.....	113
Figura 66 – Resultados das extrações plotados sobre imagens originais em cruzamentos que apresentam problemas de correção para imagem teste 04; (a) Cruzamentos 03; (b) Cruzamento 13; (c) Cruzamento 23.....	113
Figura 67 – Resultado da extração para o cruzamento 37 sobreposto sobre a imagem original, indicando a residência delineada como falso positivo junto ao cruzamento.....	114
Figura 68 – Resultados de Extrações para cruzamentos complexos de segunda classe para imagem teste 04. (a) Cruzamento 11; (b) Cruzamento 12; (c) Cruzamento 27.....	114
Figura 69 – Exemplos de resultados satisfatórios para extração de cruzamentos com solo exposto nas adjacências, isolados no pré-processamento para a imagem teste 04. (a) Cruzamento 14; (c) Cruzamento 26; (c – d) Resultado do pré-processamento para os cruzamentos 14 e 26.....	115

Figura 70 – Exemplos de resultados satisfatórios para cruzamentos com estruturas espúrias, tais como residências; (a – b) Resultados dos pré-processamentos com esqueletos e cruzamentos delineados para cruzamentos 17 e 36; (c – d) Resultados das extrações sobrepostas sobre os cruzamentos 17 e 36 originais.	116
Figura 71 – Imagem teste 05 (Aerial_3) – 39 cruzamentos selecionados.	117
Figura 72 – Exemplos de resultados de extrações considerados insatisfatórios no critério completeza para imagem teste 05.(a – b) Resultados dos pré-processamentos; (c – d) Extrações sobrepostos sobre as imagens originais para os cruzamentos 17 e 30.	119
Figura 73 – Exemplos de resultados de extrações consideradas insatisfatórios com relação ao critério correção para imagem teste 05. (a – b) Resultados das extrações sobrepostos sobre os cruzamentos 06 e 34.	120
Figura 74 – Exemplos de resultados de extrações considerados insatisfatórios com relação ao critério correção para imagem teste 05, (a – c) Resultados das extrações sobrepostos sobre os cruzamentos 26, 28 e 37.	120
Figura 75 – Resultado da extração para os cruzamentos complexos de segunda classe da imagem teste 05. (a – b) Resultados sobrepostos sobre as imagens originais para os cruzamentos 09 e 14.....	121
Figura 76 – Gráfico para resultados globais das imagens testes.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Relatório das Estruturas Semânticas - RES	68
Tabela 02 – Relatório dos Ramos das Estruturas Semânticas - RRES.....	68
Tabela 03 – Relatório dos Ramos das Estruturas Semânticas (RRES), da figura 30	69
Tabela 04 – Relatório das Estruturas Semânticas (RES), da figura 30.	70
Tabela 05 – Relatório dos Ramos das Estruturas Semânticas (RRES), da figura 31	71
Tabela 06 – Relatório das Estruturas Semânticas (RES), da figura 31.	71
Tabela 07 – Indicadores de Qualidade para os Cruzamentos da Imagem Teste 01	94
Tabela 08 – Indicadores de Qualidade para os Cruzamentos da Imagem Teste 02	99
Tabela 09 – Indicadores de Qualidade para os Cruzamentos da Imagem Teste 03	106
Tabela 10 – Indicadores de Qualidade para os Cruzamentos da Imagem Teste 04	112
Tabela 11 – Indicadores de Qualidade para os Cruzamentos da Imagem Teste 05	118

SUMÁRIO

1	Introdução	16
1.1	Considerações Iniciais	16
1.2	Trabalhos Relacionados	19
1.3	Objetivos	25
1.4	Estrutura da Tese	26
2	Fundamentação Teórica	27
2.1	Índices Espectrais	27
2.1.1	NDVI	28
2.1.2	Índices para imagens RGB	29
2.1.3	Deconvolução de Cores	32
2.2	Suavização de Imagens	35
2.2.1	Fluxo de Curvatura Média	37
2.2.2	Difusão Anisotrópica	39
2.3	Limiarização de Otsu	41
2.4	Esqueletização de Imagens	46
2.4.1	Conceitos Fundamentais sobre Esqueletização	47
2.4.2	Transformada do Eixo Médio	49
2.4.3	Transformada de Distância	50
2.5	Método Level Set	52
3	Método Proposto	58
3.1	Pré – processamento	60
3.1.1	Suavização da Imagem	60
3.1.2	Aplicação do índice espectral	61
3.1.3	Binarização da Região de Cruzamento	61
3.2	Modelagem e Filtragem Topológica	62
3.2.1	Esqueletização da Região de Cruzamento	64
3.2.2	Análise do Esqueleto	65
3.2.3	Filtragem Topológica do Esqueleto	69
3.3	Delineamento do Cruzamento	72
3.3.1	Aplicação do Algoritmo de “Level Set”	73
4	Materiais e Métodos	76
4.1	Aspectos Computacionais	76

4.2	Procedimentos para Análise dos Resultados	77
4.3	Imagens Utilizadas Para Testes	79
5	Resultados Experimentais e Análises	82
5.1	Experimentos para estimar parâmetros.....	82
5.1.2	Parâmetros do algoritmo de suavização.....	82
5.1.1.1	Estimativa da taxa de ruído na imagem	83
5.1.1.2	Estimativa do parâmetro de suavização	84
5.1.2	Parâmetros do índice espectral.....	89
5.2	Experimentos para avaliação do método	93
5.2.1	Imagem teste 01	94
5.2.2	Imagem teste 02	98
5.2.3	Imagem teste 03	104
5.2.4	Imagem teste 04	110
5.2.5	Imagem teste 05	116
5.2.6	Síntese	122
6	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	123
6.1	Conclusões.....	123
6.2	Trabalhos Futuros	126
7	Referências Bibliográficas.....	127

1 Introdução

O capítulo introdutório do presente trabalho está dividido em quatro seções, apresentando primeiramente as considerações iniciais que esboçam de forma geral a motivação para realizar a pesquisa. A segunda seção é destinada para os trabalhos relacionados, na qual se faz uma revisão dos principais estudos sobre o tema e determina-se onde se enquadra o presente trabalho. Por fim as duas últimas seções apresentam o objetivo geral deste bem como sua estrutura e organização.

1.1 Considerações Iniciais

A utilização de imagens digitais, sejam elas orbitais ou aéreas, é a principal fonte de informações na forma de extrações de feições para a geração e atualização de dados cartográficos e topográficos. Segundo Mena (2003), a extração de informações destes dados é uma área de grande interesse para aplicações em Geociências e, nesse sentido, a extração automática de objetos (feições) em imagens digitais vem sendo amplamente pesquisada em Análise de Imagens e Visão Computacional, alcançando papel de destaque nas pesquisas para geração e atualização de bancos de dados de SIG's (Sistemas de Informações Geográficas).

Com os avanços tecnológicos e a redução dos custos para aquisição de imagens, estas vêm se popularizando cada vez mais e suas aplicações tem se expandindo para várias áreas. No entanto, a interpretação e a análise dos dados provenientes dessas imagens ainda continuam sendo tarefas difíceis e de realização manual em boa parte das aplicações (POULLIS e YOU, 2010).

Trabalhos vinculados à extração de feições para geração e atualização de SIG's normalmente são divididos em dois problemas. Um deles está dedicado a extração de construções ou rodovias, que são feições antrópicas, enquanto que o outro está voltado para extração de feições naturais como, por exemplo, vegetação ou corpos d'água, normalmente categorizando o uso e a ocupação do solo.

Segundo Dal Poz et al. (2005), entre os trabalhos vinculados à extração de rodovias, que de forma mais ampla são pesquisas de extração da malha viária, existem duas

etapas bem definidas que são a extração de segmentos de rodovias e a extração dos cruzamentos de rodovias, que juntos compõem a malha viária (figura 01).

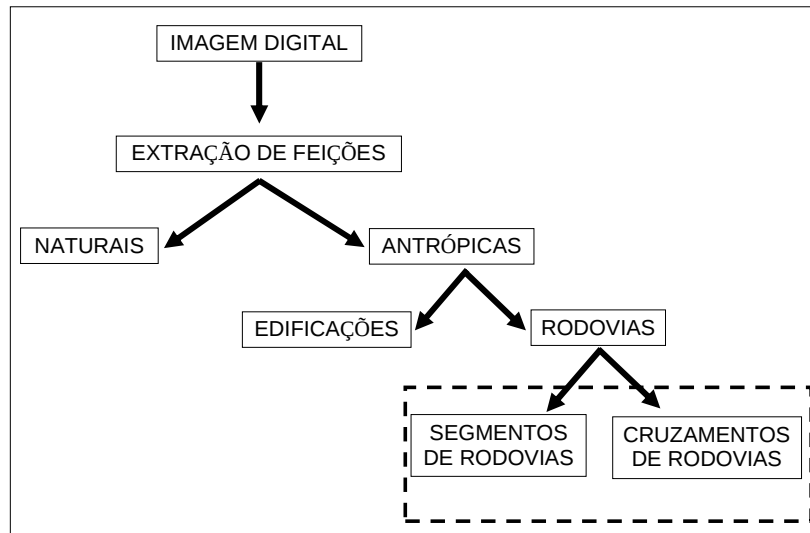


Figura 01 – Contextualização do problema de extração de cruzamentos, nas pesquisas de extrações de feições em imagens digitais.

Nesse sentido, o presente trabalho é focado no problema de extração de cruzamentos de rodovias, uma vez que a extração desse elemento é fundamental para a complementação da malha viária.

A maior dificuldade em se criar um modelo para extração dos cruzamentos de rodovias está na complexidade e diversidade que estes apresentam na malha viária, bem como a quantidade de informações que, a priori, podem ser utilizadas para se criar o modelo e/ou método de extração, haja vista serem bastante reduzidas quando comparada com as informações utilizadas a priori nos métodos de extração de rodovias.

Neste contexto a extração de cruzamentos de rodovias é um problema que deve ser resolvido nas pesquisas que pretendem extrair, corrigir ou atualizar a malha viária com base em imagens digitais.

Do ponto de vista semântico, um cruzamento de rodovias pode ser caracterizado como uma região na imagem em que um ou mais segmentos de rodovias se interceptam. Alguns exemplos de cruzamentos de rodovias são apresentados na figura 02.

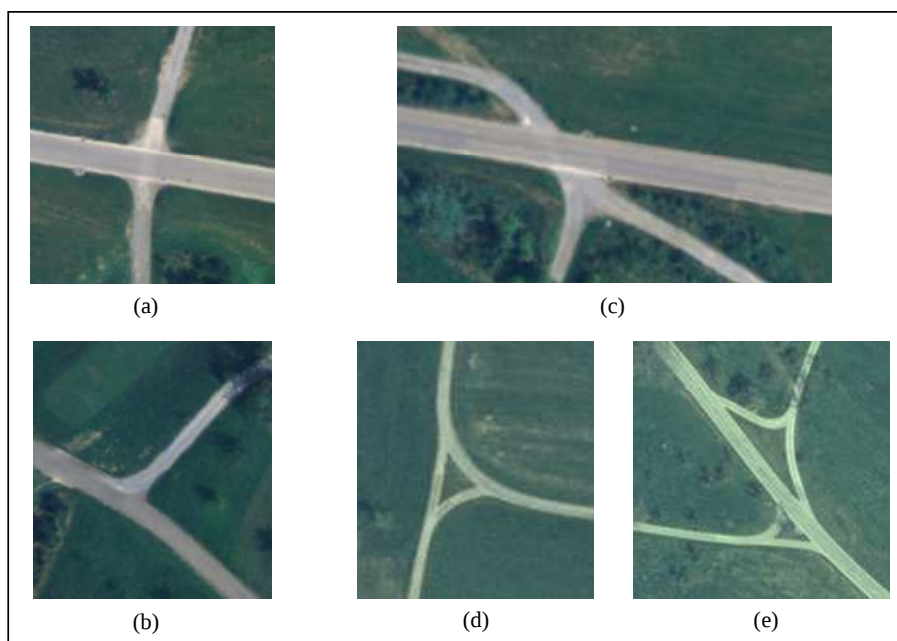


Figura 02 – Exemplo de cruzamentos simples e complexos de primeira e segunda classe; (a) Cruzamento simples em forma de X; (b) Cruzamento simples em forma de T ou Y; (c) Cruzamento complexo de primeira classe (sem ilhas); (d – e) Cruzamentos complexos de segunda classe (presença de ilhas).

Não existe na literatura um consenso para classificação dos tipos de cruzamentos de rodovias que, normalmente, aparecem na malha viária. Neste trabalho, optou-se por criar uma classificação para os tipos de cruzamentos tomando como base o número de pontos de interseção, definidos como pontos de cruzamentos (P_c). Nesse sentido, os cruzamentos são classificados como simples se têm apenas um ponto de cruzamento ($P_c = 1$) e como complexos, quando existem mais pontos de cruzamentos ($P_c > 1$).

Uma subdivisão baseando-se no número de ramos ou braços, que são segmentos de rodovias interligados, também pode ser criada para os cruzamentos simples que podem ser do tipo “Y” ou “T” (figura 02(b)) quando apresentam 3 braços ou ramos, ou em “X” quando os mesmos têm 4 braços ou ramos, como indica a figura 02(a).

Os cruzamentos complexos também podem ser divididos em complexos de primeira classe, quando os mesmos não têm ilhas (figura 02(c)), e complexos de segunda classe quando há presença de “ilhas” no seu interior (figura 02(d,e)). Um resumo dessa classificação é apresentado na figura 03.

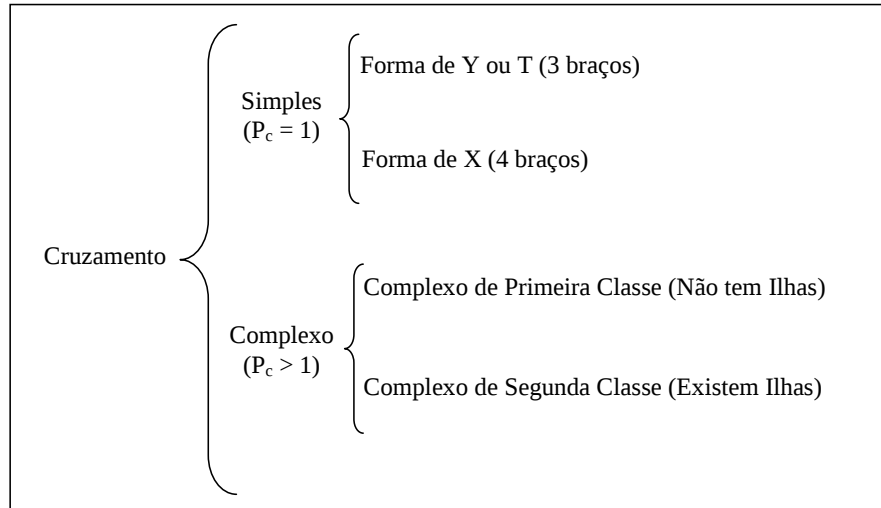


Figura 03 – Resumo da classificação dos tipos de cruzamentos utilizados na avaliação do método.

1.2 Trabalhos Relacionados

O problema de extração de cruzamentos de rodovias é contemporâneo ao problema de extração de segmentos de rodovias, pois os primeiros trabalhos debruçados sobre a extração de cruzamentos (De GUNST, 1994; e HEIPKE, 1995) são na verdade trabalhos destinados à extração de rodovias, os quais acabam extraíndo alguns cruzamentos para gerar a malha viária com base em um agrupamento perceptual das hipóteses de rodovias e suas respectivas intersecções.

Estes métodos são dependentes do comportamento espectral e da qualidade geométrica da rodovia, assim os mesmos estão suscetíveis aos erros que pequenas mudanças nessas características podem introduzir na forma do cruzamento (BOICHIS et al., 2000). Por exemplo, estruturas como ilhas que podem aparecer no interior das regiões de cruzamentos se tornam um sério problema nestas técnicas que envolvem o agrupamento perceptual das hipóteses de rodovias.

De Gunst (1994) apresentou um trabalho que utiliza as características geométricas para extração dos segmentos de rodovias, enquanto Ruskoné (1996) realiza a extração dos segmentos utilizando o perfil radiométrico do leito da rodovia. Em ambos os trabalhos a detecção dos cruzamentos baseia-se em variações abruptas das larguras das rodovias, para o caso geométrico, e na variância dos tons de cinza para o caso radiométrico.

Wiedemann e Hinz (1999) e Baumgartner et al. (1999) desenvolveram trabalhos que detectam os pontos de cruzamentos das rodovias baseando-se na intersecção dos eixos das rodovias que são prolongados até a intersecção.

O trabalho de Baumgartner et al. (1999) é baseado no agrupamento perceptual das hipóteses de rodovias, sendo o agrupamento realizado através do espaço-escala para extrair os segmentos de rodovias. Nesse método, os cruzamentos são detectados nos pontos de intersecção das linhas em baixa resolução e o delineamento do cruzamento é realizado na imagem de alta resolução utilizando um método de contorno ativo denominado “*Snakes*” (KASS et al., 1987).

Laptev (1997), Mayer et al. (1998), Laptev et al. (2000) e Péteri e Ranchin (2006), também utilizam um modelo de “*Snakes*” para delinear as regiões de cruzamentos que, normalmente, são detectados como prolongamentos dos segmentos de rodovias extraídos em etapas anteriores.

Um método específico para extração de cruzamentos, similar ao apresentado por Baumgartner et al. (1999), é apresentado por Zanin e Dal Poz (2003). Nesse trabalho o ponto de cruzamento das rodovias é encontrado como a união do ponto de intersecção de dois ou mais segmentos de rodovias (DAL POZ et al., 2005), que em baixa resolução são modelados como linhas. Baseando-se no ponto de cruzamento definido, a metodologia realiza uma busca entre as primitivas do elemento cruzamento, que são suas bordas extraídas em alta resolução, para então ligar essas bordas aos segmentos de rodovias delineando a região de cruzamento.

A estratégia proposta por Heipke et al. (1995) também extrai os cruzamentos de rodovias no espaço-escala, com a diferença que neste trabalho o delineamento em alta resolução é baseado em critérios geométricos e radiométricos do elemento cruzamento.

Boichis et al. (1998) e Boichis et al. (2000) apresentaram um método para extração de cruzamento de rodovias em imagens aéreas baseado nos conhecimentos a priori dos cruzamentos, que são obtidos em um SIG (Sistema de Informações Geográficas). Nestes trabalhos a etapa de pré-processamento define uma lista de possíveis feições, às quais são atribuídas medidas de qualidade que são utilizadas na comparação das mesmas. No banco de dados, as características das feições que compõem o cruzamento são comparadas com as medidas de qualidade na tomada de decisão.

Tomando por base um conjunto de regras que levam em consideração os atributos dos segmentos de rodovias, Teoh e Sowmya (2000) propõem a extração dos

cruzamentos de rodovias utilizando um modelo supervisionado, baseando-se na correlação com modelos de cruzamentos utilizados como referências.

Barsi et al. (2002) desenvolveram um método para detectar cruzamentos nas zonas rurais em ortoimagens com resolução de 0,4 m denominado JEANS (*“Junction Extraction by Artificial Neural Network”*). Neste sistema, a extração ocorre em função de uma rede neural que é treinada com alguns cruzamentos selecionados na imagem. O sistema JEANS teve algumas melhorias desenvolvidas em Barsi e Heipke (2003) que permitiram ao sistema detectar também cruzamentos gerados por segmentos de rodovias com diferentes larguras e orientações, diminuindo a taxa de erro do processo anterior.

Wiedemann (2002) apresentou uma metodologia focada na melhoria dos cruzamentos de rodovias extraídos em baixa resolução no trabalho de Baumgartner et al. (1999). As melhorias são baseadas em um conjunto de regras utilizadas para avaliar os cruzamentos, tais como curvatura média, variação da curvatura média e homogeneidade dos tons de cinza sobre as linhas centrais dos segmentos que compõem o cruzamento. Essas medidas são transformadas em atributos preliminares para uma função *“fuzzy”*, que determina a existência ou não das intersecções dos segmentos de rodovias.

Em Silva e Dal Poz (2003) é desenvolvido um método para determinar a reconstrução de cruzamentos de rodovias em imagens aéreas em regiões rurais. Este método é baseado em algumas regras topológicas da malha viária, de forma que as hipóteses de rodovias extraídas em Dal Poz (2003) são organizadas e rotuladas em função do número de segmentos de rodovias que compõem o respectivo cruzamento, ou seja, parte-se do princípio que os cruzamentos de rodovias possuem formas básicas (como X, T, Y, L) que são então modeladas topologicamente.

Contrapondo-se aos dos trabalhos em que os cruzamentos são detectados com base na intersecção das rodovias extraídas em processos anteriores, Zhang e Couloigner (2004) e Koutaki e Uchimura (2004), desenvolveram métodos em que a malha viária é construída com base nas ligações dos cruzamentos que são detectados de forma independente.

No trabalho de Zhang e Couloigner (2004) que tem como principal objetivo a detecção automática de alterações nas rodovias e atualização de SIG's, a detecção dos cruzamentos de rodovias é baseada em uma análise local no domínio da frequência, que neste caso é a transformada *wavelet* (DAUBECHIES, 1990). A hipótese do trabalho é que a região de cruzamento de rodovias tem um coeficiente da transformada *wavelet* com máximo local, medido em uma vizinhança de 7 por 7 pixels para uma máscara que percorre toda a imagem, buscando os referidos pontos de cruzamentos.

Em Koutaki e Uchimura (2004), a detecção dos cruzamentos ocorre em função de uma correlação com modelos definidos, que utilizam as características de uma imagem com resolução de 0,5 m. Os modelos de cruzamentos utilizados são do tipo X, T ou Y e o processo de comparação utiliza uma estratégia do grosseiro para o fino reduzindo a complexidade computacional. Após a extração dos cruzamentos, as rodovias são extraídas buscando conexões entre eles.

Gautama et al. (2004) apresentaram um trabalho para detectar cruzamentos de rodovias em imagens orbitais de alta resolução, utilizando os resultados obtidos com o detector de linhas e melhorando-os. Nesse método, primeiro realiza-se a detecção de rodovias com base em um detector de linhas, depois aplica-se um algoritmo de crescimento de regiões guiado pelo perfil das linhas detectadas e definindo o ponto de cruzamento (intersecção dos segmentos de rodovias). Por fim, uma verificação utilizando análise de formas é realizada na região de cruzamento para confirmação.

O método apresentado por Niu (2006), também é baseado em contorno ativo geométrico e realiza a extração de rodovias e veículos em áreas rurais e urbanas. Nesse método os cruzamentos são extraídos como conexão dos segmentos de rodovias, sem a necessidade de um modelo específico para extração da feição cruzamento.

O trabalho desenvolvido por Negri et al. (2006) é dedicado à extração de rodovias em áreas urbanas a partir de imagens RADAR de alta resolução. Neste trabalho, o método também é guiado no espaço-escala e realiza a extração de rodovias baseando-se na otimização em campos aleatórios de Markov. Os cruzamentos simples na forma de “T” e “L” são construídos com informações a priori de forma a incorporá-las ao modelo baseado em campos aleatórios de Markov.

Hu et al. (2007) apresentou um trabalho para extração de rodovias que utiliza um método definido como traçador de rodovias, que é guiado por um modelo que baseia-se na teoria dos grafos. Neste método a malha viária tem sua representação em grafos, ou seja, as arestas representam os segmentos de rodovias e suas ligações são representadas pelos vértices do grafo. Nesta abordagem, os cruzamentos são detectados nos vértices que tenham mais de duas arestas ligadas a ele.

Ravanbakhsh et al. (2008) desenvolveram um modelo para a extração de cruzamento em imagens aéreas de alta resolução, baseando-se em três etapas distintas que são: pré-análise de um SIG da área de interesse para determinar o ponto de cruzamento; extração das sementes de rodovias que compõem a região de cruzamento; e reconstrução do

cruzamento de rodovias, que é realizada utilizando um modelo de “*Snakes*” denominado “*Ziplok Snakes*”, o qual faz a conexão da sementes de rodovias.

Um tipo específico de cruzamento de rodovia, comumente conhecido como rotatória, é abordado no trabalho de Ravanbakhsh e Fraser (2009). Nesse trabalho, um conhecimento a priori é utilizado para definir a região de rotatória e o seu delineamento ocorre em função de um modelo de “*Snakes*” específico que é aplicado sobre a região de cruzamento.

A extração de ilhas em cruzamentos, definidos como complexos, aparece no trabalho de Ravanbakhsh e Fraser (2010). Esse elemento que também pode compor a região de cruzamento, é considerado por Ravanbakhsh e Fraser (2010) como de difícil extração. Assim uma metodologia específica para extração de ilhas presentes nos cruzamentos foi desenvolvida. A extração das ilhas também ocorre em função do método de contorno ativo geométrico definido como “*Level Set*”, que vai se ajustando ao formato da ilha em uma região de cruzamento já binarizada.

Zanin et al. (2010) desenvolveram um trabalho que realiza a extração de cruzamentos simples, tomando por base o esqueleto da região de cruzamento na sua binária. Nesse trabalho, os falsos positivos são filtrados tomando como base um modelo topológico da região de cruzamento. Por fim, a extração do cruzamento ocorre em função do esqueleto que é utilizado como filtro para encontrar as bordas que realmente fazem parte do cruzamento.

No trabalho de Ahmed et al. (2010) também é proposto um método para determinar pontos de cruzamentos, baseando-se em linhas resultantes do processo de afinamento da morfologia matemática (processo de esqueletização). A diferença desse trabalho é que as etapas de pré-processamento ocorrem combinando várias técnicas de morfologia matemática. Um trabalho bastante similar é apresentado por Ahmaed e Rahman (2011) que, após realizar as mesmas etapas indicadas anteriormente, também realiza uma correlação nos pontos de cruzamentos com formas pré-definidas de tipos de cruzamentos (X, Y e T), obtendo o delineamento da região de cruzamento.

Kosov et al. (2012) desenvolveram um método específico para classificação de imagens em regiões de cruzamentos utilizando uma abordagem baseada em campos aleatórios de Markov. Os parâmetros utilizados nesse modelo definem classes diferentes para as principais feições presentes na cena. O modelo completa a classificação fundindo dados de um modelo digital de superfície com uma ortofoto da região gerando uma classificação definida como 3D.

De forma geral, os trabalhos apresentados tratam da extração de cruzamentos de forma independente ou como uma das etapas do processo de extração de rodovias. No intuito de localizar este trabalho como um trabalho específico para extração de cruzamentos, o quadro 01 mostra uma divisão dos métodos que tratam a extração de cruzamentos enquanto processo principal ou complementar.

<u>Trabalhos específicos sobre Cruzamentos de Rodovias</u>	<u>Trabalhos que abordam Cruzamentos de Rodovias</u>
Boichis et al. (1998) Boichis et al. (2000) Teoh e Sowmya (2000) Barsi et al. (2002) Wiedemann (2002) Zanin e Dal Poz (2003) Barsi e Heipke (2003) Silva e Dal Poz (2003) Gautama et al. (2004) Ravanbakhsh et al. (2008) Ravanbakhsh e Fraser (2009) Ravanbakhsh e Fraser (2010) Zanin et al. (2010) Ahmed et al. (2010) Ahmaed e Rahman (2011) Kosov et al. (2012)	De Gunst (1994) Heipke et al. (1995) Ruskoné (1996) Laptev (1997) Mayer et al. (1998) Wiedemann e Hinz (1999) Baumgartner et al (1999) Laptev et al. (2000) Zhang e Couloigner (2004) Koutaki e Uchimura (2004) Péteri e Ranchin (2006) Niu (2006) Negri et al. (2006) Hu et al. (2007)
(a)	(b)

Quadro 01 – Resumo dos trabalhos sobre extração de rodovias; (a) Trabalhos específicos sobre extração de cruzamentos de rodovias; (b) Trabalhos que abordam extração de cruzamentos de rodovias.

Como pode ser verificado no quadro 01, também é possível dividir os trabalhos relacionados com extração de cruzamentos em dois momentos. No primeiro momento que vai até 2003, poucos trabalhos eram exclusivos para cruzamentos, sendo que a extração dos cruzamentos era realizada com base em um agrupamento perceptual dos segmentos de rodovias. Este quadro começou a mudar no período posterior a 2003, pois começaram a aparecer mais trabalhos relacionados exclusivamente aos cruzamentos, fato que mostra o grande desafio que esse tema é para as pesquisas vinculadas à extração de rodovias.

Uma constatação entre os trabalhos citados anteriormente é a falta de um método que seja capaz de realizar a extração de cruzamentos simples e complexos, como os que estão exemplificados na figura 02, garantindo a extração independentemente do tipo de cruzamento.

A maioria dos métodos apresentados são para extrações de cruzamentos simples, e para os poucos casos de cruzamentos complexos uma metodologia específica é necessária. Essa metodologia normalmente é necessária para extração dos elementos que compõem a região de cruzamentos definidos como complexos, como por exemplo as ilhas ou rotatórias.

Nesse sentido, o método que será proposto neste trabalho tem a vantagem de extrair os cruzamentos simples e complexos sem a necessidade de uma classificação e, conseqüentemente, da aplicação de um procedimento específico na extração destes cruzamentos. O método a ser desenvolvido também propõe atingir um alto grau de automação, procurando utilizar os mesmos parâmetros para todas as imagens e assim reduzir ao máximo a intervenção do operador.

1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é propor um método de extração (detecção e delineamento) de cruzamentos simples e complexos em imagens digitais de alta resolução. Este método deverá utilizar ferramentas tradicionais de análise de imagens criando um modelo topológico que permita filtrar estruturas espúrias na região de cruzamento, delineando somente o elemento cruzamento. O método proposto deverá ser robusto o suficiente para que não seja necessária uma classificação prévia do tipo de cruzamento a ser extraído, minimizando o número de parâmetros utilizados.

Os objetivos específicos são:

- Estudar e agregar ferramentas de análise de imagens tais como a suavização, aplicação de índices espectrais, segmentação, esqueletização e contorno ativo geométrico, integrando-as em um sistema capaz de realizar a extração de cruzamentos simples e complexos de rodovias.
- Criar um modelo topológico para o elemento cruzamento de modo a permitir uma filtragem topológica da região de cruzamento, separando o elemento cruzamento das estruturas espúrias que possam existir na região de cruzamento.

- Criar uma metodologia para comparar e avaliar os resultados da extração, utilizando o método proposto com dados extraídos manualmente e definidos como referências.

1.4 Estrutura da Tese

Esta tese é organizada em seis capítulos com a seguinte sequência: O Capítulo 01 contém a Introdução e logo após seguem os principais fundamentos teóricos (Capítulo 2), utilizados para o desenvolvimento do método proposto No Capítulo 03 o método para extração de cruzamento é apresentado e o Capítulo 04 é reservado para materiais e métodos que são utilizados na avaliação do trabalho, seguido pelas discussões e análises dos resultados que são apresentadas no Capítulo 05. Por último, o Capítulo 06 apresenta as principais conclusões e perspectivas de trabalhos futuros para o tema extração de cruzamentos em imagens digitais.

2 Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica dos principais conceitos e técnicas utilizadas no método proposto para a extração automática de cruzamentos de rodovias. A seção 2.1 discute algumas características fundamentais da utilização dos índices espectrais para o processamento de imagens multiespectrais. Na seção 2.2 é apresentada uma breve revisão dos conceitos relacionados à suavização de imagens, tomando como base as Equações Diferenciais Parciais (EDP). A limiarização de Otsu (1979) é tratada na seção 2.3 com a apresentação das principais equações utilizadas nesse método. A seção 2.4 apresenta as principais técnicas do processo de esqueletização de imagens. Por último, a seção 2.5 apresenta o método *Level Set* para delineamento de objetos em imagens digitais, tomando como base o contorno ativo ou modelos deformáveis.

2.1 Índices Espectrais

A segmentação eficiente e automática de imagens é um importante passo em muitas aplicações na análise de imagens como, por exemplo, na identificação de áreas com vegetação e, conseqüentemente, áreas definidas como não antrópicas. Nesse contexto, os índices espectrais são fundamentais para os processos de segmentações de imagens multiespectrais, pois podem ser definidos como o resultado de uma operação aritmética entre os valores numéricos dos pixels nas bandas de uma imagem, obtendo a chamada imagem índice que explicita as características necessárias para a segmentação.

Os índices de vegetação são os índices espectrais mais utilizados na área de Sensoriamento Remoto, sendo utilizados desde a década de 1970. Estes índices têm uma ampla gama de aplicações tais como: monitoramento de vegetação, modelagem hidrológica; atividades agrícolas e estudos vinculados a variações sazonais da ecologia da paisagem, dentre outros (VERSTRAETE e PINTY, 1996).

Estes índices podem ser definidos como medidas radiométricas e adimensionais que combinam informações de diferentes canais do espectro, especialmente no vermelho e infra-vermelho próximo. A aplicação dos índices tem o intuito de melhorar o sinal

da vegetação e geralmente são computados para todos os pixels da imagem, o que facilita a sua aplicação e faz com que sejam amplamente utilizados dentro da comunidade científica.

2.1.1 NDVI

O NDVI é um dos principais índices utilizados na literatura para destacar a vegetação em uma imagem de Sensoriamento Remoto. Este índice utiliza a relação entre as bandas vermelha e o infra-vermelho próximo destacando a vegetação do restante da imagem (Huete et al. 2002).

Como a energia refletida na banda vermelha diminui com o desenvolvimento da planta (processo de absorção de clorofila na folha) e, por outro lado, a energia refletida na banda infra-vermelho aumenta com o desenvolvimento da planta (processo de dispersão em folhas saudáveis), o índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) consiste na diferença normalizada entre dois canais, como indica a equação 01:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (01)$$

em que ρ_{RED} e ρ_{NIR} são os valores para as medidas de reflectância do vermelho e do infra-vermelho próximo, respectivamente.

O NDVI varia de valores próximos a 0 em áreas áridas ou estéreis, até valores próximos a 1 em áreas de vegetação densa. Os valores negativos do NDVI geralmente correspondem a áreas urbanas e os muito próximos de -1 são atribuídos aos corpos d'água. Isso ocorre por causa da baixa reflectância dos corpos d'água na banda do infra-vermelho próximo (HUETE et al. 2002).

2.1.2 Índices para imagens RGB

Vários índices têm sido desenvolvidos na literatura para medir a quantidade de “verde” presente em uma cena, pois estas medidas são importantes para correlacionar a quantidade de biomassa e outras propriedades biofísicas da vegetação. Dentre esses índices, alguns utilizam somente as bandas R, G e B (espectro visível), na perspectiva de acentuar uma determinada cor como o nível de verde das plantas, por exemplo.

Woebbecke et al. (1995) e Meyer et al. (1998) propuseram dois índices que trabalham no espectro visível: o excesso de verde (ExG) e excesso de vermelho (ExR). Kataoka et al. (2003) e Haugue et al. (2006) também trabalharam no espectro visível para determinar índices de vegetações que obtivessem uma resposta mais robusta frente à variabilidade da luz natural. Estes índices foram denominados de CIVE e VEG, respectivamente, e estão explicitados nas equações 02, 03, 04 e 05 a seguir:

- Excesso de Verde - $ExG = 2g - r - b$ (02)

- Excesso de Vermelho - $ExR = 1,4r - g$ (03)

- “Color Index of Vegetation” - $CIVE = 0,44r - 0,811g + 0,385b + 18,78745$ (04)

- “Vegetative” - $VEG = \frac{g}{r^a \cdot b^{1-a}}$, com $a = 0,667$ (05)

Os valores de r , g e b utilizados nas equações são componentes espectrais normalizados do espaço de cores RGB com valores variando entre 0 e 1, e calculados pelas equações 06:

$$r = \frac{R^*}{R^* + G^* + B^*}, \quad g = \frac{G^*}{R^* + G^* + B^*}, \quad b = \frac{B^*}{R^* + G^* + B^*} \quad (06)$$

em que os valores de R^* , G^* e B^* , são obtidas através das coordenadas R, G e B determinadas pelas equações 07:

$$R^* = \frac{R}{R_{\max}}, \quad G^* = \frac{G}{G_{\max}}, \quad B^* = \frac{B}{B_{\max}} \quad (07)$$

sendo $R_{\max} = G_{\max} = B_{\max} = 255$ para imagens de 8 bits. É importante ressaltar que, segundo Gée et al. (2008), estes índices e a combinação deles têm uma vasta aplicação na área das Ciências Agrárias.

Trabalhando com imagens aéreas coloridas no formato RGB, tanto Grün (2000) quanto Niederöst (2000) propõem um índice que permite a classificação de objetos na imagem em duas classes: a artificial (construções feitas pelo homem) e a natural (vegetação e sombras, por exemplo). Este índice consiste na obtenção de um Grau de Artificialidade das feições da cena através da operação DoA (*“Degree of Artificiality”*), indicado pela equação 08 onde R e G são as intensidades dos pixels nas respectivas bandas verde (G) e vermelho (R).

$$DoA = \frac{G - R}{G + R} \quad (08)$$

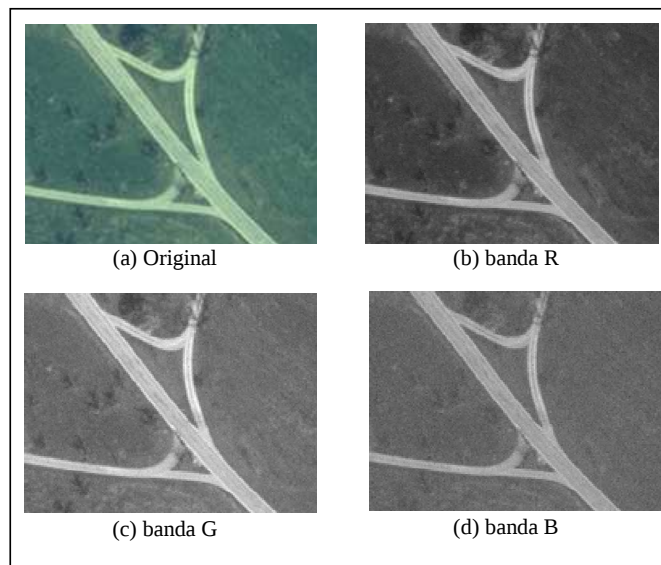


Figura 04 – (a) imagem original; (b) imagem na banda vermelha – R; (c) imagem na banda verde – G; (d) imagem na banda azul – B

Este índice tem o objetivo de separar os objetos artificiais dos naturais. Como pode se observar na figura 04, no que diz respeito ao atributo intensidade a

decomposição através das bandas RGB - figuras 04(b), 04(c) e 04(d) - apresenta uma variação bastante sutil para os objetos.

Como a vegetação tem uma boa contribuição na banda G e sofre pouca alteração nas bandas R e B, enquanto as edificações e rodovias sofrem uma variação maior de uma banda para outra, Polidorio et al. (2003) propõem um índice denominado *Nanda* (“*Natural and Artificial*”) para realçar a vegetação e deixá-la em tons de cinza mais claros, enquanto as edificações e rodovias são levadas para tons mais escuros, conforme indicado pela equação 09.

A tonalidade do solo exposto depende do tipo de composição que, em geral, fica numa tonalidade constante e intermediária entre o valor da vegetação e o das edificações, fato que normalmente gera uma dificuldade a mais no processo de classificação.

$$Nanda = G - (R + B) \quad (09)$$

Segundo Polidorio et al. (2003), a determinação do *Nanda* é mais atrativa do ponto de vista computacional do que a *DoA*. Essa vantagem decorre do menor número de operações do *Nanda* e por não necessitar da divisão que, do ponto de vista computacional, exige sempre um teste para evitar inconsistência provocada pela divisão por zero. Um exemplo de aplicação do *Nanda* e do *DoA* na imagem da figura 04 é apresentada na figura 05.

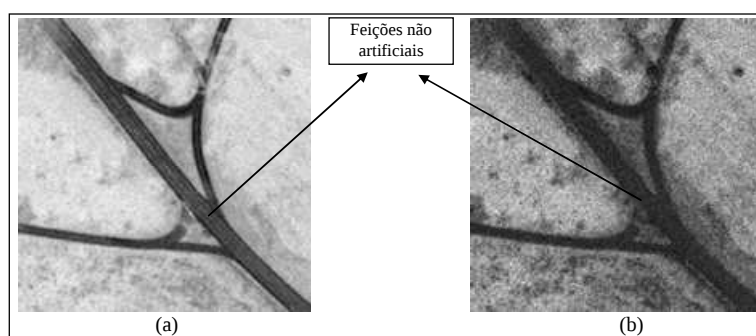


Figura 05 – (a) Imagem resultante da aplicação do *Nanda*; (b) Imagem resultante da aplicação do *DoA*.

2.1.3 Deconvolução de Cores

O algoritmo de deconvolução de cores foi proposto por Ruifrok e Johnston (2001) para separar cores no campo da microscopia. Este é um algoritmo capaz de utilizar informações dos canais RGB de uma imagem para criar um índice que explicita um determinado elemento.

O método proposto por Ruifrok e Johnston (2001) é baseado em uma transformação ortonormal da imagem original no formato RGB, considerando as informações das cores indicadas pelo usuário. Este método permite determinar as densidades das cores que compõem uma área designada por uma amostra da imagem e, assim, criar imagens índices indicando a contribuição de cada cor nesta área (deconvolução). Após o processo de deconvolução das cores as imagens índices, reconstruídas para cada uma das cores separadamente, podem ser utilizadas em processos de segmentação e análise de textura através dos tradicionais métodos de análise de imagens.

Segundo Ruifrok e Johnston (2001), um sistema ótico baseado nos canais RGB terá as cores primárias caracterizadas por um fator de absorção C em cada canal. Assim, as intensidades detectadas de luz transmitida para uma amostra da região de interesse definida por A que tem fator de absorção C descrita pela lei de Beer-Lambert¹ (equação 10)

$$I_c = I_{0,c} e^{-AC_c} \quad (10)$$

onde $I_{0,c}$ é a intensidade de luz incidente e I_c a intensidade de luz detectada e o subscrito c , indica o canal de detecção. Dessa forma, I_R , I_G e I_B são as intensidades de luz detectadas com relação à referida amostra e para um fator de absorção C , obtidas pela câmara para cada pixel.

Como a intensidade em cada um dos canais depende do fator de absorção da cor, os valores não podem ser diretamente utilizados em uma medida de separação para cada uma das cores. Entretanto, Ruifrok e Johnston (2001) definem a densidade ótica (DO) para cada canal como (equação 11):

¹ A lei de Beer-Lambert estabelece que existe uma relação exponencial entre a fração de radiação absorvida por uma substância e a concentração da substância, e que esta fração de radiação absorvida é independente da radiação incidente.

$$DO_c = -\ln\left(\frac{I_c}{I_{0,c}}\right) = A * C_c \quad (11)$$

Como pôde ser visto a DO para cada um dos canais c é linear com uma quantidade (amostra) A de cor que é definida pela amostra. Ruifrok e Johnston (2001) definem a DO em cada um dos três canais RGB com uma representação dada por um vetor 3x1 de DO s. Um exemplo está nas medidas de uma amostra de microscopia com hematoxilina (corante utilizado em microscopia), as quais resultam em valores DO de 0,18, 0,20 e 0,08 para os canais R, G e B, respectivamente.

No caso de três canais e uma distribuição com três amostras, o sistema de cor poderá ser descrito como uma matriz da forma:

$$\begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{13} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \rho_{23} \\ \rho_{31} & \rho_{32} & \rho_{33} \end{bmatrix} \quad (12)$$

onde cada linha da matriz indicada na equação (12) representa uma amostra específica e cada coluna representa a DO detectada pelos respectivos canais R, G e B para as amostras.

Valores específicos para DO em cada um dos três canais de uma amostra podem ser determinados pelas relativas medidas de absorção para os canais vermelho, verde e azul. Um exemplo de uma matriz DO para a combinação de hematoxilina, eosina e DAB, que são elementos utilizados em microscopia, pode ser definido por:

<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	
0,18	0,20	0,08	Hematoxilina
0,01	0,13	0,01	Eosina
0,10	0,21	0,29	DAB

Quadro 02 – Quadro com distribuição DO para um conjunto de amostras específico (RUIFROK e JOHNSTON, 2001).

A separação das amostras é realizada com base na transformação ortonormal do espaço de cores RGB, que tem como objetivo obter informações independentes sobre cada contribuição das cores nas amostras. Para realizar a transformação, é necessário

que seja feita uma normalização dos elementos dos vetores *DO* da seguinte forma (equação 13):

$$\begin{aligned}\hat{\rho}_{11} &= \rho_{11} / \sqrt{\rho_{11}^2 + \rho_{12}^2 + \rho_{13}^2} \\ \hat{\rho}_{21} &= \rho_{21} / \sqrt{\rho_{21}^2 + \rho_{22}^2 + \rho_{23}^2} \\ &\vdots\end{aligned}\tag{13}$$

O resultado da matriz *DO* normalizada é a matriz *M* indicada na equação (14).

$$M = \begin{bmatrix} \hat{\rho}_{11} & \hat{\rho}_{12} & \hat{\rho}_{13} \\ \hat{\rho}_{21} & \hat{\rho}_{22} & \hat{\rho}_{23} \\ \hat{\rho}_{31} & \hat{\rho}_{32} & \hat{\rho}_{33} \end{bmatrix}\tag{14}$$

Um exemplo da matriz *M*, calculada para a combinação de hematoxilina, eosina e DAB ($M_{H_E_D}$) indicada em Ruifrok e Johnston (2001) é:

$$M_{H_E_D} = \begin{bmatrix} 0,65 & 0,70 & 0,29 \\ 0,07 & 0,99 & 0,11 \\ 0,27 & 0,57 & 0,78 \end{bmatrix}$$

Assim, se $C_{1 \times 3}$ é um vetor para as quantidades de cores indicadas na amostra para os canais, então um pixel $Y_{1 \times 3}$ terá o vetor *DO* determinado considerando $Y = C.M$. Realizando esse processo para todos os pixels na imagem com os vetores *C* das amostras, obtém-se as imagens resultantes da deconvolução de cores.

Ruifrok e Johnston (2001) indicam a possibilidade de utilizar o método proposto em outros tipos de imagens, além das imagens de microscopia. Um exemplo da aplicação do método para imagens que apresente uma *DO* das amostras significativa pode ser verificado no resultado indicado na figura 06. Nesta figura, o método de deconvolução foi aplicado para separar as folhas do fundo na imagem com base em uma *DO* da amostra para os referidos elementos (folha e fundo).



Figura 06 – Exemplo de aplicação do método para imagens que não sejam de microscopia. (RUIFROK e JOHNSTON, 2001).

2.2 Suavização de Imagens

O objetivo do processo de suavização em uma imagem é reduzir o nível de ruído presente nesta. No entanto, o ruído é gerado por diversas causas e consiste em um problema muito comum nas imagens digitais. Do ponto de vista prático, o ruído faz com que dois pixels que correspondam à mesma intensidade na cena tenham tons de cinza diferentes na imagem.

Os ruídos podem ser classificados como aleatórios ou sistemáticos. Ruídos do tipo aleatório são caracterizados por uma distribuição estatística, enquanto que os sistemáticos são causados por uma determinada característica que pode ser modelada matematicamente, como a falta de luz por exemplo (PARKER, 1997).

Várias técnicas têm sido propostas na literatura para remover o ruído em imagens digitais. Entre elas, existem as que fazem o uso de Equações Diferenciais Parciais (EDP), e que tem recebido grande adesão da área de Análise de Imagens nos últimos anos. A idéia básica nessas técnicas é modificar uma imagem com uma equação diferencial obtendo os resultados esperados como solução da equação (BARCELOS, 2002).

Segundo Barcelos (2002), a grande vantagem em utilizar EDP's está na possibilidade de realizar a análise das imagens em um domínio contínuo. Dessa forma, o formalismo matemático se torna independente da malha utilizada na discretização, uma vez que fazendo o comprimento do passo utilizado na malha tender a zero, o filtro discreto pode ser reescrito como um operador diferencial parcial.

Nesse sentido, considera-se uma imagem u como sendo uma função contínua de um subconjunto de $\mathbb{R}^2$ em um subconjunto de $\mathbb{R}$, isto é:

$$u : \Omega \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow [a, b] \quad (15)$$

A aquisição da imagem sempre gera erros que são definidos com ruídos. Assim, Barcelos (2002) coloca o problema da redução de ruído como um problema de reconstrução da imagem u (imagem ideal) a partir de uma imagem ruidosa I , em que $I = u + n$ e n é o ruído.

Segundo a teoria de Shannon *apud* Barcelos (2002), uma imagem ideal u pode ser obtida através de uma imagem original (ruidosa) $I : \Omega \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow [a, b]$ através da convolução (*) de I com um núcleo K , isto é, $u = K * I$ gerando uma imagem sem o ruído ou suavizada.

Baseando-se nessa teoria, observou-se que a diferença entre a imagem suavizada $u = K * I$ e a imagem original I tende ao seu laplaciano ΔI (BARCELOS, 2002), como indica a equação 16

$$\frac{1}{h} [k * I(x) - I(x)] \rightarrow \Delta I(x) \quad (16)$$

Na equação 16, fazendo h tender a zero o processo de suavização de uma imagem se comporta como uma equação do calor (equação 17).

$$I_t = \Delta I(x) \quad \text{com} \quad I(0) = u(x) \quad (17)$$

Com algumas restrições, Barcelos (2002) indica a equação do calor como o único filtro linear capaz de obter bons resultados na suavização de imagens via EDP's. Entretanto, a aplicação do filtro em uma imagem $u(x)$ tende a degradar as regiões de fronteiras (bordas, quinas, junções, etc.) com o incremento das iterações em t . As figuras 07 (b-e) apresentam os resultados da equação do calor aplicados na figura 07(a) com t crescente.

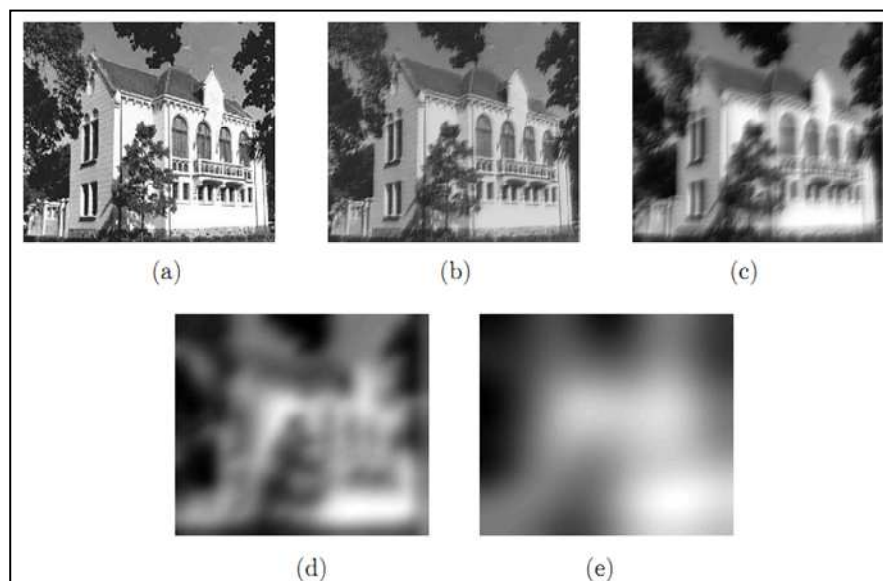


Figura 07 – (a) Imagem original; (b-e) Suavização via EDP do calor (BARCELOS, 2002).

Baseando-se no exemplo da figura 07, fica claro que a equação do calor (filtro linear) apresenta resultados satisfatórios nas primeiras iterações, mas conforme t aumenta as informações da imagem são degradadas, pois a equação do calor reversa é definida como mal posta (BARCELOS, 2002).

Na literatura, vários modelos foram propostos para suavizar imagens abrindo mão da condição de linearidade (PERONA e MALIK, 1990). Estes modelos utilizam equações de difusão não lineares tais como o Fluxo de Curvatura Média e a Difusão Anisotrópica, os quais são apresentados a seguir.

2.2.1 Fluxo de Curvatura Média

O algoritmo do Fluxo de Curvatura Média (MCF) foi desenvolvido baseando-se em uma curva que tem sua evolução pautada no parâmetro tempo. Neste algoritmo, cada ponto da curva move-se com uma velocidade proporcional à sua curvatura no referido ponto e na direção perpendicular à curva.

A remoção de ruído com base no MCF deverá interpretar a imagem (figura 08(a)) como uma superfície da forma como está sendo mostrado na figura 08(b). Assim, o

algoritmo proposto aplica nessa superfície uma difusão seletiva definida em função dos gradientes.

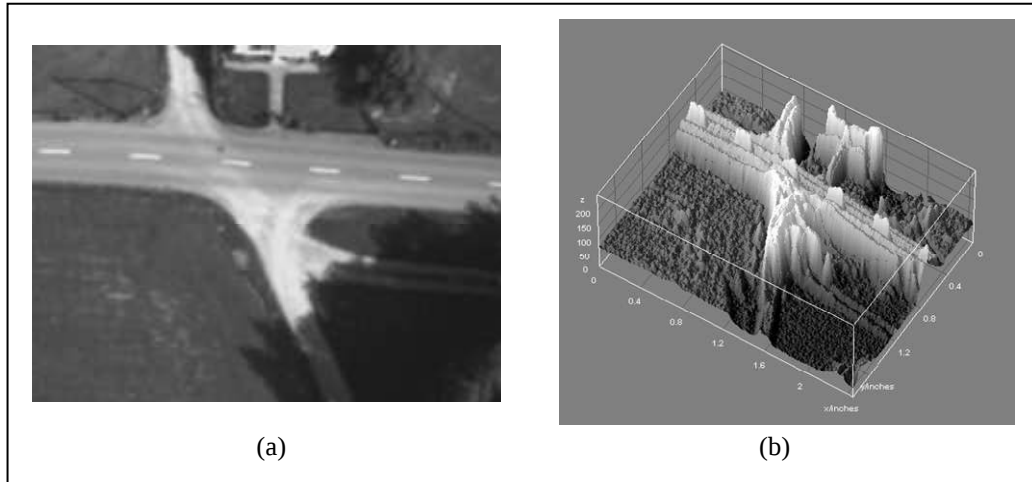


Figura 08 – Exemplo de imagem sendo interpretada como uma superfície. (a) Imagem original. (b) Superfície representando a imagem.

A equação que define o fluxo de curvatura média (SETHIAN, 1996) é dada por:

$$u_t = |\nabla u| \operatorname{div} \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) \quad \text{com} \quad u(x,0) = I(x) \quad (18)$$

em que div é o operador divergente, ∇u o gradiente da função (imagem) u , $|\nabla u|$ é a norma do vetor gradiente e os valores iniciais $u = u_0$ são definidos pela imagem para o instante inicial $t_0 = 0$.

A existência, unicidade e estabilidade da solução dessa equação são devidas a Evans e Spruck (1991). Segundo Barcelos (2002), uma das grandes vantagens desse método é sua interpretação geométrica, uma vez que a evolução das curvas ocorre em função de suas curvaturas nos pontos em que ocorrem os movimentos.

O fluxo de curvatura média tem o comportamento de uma difusão (equação do calor) com a vantagem de sempre ser na direção ortogonal ao gradiente. No entanto, Barcelos (2002) afirma que este algoritmo também não preserva as bordas para uma evolução muito acentuada do parâmetro t .

2.2.2 Difusão Anisotrópica

Outro modelo de suavização bem difundido na literatura é baseado na difusão anisotrópica, cuja ideia está na combinação de um parâmetro que preserva as bordas com a difusão direcionada, introduzida no método do Fluxo de Curvatura Média.

A ideia essencial dessa abordagem está em envolver a imagem original $I_0(x,y)$ em uma família de imagens derivadas $I(x,y,t)$, as quais são obtidas pela convolução da imagem original com um filtro Gaussiano $G(x,y,t)$ (PERONA e MALIK, 1990).

O parâmetro t é um incremento de escala que gera representações mais “simples” da imagem ou com resoluções menores. Assim, o conjunto de imagens geradas com base nesse parâmetro são imagens “simplificadas”, sendo este conjunto definido como espaço-escala. Esse conjunto de imagens pode ser entendido como a solução da equação de condução (ou difusão) do calor, que é uma equação diferencial parcial de segunda ordem parabólica linear (PERONA e MALIK, 1990).

O espaço-escala é uma teoria bastante atraente para a análise de imagens, no entanto, ela também tem o problema de deslocamento das bordas nas imagens suavizadas. Para evitar o deslocamento das bordas, Perona e Malik (1990) definiram o espaço-escala não-linear anisotrópico, que faz algumas modificações na equação geradora do espaço-escala original, ou seja, modificando a equação diferencial parcial do calor.

No modelo proposto por Perona e Malik (1990), o algoritmo proposto é uma solução na forma discretizada da Equação Diferencial Parcial (EDP) indicada pela equação (2.19),

$$u_t = \text{div}[g(|\nabla u|)\nabla u] \quad \text{com} \quad u(x,0) = I(x) \quad (19)$$

em que o operador divergente (div) e o gradiente (∇u) continuam sendo os mesmo elementos explicitados para o Fluxo de Curvatura Média, para uma função u com valores iniciais $u = u_0$ definido pela imagem para o instante inicial $t_0 = 0$.

Na equação 19 a função g é chamada de coeficiente variável de difusão, sendo definida por uma função monótona decrescente com valores entre 0 e 1. Este coeficiente é responsável por determinar a resposta para as bordas no processo de difusão na imagem.

Alguns modelos são definidos para a função g na literatura, tal como o modelo Parabólico (g_1) (equação 20), modelo de Perona Malik (g_2) (equação 21) e o modelo de Weickert (g_3) (equação 22), cujo valor $C = 3,31488$ é definido como a constante teórica que melhor se adapta ao propósito da teoria de Perona e Malik (1990), não suavizando as imagens nos pontos próximos às bordas dos objetos.

$$g_1(u, c) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2u}{c^2}}} \quad (20)$$

$$g_2(u, c) = \frac{1}{1 + \frac{u}{c^2}} \quad (21)$$

$$g_3(u, c) = 1 - e^{-\left(\frac{Cc^8}{u^4}\right)} \quad (22)$$

Experiências computacionais mostram que mesmo com as melhorias propostas por Perona e Malik (1990), o modelo ainda apresenta dificuldades práticas para imagens muito ruidosas, haja vista que o ∇u terá grandes valores em quase todos os pontos.

Considerando que a ideia básica é efetuar uma difusão fraca nos pontos de u onde $|\nabla u|$ for grande, preservando nesses casos a localização das bordas, ocorre que nas imagens ruidosas o processo tende a falhar porque a difusão será fraca para toda a imagem, e os ruídos tendem a permanecer (BARCELOS, 2002).

2.3 Limiarização de Otsu

Segundo Gonzalez e Woods (2000), a segmentação da imagem é o processo que permite a subdivisão de uma imagem em suas diversas partes e regiões de significância, constituindo um dos primeiros passos na análise de imagens.

A segmentação de regiões é normalmente baseada em duas características básicas da resposta espectral da imagem, que são a descontinuidade e a similaridade. Métodos baseados em descontinuidade, geralmente empregados em imagens pancromáticas, baseiam-se nas mudanças bruscas dos valores em nível de cinza da imagem. Já os métodos baseados em similaridade estão fundamentados no agrupamento de pixels que tenham alguma semelhança na resposta espectral, sempre baseados em um parâmetro de tolerância. Na literatura, existem várias técnicas de segmentação, tais como: a detecção de bordas, a limiarização, o crescimento de regiões, além da separação e junção de regiões, para citar apenas alguns exemplos (GONZALEZ e WOODS, 2000)

Um objeto pode ser separado do fundo em uma imagem através da limiarização, o que normalmente requer um limiar T . Assim, sendo $I(x,y)$ a intensidade em tons de cinza num pixel de coordenadas (x, y) , pode-se definir uma imagem limiarizada $L(x,y)$ como:

$$L(x,y) = \begin{cases} 255 & \text{se } I(x,y) > T \\ 0 & \text{se } I(x,y) \leq T \end{cases} \quad (23)$$

Segundo Gonzalez e Woods (2000), o limiar T pode ser visto como uma função T da forma:

$$T = T[x,y,p(x,y),I(x,y)] \quad (24)$$

em que $p(x,y)$ denota alguma propriedade local no pixel (x, y) como, por exemplo, o nível de cinza médio de uma vizinhança centrada em (x,y) . Quando T depender apenas de $I(x,y)$ o limiar é denominado global, e quando T depender de $I(x,y)$ e $p(x,y)$ o limiar é denominado dinâmico.

A técnica mais simples de limiarização é o particionamento do histograma da imagem por um limiar único T . Nesta técnica, a segmentação da imagem é efetuada através

da varredura dos pixels desta, rotulando-os individualmente como parte do objeto ou do fundo segundo o nível do pixel, o qual pode ser maior ou menor que o limiar T . Segundo Gonzalez e Woods (2000), o sucesso deste método depende inteiramente da qualidade do particionamento do histograma.

Dentro desse contexto, o processo de segmentação indicado nesse trabalho (limiarização) é baseado na determinação de um limiar ótimo T (figura 09), o qual pode ser determinado em uma imagem pancromática através do algoritmo desenvolvido por Otsu (1979).

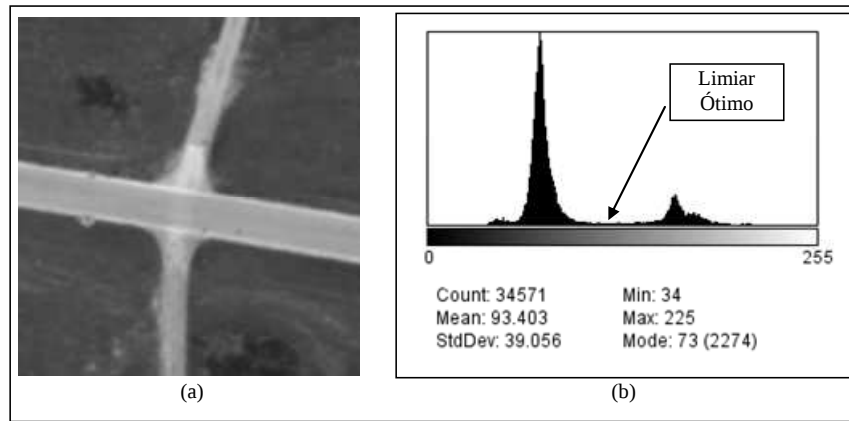


Figura 09 – (a) Exemplo de uma imagem pancromática; (b) histograma e indicação de limiar ótimo.

Uma imagem pode ser considerada como uma função $f(x,y)$ das intensidades dos níveis de cinza no ponto de coordenada (x,y) . Os valores dos níveis de cinza variam de 0 a $L-1$, onde L é a quantidade de diferentes níveis de cinza na imagem. O número de pixels para o nível i com $i=1,2,\dots,L$ é dado por n_i e o número total de pixels é definido por $N = n_1 + n_2 + \dots + n_L$.

A probabilidade de ocorrer um nível i na imagem é dada por:

$$p_i = \frac{n_i}{N}; \quad p_i \geq 0 \text{ e } \sum_{i=1}^L p_i = 1 \quad (25)$$

Supondo uma separação dos pixels em duas classes C_0 e C_1 (objeto e fundo) em que k seja o limiar de separação entre as classes, então C_0 denota os pixels com

nível de cinza no intervalo $[1, \dots, k]$, enquanto C_1 denota os pixels com nível de cinza em $[k+1, \dots, L]$. A probabilidade para as classes com suas respectivas médias são definidas por Otsu (1979):

$$\text{- Probabilidade da classe } C_0 \quad \omega_0 = \Pr(C_0) = \sum_{i=1}^k p_i = \omega(k) \quad (26)$$

$$\text{- Probabilidade da classe } C_1 \quad \omega_1 = \Pr(C_1) = \sum_{i=k+1}^L p_i = 1 - \omega(k) \quad (27)$$

$$\text{- Média da classe } C_0 \quad \mu_0 = \sum_{i=1}^k i \Pr(i | C_0) = \sum_{i=1}^k i \frac{p_i}{\omega_0} = \frac{\mu(k)}{\omega(k)} \quad (28)$$

$$\text{- Média da classe } C_1 \quad \mu_1 = \sum_{i=k+1}^L i \Pr(i | C_1) = \sum_{i=k+1}^L i \frac{p_i}{\omega_1} = \frac{\mu_T - \mu(k)}{1 - \omega(k)} \quad (29)$$

A probabilidade de k , com sua respectiva média, é definida por:

$$\omega(k) = \sum_{i=1}^k p_i \quad (30)$$

$$\mu(k) = \sum_{i=1}^k i p_i \quad (31)$$

A média total da imagem original pode ser definida por:

$$\mu_T = \mu(L) = \sum_{i=1}^L i p_i \quad (32)$$

Segundo Otsu (1979) é possível verificar que valem as seguintes relações para a escolha de qualquer k

$$\omega_0 \mu_0 + \omega_1 \mu_1 = \mu_T \quad \text{e} \quad \omega_0 + \omega_1 = 1 \quad (33)$$

As equações 34 e 35 definem as respectivas variâncias das classes C_0 e C_1 :

- Variância da classe C_0 $\sigma_0^2 = \sum_{i=1}^k (i - \mu_0)^2 \Pr(i | C_0) = \sum_{i=1}^k (i - \mu_0)^2 \frac{p_i}{\omega_0}$ (34)

- Variância da classe C_1 $\sigma_1^2 = \sum_{i=k+1}^L (i - \mu_1)^2 \Pr(i | C_1) = \sum_{i=k+1}^L (i - \mu_1)^2 \frac{p_i}{\omega_1}$ (35)

Com base nos momentos de primeira e segunda ordem (média e variância), Otsu (1979) utiliza as equações de análise de discriminantes (ou medidas de separabilidade de classes) (equações 36) para determinar um limiar ótimo k .

$$\lambda = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_W^2}; \quad \kappa = \frac{\sigma_T^2}{\sigma_W^2}; \quad \eta = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_T^2} \quad (36)$$

O método de Otsu (1979) define a variância das classes (σ_W^2), a variância inter-classes (σ_B^2) e variância total (σ_T^2), indicadas pelas equações 37, 38 e 39 sendo que a equação 38 é resultante da equação 33.

$$\sigma_W^2 = \omega_0 \sigma_0^2 + \omega_1 \sigma_1^2 \quad (37)$$

$$\sigma_B^2 = \omega_0 (\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu_T)^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 \quad (38)$$

$$\sigma_T^2 = \sum_{i=1}^L (i - \mu_T)^2 p_i \quad (39)$$

No método de Otsu (1979), a busca pelo melhor limiar se transforma em um problema de otimização, ou seja, encontrar o limiar k que maximize uma das funções objetivo da análise de discriminante (equação 36).

O limiar k que maximiza as funções λ , κ e η é o mesmo, pois tais funções são equivalentes uma vez que $\kappa = \lambda + 1$ e $\eta = \lambda / (\lambda + 1)$ são definidas em termos de λ e vale a equação 40 (OTSU, 1979).

$$\sigma_W^2 + \sigma_B^2 = \sigma_T^2 \quad (40)$$

Otsu (1979) chama atenção para os fatos de que σ_W^2 e σ_B^2 são definidas em função de k enquanto que σ_T^2 é independente do valor de k . Dessa forma, considerando que

σ_w^2 é apresentado como uma estatística de segunda ordem (variância das classes), enquanto σ_B^2 é definido como uma estatística de primeira ordem (média das classes) segundo equação 38, a função mais simples para a procura do limiar k é η , sendo a mesma adotada com critério de avaliação para a busca do melhor limiar de separabilidade.

O limiar ótimo k^* que maximiza η , ou equivalentemente maximiza σ_B^2 , é selecionado com base em uma busca sequencial utilizando as equações 30 e 31, ou de forma explícita utilizando as equações de 26 até 29 (OTSU, 1979), de forma que:

$$\eta(k) = \frac{\sigma_B^2(k)}{\sigma_T^2} \quad (41)$$

$$\sigma_B^2(k) = \frac{[\mu_T \omega(k) - \mu(k)]^2}{\omega(k)[1 - \omega(k)]} \quad (42)$$

e o limiar ótimo k^* é:

$$\sigma_B^2(k^*) = \max_{1 \leq k \leq L} \{\sigma_B^2(k)\} \quad (43)$$

O método de Otsu (1979) indica análise de outros aspectos importantes, além daqueles relacionados a um limiar ideal. Tais aspectos são:

- O limiar k^* selecionado e as probabilidades para as classes calculadas nas equações 26 e 27, respectivamente, indicam a porção de área ocupada pelas classes na imagem binarizada.
- As médias das classes indicadas nas equações 28 e 29 servem como uma boa estimativa do nível médio dos tons de cinza na imagem original.
- O valor máximo $\eta(k^*)$, denotado simplesmente por η^* , pode ser utilizado como uma medida de avaliação da separabilidade das classes (ou medida de facilidade de limiarização) da imagem original, ou até mesmo como medida que avalia a condição do histograma com relação ao seu comportamento bimodal. Esta medida é bastante significativa, pois a mesma é invariante para a transformação afim. Segundo Otsu (1979), a mesma também é determinada de forma a garantir sua unicidade na faixa de busca do algoritmo, ou seja: $0 \leq \eta^* \leq 1$
- O limite inferior (zero) é obtido somente quando uma dada imagem tem um único e constante nível de cinza, enquanto o limite superior (um) é obtido somente quando a imagem analisada apresenta apenas dois valores.

De forma geral, o método de Otsu (1979) é um método caracterizado pela natureza não supervisionada da seleção do limiar definido como ótimo, com base na análise de discriminantes. O método de limiarização de Otsu (1979) pode ser estendido para imagens que apresentem histogramas não bimodais, sendo esta extensão denominada de Limiarização Multinível de Otsu e salientando que mais detalhes sobre estes métodos são apresentados em Ritter et al. (1996).

2.4 Esqueletização de Imagens

Segundo Pedrini e Schwartz (2007), um dos problemas básicos para o desenvolvimento de sistemas eficientes na área de análise de imagens é a seleção das características necessárias que serão extraídas do objeto de interesse. Nesse sentido, após a etapa de segmentação da imagem, seja em regiões ou bordas, os agrupamentos dos pixels resultantes devem ser representados e descritos em formatos apropriados para os processos subsequentes.

Na literatura, existem muitos esquemas utilizados para representar e descrever objetos, cada qual com suas especificidades e características que estão sempre vinculadas a uma determinada aplicação. No entanto, uma característica que deve ser inerente a todos eles é a robustez frente a ruídos e a transformações geométricas, tais como mudanças na escala, rotação e translação.

Os algoritmos de esqueletização podem ser utilizados para representar objetos extraindo um conjunto de pontos no seu interior para tal objetivo. Segundo Plotze e Bruno (2004) na literatura existe uma discordância sobre a nomenclatura utilizada no processo de extração do esqueleto ou eixo médio de um objeto, de forma que os termos mais utilizados são esqueletonização, afinamento e esqueletização. Neste trabalho convencionou-se utilizar o termo esqueletização.

2.4.1 Conceitos Fundamentais sobre Esqueletização

Uma breve definição de esqueleto no universo contínuo pode ser encontrada em Blum et al.(1967), na qual o mesmo realiza uma analogia com duas frentes (cada uma partindo de um limite da área) de chamas que avançam ao queimar uma região coberta de grama. Dessa forma, o eixo médio pode ser visto como o local onde estas frentes que estão se propagando, uma de cada lado, acaba se encontrando.

Para definir um esqueleto é necessária uma caracterização formal de um objeto (forma) na imagem digital onde este deverá ser determinado. Assim, segundo Choi et al. (1997), uma forma ou um objeto D é um fecho (conjunto fechado e limitado) sobre um subconjunto aberto do $\mathbb{R}^2$ em que suas bordas ∂D sejam compostas por um número finito de curvas conectadas e mutuamente disjuntas.

Dessa forma, uma borda será definida e representada por um polígono que represente o objeto em uma imagem digital. Logo, esse polígono será composto pelos pixels de bordas do objeto na referida imagem.

De acordo com as definições de eixo médio de Blum apud Choi et al. (1997), os pontos centrais dos discos máximos constituem o esqueleto indicado por $S(D)$ de um objeto D , conforme ilustra a figura 10. Um disco máximo indicado por $B(s)$ é uma circunferência contida em D tal que a mesma é interiormente tangente à borda ∂D do objeto.

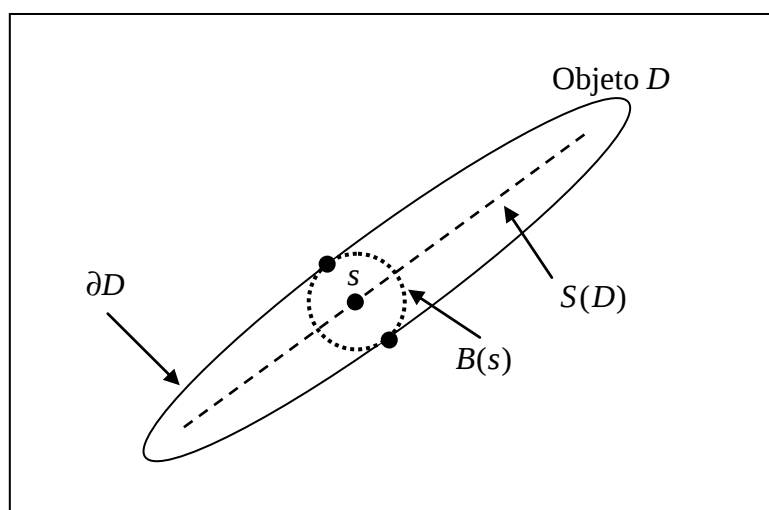


Figura 10 - Objeto ou forma com os elementos que compõem a geração do Esqueleto (adaptado de Choi et al. (1997)).

O disco máximo $B(s)$ (figura 10) deve ser tangente à borda em, pelo menos, dois pontos diferentes. Denota-se por $Tan(s)$ o conjunto de pontos de borda tangente ao disco máximo $B(s)$ centrado no ponto $s \in S(D)$.

Considerando a borda como um polígono simples verifica-se que a $Tan(s)$ é composta por um número finito de pontos de bordas. O grau do ponto s denominado por $deg(s)$ é definido como a cardinalidade do conjunto $Tan(s)$, isto é, o número de pontos de bordas tangente ao disco máximo centrado em s (CHOI et al., 1997).

A figura 11 mostra um exemplo com dois discos máximos com seus pontos de esqueleto e respectivos graus, ou seja, para a região D com suas bordas ∂D e dois pontos p e q com discos máximos $B(p)$ e $B(q)$, tem-se que o número de pontos resultantes de $Tan(p) \cap \partial D$ e $Tan(q) \cap \partial D$ são respectivamente 3 e 2, o que indica $deg(p)=3$ e $deg(q)=2$.

O grau de um ponto s definido aqui é importante para modelos que necessitam rotular os pixels que formam o esqueleto como ponto interior, ponto de cruzamento ou ponto final. Mais detalhes sobre a formulação matemática utilizada na definição de um esqueleto estão em Choi et al. (1997).

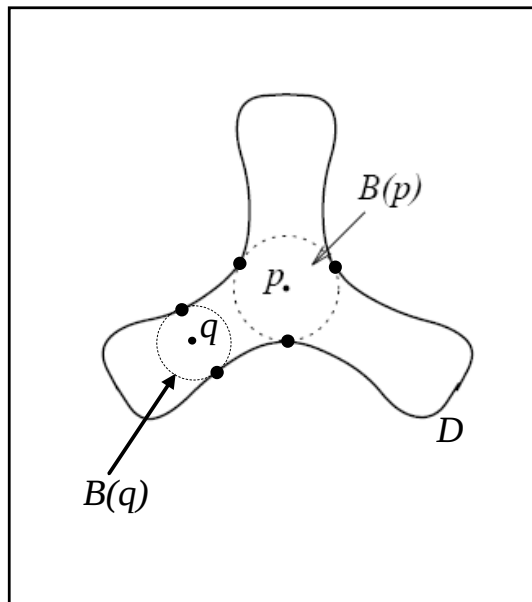


Figura 11 – Exemplo de discos máximos com seus respectivos graus em cada um dos pontos, p e q .

2.4.2 Transformada do Eixo Médio

O eixo medial de um objeto é definido como a união dos pontos centrais das circunferências de raio maximal contidas no objeto, e que tocam o objeto em pelo menos dois pontos de bordas (figura 12).

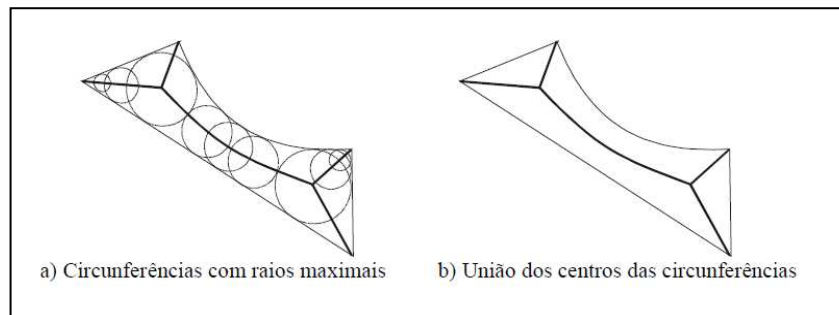


Figura 12 – Definição de eixo médio (PEIXOTO e CARVALHO, 2000)

Dessa forma, a transformada do eixo médio proposta por Blum (1967) é dada pelo conjunto de pontos que estão mais próximos de ambas as bordas do objeto. Assim, um ponto interno ao objeto pertencerá ao esqueleto se ele tiver, no mínimo, dois pontos que sejam os mais próximos à borda. As figuras 12 e 13 ilustram essa definição para dois tipos de objetos.

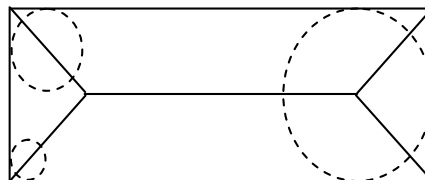


Figura 13 – Eixo Médio, representado pelos segmentos internos, para um objeto retangular.

Embora a transformada do eixo médio resulte em um esqueleto intuitivamente aceitável, sua implementação direta é bastante custosa do ponto de vista computacional (PEDRINI e SCHWARTZ, 2007). Tal implementação envolve o cálculo da distância entre cada ponto interior ao objeto e a borda do mesmo. Inúmeros algoritmos têm

sido propostos na literatura para melhorar a eficiência do cálculo da distância na transformada do eixo médio.

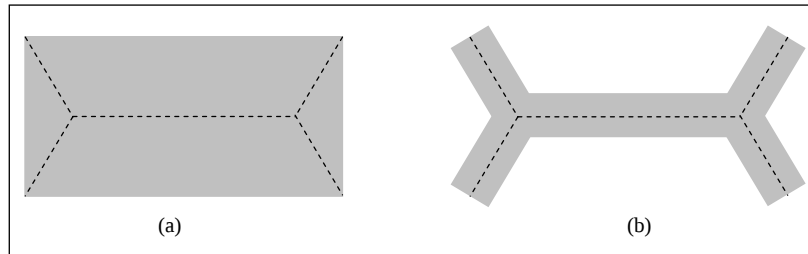


Figura 14 – Exemplo de objetos com seus esqueletos (PEDRINI e SCHWARTZ, 2007).

Outros exemplos de esqueletos estão representados pelos segmentos tracejados internos aos objetos indicados na figura 14. No entanto, este exemplo mostra que dois objetos diferentes podem ter o mesmo esqueleto, como pode ser observado na figura 14(a) e 14(b), o que pode representar um problema em algumas aplicações.

2.4.3 Transformada de Distância

Estes métodos calculam o esqueleto diretamente através de uma transformada de distância aplicada aos pontos interiores ao objeto. Segundo Peixoto e Carvalho (2000), esta transformada deve fornecer valores que representam a distância mínima, ou seja, a distância entre um ponto interno e a borda do objeto deve ser a menor possível. Após aplicar esta transformada a todos os pontos do objeto, o esqueleto será composto pelos pontos para os quais a distância é um máximo local. Estes pontos são equidistantes da borda e, conseqüentemente, estão situados nos centros dos círculos inscritos ao objeto, conforme a definição de esqueletos da seção 2.4.1.

Considera-se que a transformada de distância corresponde ao mapa resultante das distâncias entre cada ponto interior do objeto e sua borda mais próxima. Esta transformada é extremamente dependente do conceito de distância adotado, de forma que os valores mais altos encontrados no processo de cálculo da distância geram o esqueleto do objeto.

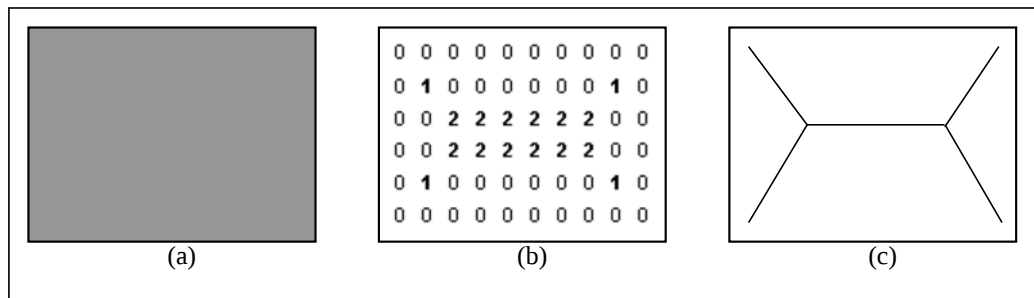


Figura 15 – Exemplo da Transformada de Distância. (a) Bordas do objeto; (b) Resultado da Transformada da Distância; (c) Esqueleto do objeto.

Um exemplo de transformada de distância pode ser verificado na figura 15, na qual a figura 15(a) apresenta um objeto, ou as bordas de um objeto, e a figura 15(b) o resultado da transformada da distância para uma vizinhança do tipo 4, resultando em um esqueleto do objeto indicado na figura 15(c).

A figura 16 mostra outro exemplo de um objeto representado por uma imagem binária, bem como o resultado da transformada da distância Euclidiana. O esqueleto do objeto é formado pelos valores mais altos de distância e correspondem às regiões mais claras mostradas na figura 16(b).

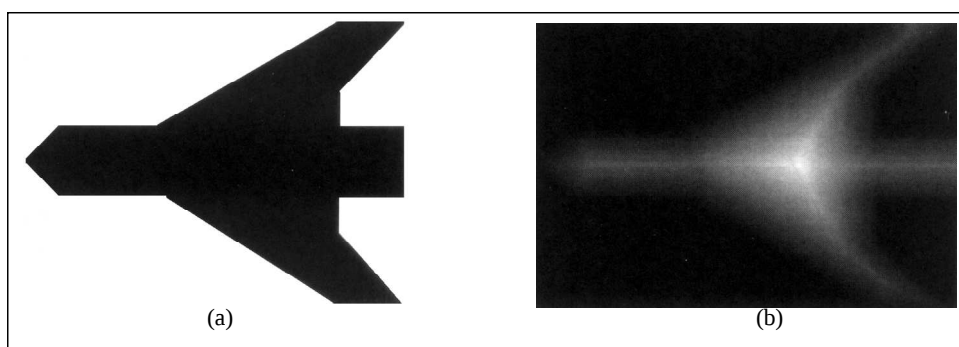


Figura 16 – Transformada de Distância. (a) Imagem Binária; (b) Resultado da Transformada de Distância Euclidiana. (PEDRINI e SCHWARTZ, 2007)

Segundo Pedrini e Schwartz (2007), a transformada de distância pode ser executada em tempo linear proporcional ao número de pixels da imagem. Embora essa técnica mantenha as características geométricas como a linearidade e curvatura da feição, caso o

cálculo utilize a distância Euclidiana a mesma não oferece garantia de que a topologia do objeto, tais como as ligações, sejam preservadas.

2.5 Método Level Set

Nesta seção serão brevemente apresentados os fundamentos de um esquema numérico conhecido como *Level Set*. Este método é capaz de simular e analisar movimentos de curvas e superfícies em uma estrutura conhecida como propagação de curvas de nível. Embora neste trabalho o interesse seja pelas curvas em um espaço bidimensional, o mesmo também pode ser aplicado para superfícies no espaço tridimensional.

O método formulado por Osher e Sethian (1988) apresenta algumas vantagens quando comparado com outros métodos, tais como o tratamento eficaz de mudanças topológicas e descontinuidades que surgem nos modelos definidos como contornos ativos. Embora o modelo *Level Set* apresente vantagens sobre outros métodos de contorno ativo, o mesmo é restrito ao tratamento de curvas fechadas.

De forma geral, os modelos de contorno ativo (também conhecido como modelos deformáveis) têm sido utilizados em uma ampla variedade de procedimentos em Processamento de Imagens e Visão Computacional. Nesse sentido, Kass et al. (1988) colocam os contornos ativos como responsáveis pelo preenchimento da lacuna existente entre a extração de feições em baixo nível e a representação geométrica dos objetos em alto nível na área de Visão Computacional.

Sethian (1999) indica aplicações dos contornos ativos em várias outras áreas das ciências além da Visão Computacional. Só para citar alguns exemplos, estas aplicações estão presentes na dinâmica dos fluidos, análise sísmica e ciências dos materiais.

Segundo Delingette e Montagnat (2001), os contornos ativos podem ser classificados em explícitos ou implícitos. Os contornos ativos explícitos também são conhecidos como paramétricos e tem as *Snakes* como principal exemplo. Por outro lado, os contornos ativos implícitos podem ser denominados contornos ativos geométricos e tem o *Level Set* como principal exemplo dessa categoria.

O *Level Set* pode ser definido com base em uma curva γ fechada e simples em um domínio (imagem) Ω . A evolução da curva γ ocorre em função de um parâmetro

velocidade aplicado na direção normal à curva em cada um dos seus pontos, como ilustra a figura 17.

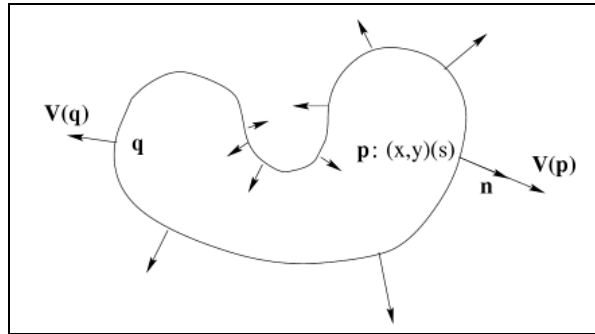


Figura 17 – Contorno ativo com velocidades sendo aplicadas nas direções normais.

A variação da curva γ em função do tempo define a sua evolução, que é dada por um parâmetro V aplicado na sua direção normal (vetor $\vec{n}$). O parâmetro V é definido como uma função velocidade e é calculado para cada um dos pontos da curva como indica $V(p)$ e $V(q)$ na figura 17. A equação que define a evolução da curva γ em função do tempo t está indicada na equação 44.

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} = V \vec{n}. \quad (44)$$

Na literatura é possível encontrar várias formas de abordar a função velocidade na evolução da curva para o caso do *Level Set*. As principais delas, segundo Mitiche e Ayed (2010) são: V sendo definida em função da curvatura da curva envolvente; V calculada na forma $\langle F, n \rangle$, em que F é um campo vetorial dependente da posição e possivelmente do tempo, mas não da curva em questão (pode ser de uma imagem índice, por exemplo); e por último V poderá ser definido em função de um escalar e de um tempo de uma forma diferente das indicadas anteriormente.

Dado um conjunto Γ de curvas $\gamma: s \in [0,1] \rightarrow \gamma(s) \in \Omega$ as quais sejam planas, diferenciáveis (C^2), fechadas, simples e regulares, um contorno ativo será representado por uma família de curvas em Γ com parâmetros t e s , sendo t o parâmetro tempo. Dessa forma a curva γ passa a ser representada por

$\gamma: s, t \in [0,1] \times \mathfrak{R}^+ \rightarrow \gamma(s,t) = (x(s,t), y(s,t), t) \in \Omega \times \mathfrak{R}^+$, tal que $\forall t$ tem-se a curva $\gamma_t: s \rightarrow (x(s,t), y(s,t))$ em Γ . Com a implementação do *Level Set*, um contorno ativo γ é representado implicitamente como o nível zero da função *Level Set* $\phi: \mathfrak{R}^2 \times \mathfrak{R}^+ \rightarrow \mathfrak{R}$:

$$\forall s, t \quad \phi(\gamma(s,t)) = \phi(x(s,t), y(s,t), t) = 0 \quad (45)$$

Considerando a derivada total da equação 45 com relação ao tempo t dado e assumindo que ϕ seja diferenciável, pela regra da cadeia tem-se:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\partial\phi}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial t} = \left\langle \nabla\phi, \frac{\partial\gamma}{\partial t} \right\rangle + \frac{\partial\phi}{\partial t} = 0 \quad (46)$$

Como $\frac{\partial\gamma}{\partial t} = V \cdot \bar{n}$ a equação 46 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \left\langle \nabla\phi, \frac{\partial\gamma}{\partial t} \right\rangle + \frac{\partial\phi}{\partial t} &= 0 \Rightarrow \frac{\partial\phi}{\partial t} = - \left\langle \nabla\phi, \frac{\partial\gamma}{\partial t} \right\rangle \Rightarrow \\ \frac{\partial\phi}{\partial t} &= - \langle \nabla\phi, V \bar{n} \rangle \Rightarrow \\ \frac{\partial\phi}{\partial t} &= -V \langle \nabla\phi, \bar{n} \rangle \end{aligned} \quad (47)$$

De forma análoga tem-se que para o parâmetro s a derivada total da equação 45 é dada por:

$$\forall s \in [0,1] \quad \frac{\partial\phi}{\partial s} = \frac{\partial\phi}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial\phi}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial s} = \left\langle \nabla\phi, \frac{\partial\gamma}{\partial s} \right\rangle = 0 \quad (48)$$

Assim $\frac{\partial\gamma}{\partial s}$ é tangente à curva para s e $\nabla\phi$ é normal à curva. Como se convencionou que n é orientado para o exterior e ϕ é positivo no seu interior, tem-se:

$$n = - \frac{\nabla\phi}{|\nabla\phi|} \quad (49)$$

Substituindo a equação 49 na equação 47 obtém-se a equação para evolução temporal da função ϕ , dada por:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = V|\nabla \phi| \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} - V|\nabla \phi| = 0 \quad (50)$$

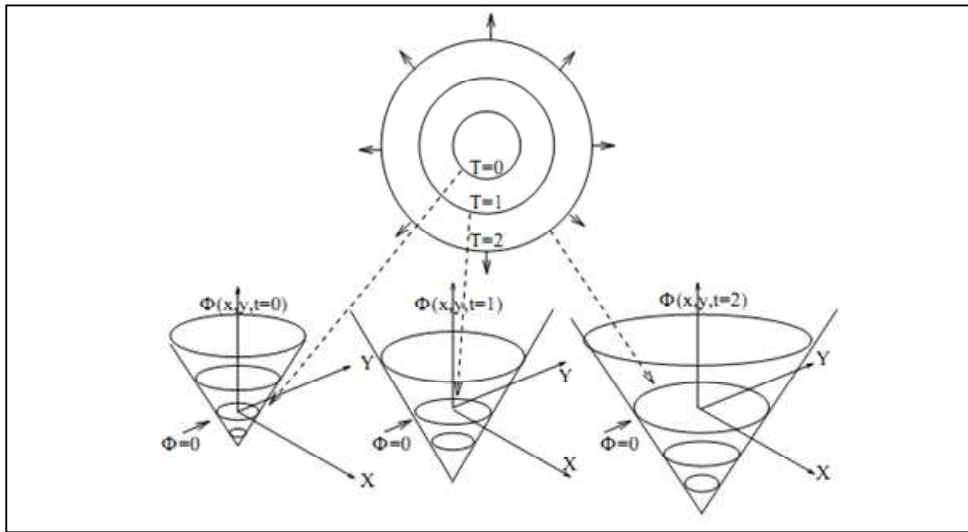


Figura 18 – Propagação pela curvas de nível da função ϕ no tempo (OSHER e SETHIAN, 1988).

A equação 50 é conhecida como a equação de *Level Set* definida por Osher e Sethian (1988). Esta equação descreve a evolução da função *Level Set* ϕ no tempo, de tal forma que a função ϕ possa ser interpretada com uma propagação através das curvas de nível que podem ser construídas para essa função, conforme mostra a figura 18.

Se a equação de velocidade for definida em função da curvatura, então a mesma terá seus termos em função do *Level Set* definida por:

$$\kappa = \operatorname{div} \left(\frac{n}{|n|} \right) = -\operatorname{div} \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) = -\frac{\phi_{xx}\phi_y^2 - 2\phi_x\phi_y\phi_{xy} + \phi_{yy}\phi_x^2}{(\phi_x^2 + \phi_y^2)^{3/2}} \quad (51)$$

sendo κ a curvatura, ϕ_x e ϕ_y derivadas parciais de ϕ com relação a x e y , ϕ_{xx} e ϕ_{yy} são as derivadas segundas e ϕ_{xy} é a derivada mista da função ϕ .

Segundo Mitiche e Ayed (2010), a evolução do *Level Set* é, a priori, especificada de um ponto para outro partindo do nível zero com velocidade indicada em função do instante t , de forma que seu respectivo nível sempre possa ser recuperado a partir do nível zero e com base na função *Level Set* ϕ , evoluindo de acordo com a equação 50 apresentada na figura 18.

Esta forma de recuperar a curva em qualquer instante, com base em sua velocidade e nível zero da função *Level Set*, é independente das variações topológicas do objeto uma vez que o contorno ativo é sempre tratado com uma função. Este procedimento é indicado na figura 19, a qual mostra o comportamento das curvas de nível no caso das variações topológicas de uma superfície.

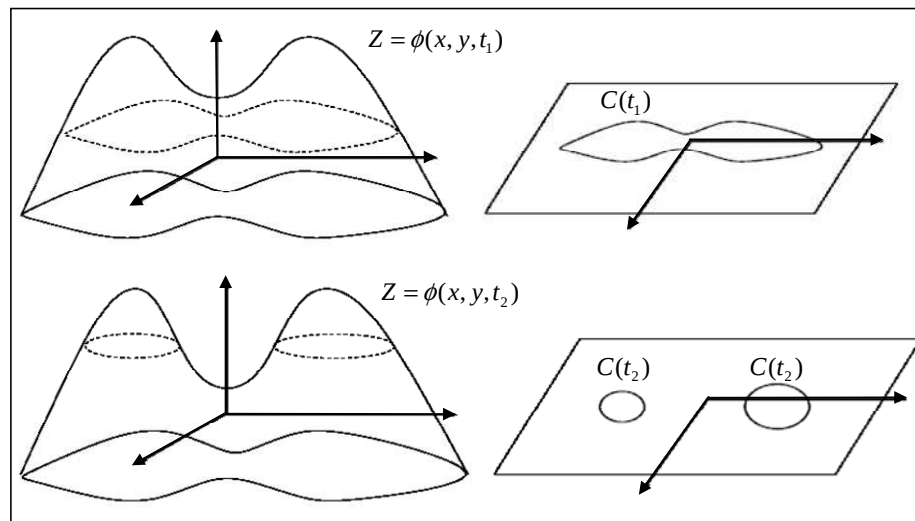


Figura 19 – Tratamento do contorno ativo como uma função ϕ (Level Set) (OSHER e SETHIAN, 1988).

Um exemplo de aplicação do algoritmo de *Level Set* para segmentar uma imagem pode ser verificado na figura 20, que tem a imagem original (figura 20(a)) com seu respectivo ponto inicial e o resultado da evolução do *Level Set* indicado na figura 20(b).



Figura 20 – Exemplo de aplicação do *Level Set*; (a) Imagem original com ponto inicial; (b) Resultado do algoritmo de *Level Set*.

3 Método Proposto

O principal objetivo desse trabalho é propor um método para a extração de cruzamentos simples e complexos de rodovias. Nesta seção explicitam-se as etapas necessárias para atingir esse objetivo. O método aqui proposto é baseado em três etapas hierarquicamente sequenciais e complementares, como ilustra o fluxograma indicado na figura 21.

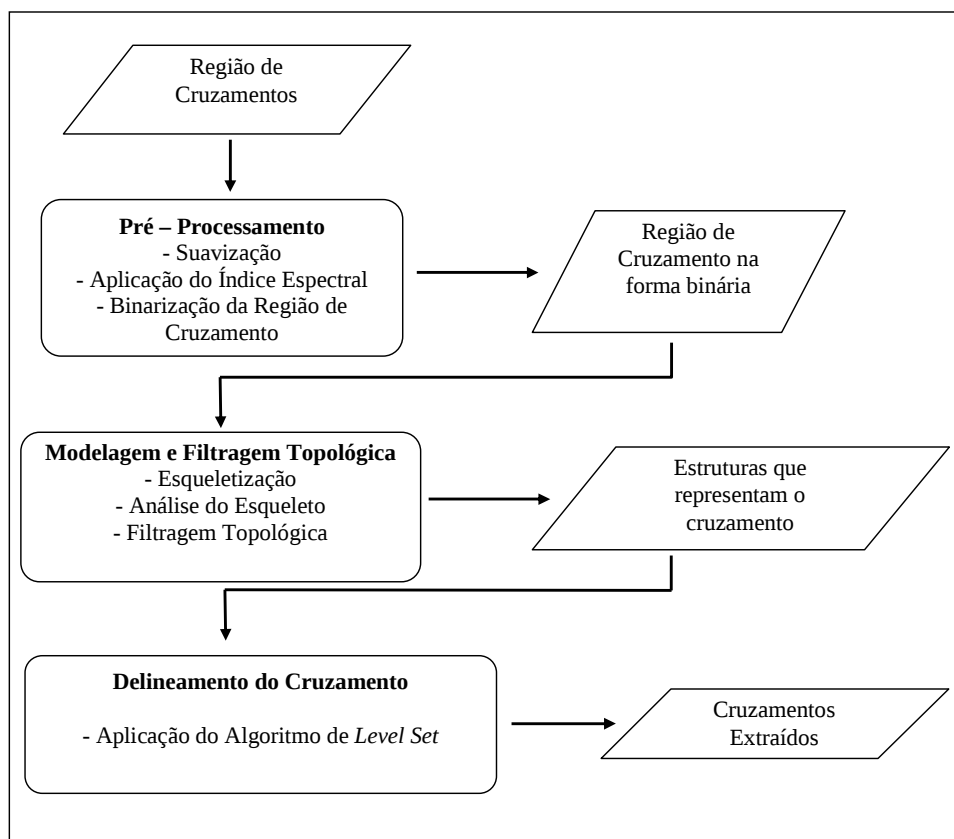


Figura 21 – Fluxograma do método proposto.

Estas etapas indicadas na figura 21 são brevemente descritas a seguir:

- **Pré-processamento:** esta etapa é subdividida em suavização, aplicação do índice espectral e binarização. O pré-processamento resulta em uma imagem binária contendo o cruzamento a ser extraído, além de outras estruturas definidas como espúrias que podem influenciar

negativamente a ação do algoritmo de extração e, em alguns casos, constituir os falsos positivos.

- **Modelagem e Filtragem Topológica:** integram esta etapa o processo de esqueletização dos objetos da região de cruzamento, a análise do esqueleto para a criação do modelo topológico da região, e a filtragem topológica. A filtragem topológica tem como objetivo selecionar a estrutura semântica que representará o cruzamento. Esta estrutura é composta por pontos definidos como pontos de interesse e que após a filtragem serão utilizados como pontos sementes na aplicação da última etapa do método.

- **Delineamento do Cruzamento:** esta etapa possui como dados de entrada os pontos de interesse selecionados dentre aqueles que compõem o esqueleto do cruzamento filtrado. Estes pontos são utilizados como pontos sementes para aplicação do algoritmo de “*Level Set*” na imagem binária, sendo esse o responsável pelo delineamento do cruzamento.

É importante ressaltar que a forma como as regiões de cruzamentos são definidas e separadas na imagem não faz parte do escopo deste trabalho, cujo foco é o método de extração dos cruzamentos de rodovias na região da imagem que é uma sub-imagem definida como Região de Cruzamento.

As figuras 22 (b-c) apresentam exemplos dessas regiões de cruzamento (sub-imagens), selecionadas em uma imagem (figura 22(a)), que contém a malha viária e outras feições.

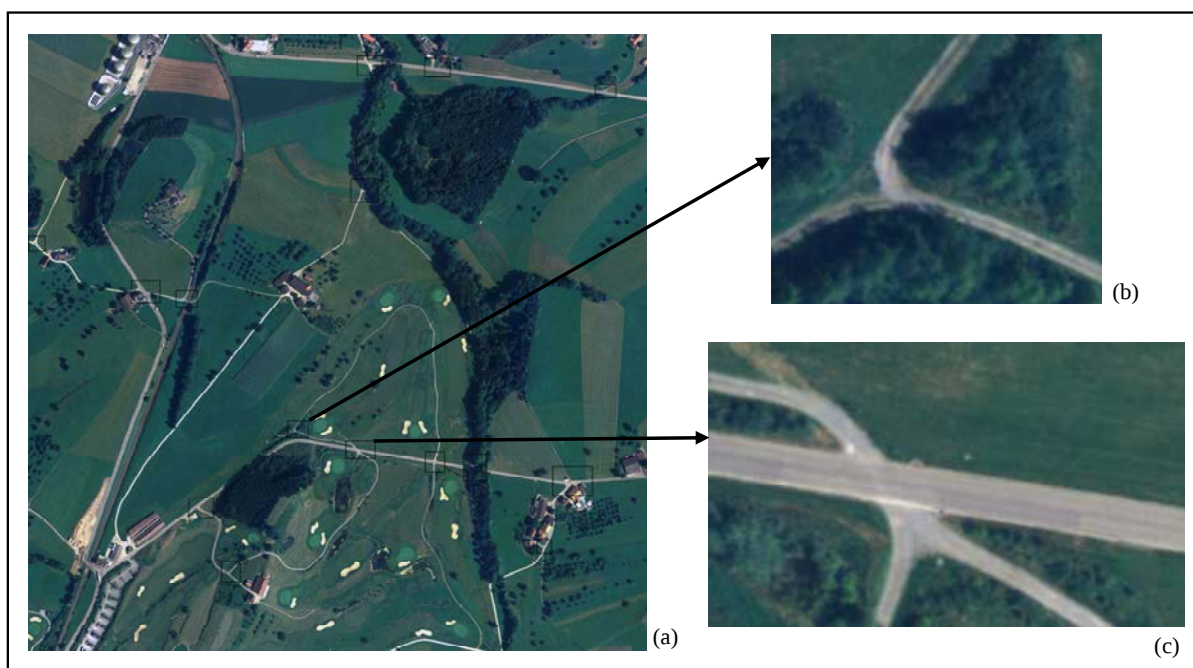


Figura 22 – (a) Imagem original com cruzamentos destacados na forma de sub-imagens; (b – c) Exemplos de regiões de cruzamentos.

As próximas seções visam explicar de modo detalhado cada etapa do método proposto. Nestes termos, busca-se explicitar as questões associadas aos algoritmos e etapas utilizadas.

3.1 Pré – processamento

A etapa de pré-processamento visa segmentar a região de cruzamento em dois elementos básicos: as feições antrópicas (não naturais) e as feições naturais. Seu resultado final é uma imagem binária na qual as feições antrópicas aparecerão em preto. O pré-processamento compreende três sub-etapas: suavização, aplicação do índice espectral e binarização. Estas etapas estão exemplificadas na figura 23 e descritas nas subseções que seguem.

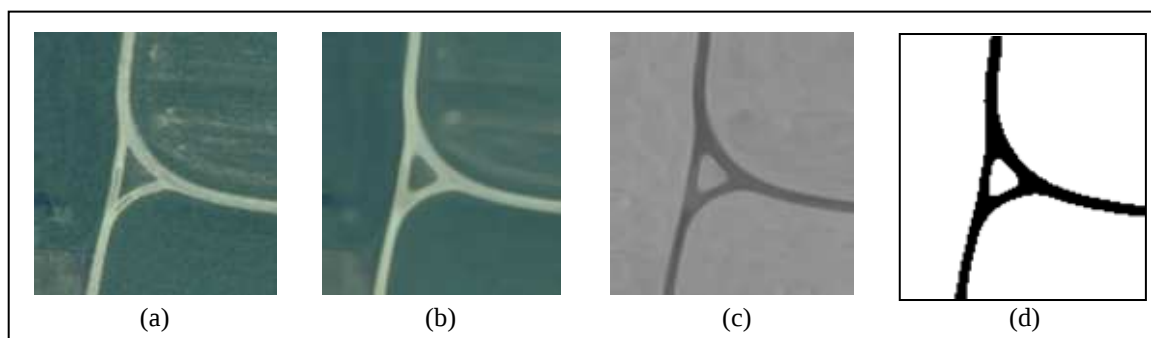


Figura 23 – Exemplo das Etapas do pré-processamento aplicado em uma região de cruzamento. (a) Imagem Original; (b) Imagem Suavizada; (c) Aplicação do índice espectral; (d) Binarização.

3.1.1 Suavização da Imagem

A suavização é a primeira operação a ser realizada sobre a região de cruzamento e tem a função de eliminar ou diminuir o ruído na região, antes da aplicação de

qualquer processo subsequente. No entanto, o algoritmo utilizado no método proposto tem um dos seus parâmetros definido em função desse ruído, o qual é estimado na forma de taxa de ruído. Para definir qual algoritmo de suavização será utilizado um experimento testando alguns dos algoritmos mais consagrados será realizado.

3.1.2 Aplicação do índice espectral

Na literatura existem vários índices espectrais que se propõem a evidenciar uma determinada feição em imagens multiespectrais. Embora a seção 2.1 apresente alguns desses índices o objetivo desta é realçar os cruzamentos de rodovias em áreas rurais, utilizando uma combinação linear das componentes RGB da imagem.

A escolha do algoritmo que deveria ser utilizado neste trabalho foi pautada por um conjunto de testes, aplicando-se alguns dos índices apresentados na seção 2.1 e realizando-se uma binarização seguida de uma avaliação baseada no número de elementos segmentados. Nesse aspecto, o índice que apresentou melhores resultados e demonstrou condições para ser utilizado na segmentação da região de cruzamento foi o método proposto por Ruifrok e Johnston (2001). Detalhes para a construção deste índice e de sua respectiva matriz, que está indicada no quadro 02, serão apresentados na seção 5.1.2.

3.1.3 Binarização da Região de Cruzamento

A binarização da região de cruzamento, que utiliza o método proposto por Otsu (1979) demonstrado na seção 2.3, é o último processo para a etapa de pré-processamento. Assim, após o processo de suavização aplicado na região de cruzamento (figura 24(b)) e aplicação do índice espectral (figura 24(c)), a imagem que contém as estruturas viárias realçadas é binarizada via algoritmo de Otsu (figura 24(h)).

A figura 24 exemplifica a importância desses processos para o método proposto. A binarização sem suavização e sem aplicação do índice espectral (figura 24(d)) pode representar um problema na separação das feições naturais, pois o histograma

normalmente não apresenta vale profundo entre os picos e encontra-se “serrilhado”, indicando ruído excessivo.

Com a suavização (figura 24(b)) e aplicação do índice espectral (figura 24(c)), o histograma da imagem resultante (figura 24(e)) tem os picos que representam as feições mais evidentes (vales profundos entre eles). Estas características facilitam a aplicação do algoritmo de Otsu (1979) porque este apresenta resultados mais eficientes para histogramas bi ou multimodais (Limiarização Multimodal de Otsu), com vales profundos e bem definidos entre os picos (seção 2.3), sendo capaz de gerar o resultado da figura 24(h).

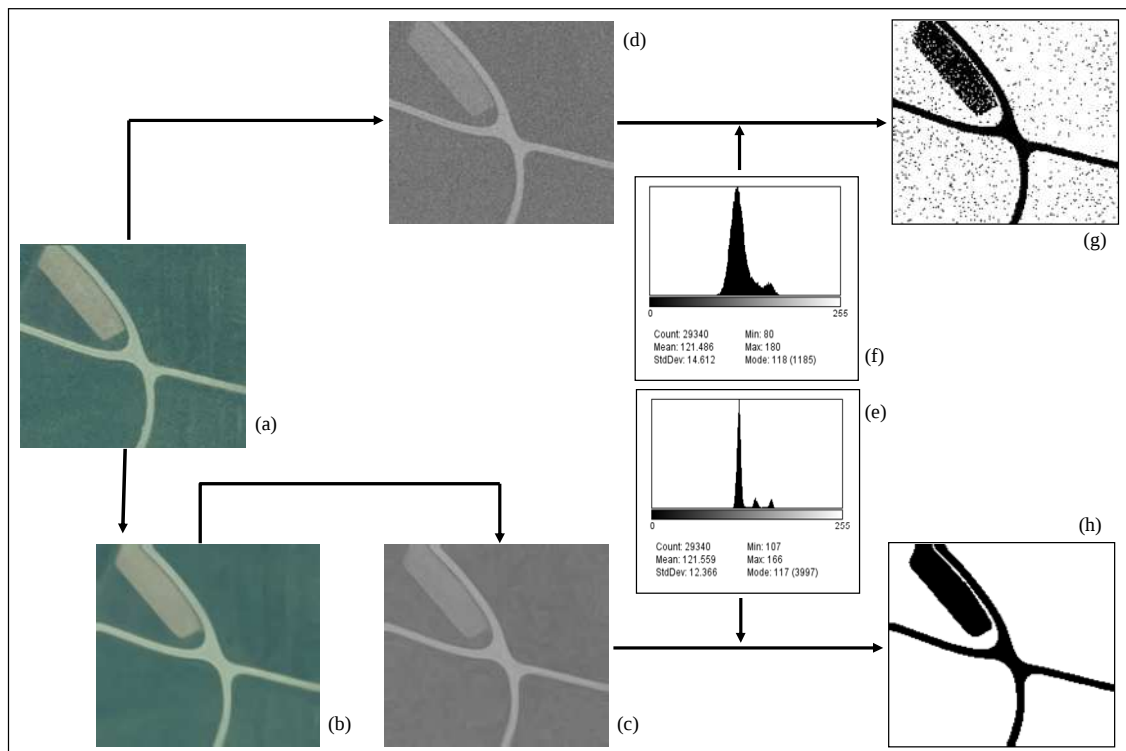


Figura 24 – Método de Otsu aplicado nas imagens com e sem etapas de pré-processamento. (a) imagem original; (b) imagem resultante da suavização; (c) imagem resultante do índice espectral; (d) imagem sem suavização e sem aplicação do índice espectral de rodovia; (e - f) histogramas; (g - h) resultados das limiarizações de Otsu (1979).

3.2 Modelagem e Filtragem Topológica

O resultado da etapa de pré-processamento é uma imagem binária da região de cruzamento, na qual as feições artificiais e não artificiais encontram-se separadas.

Entretanto, é necessário realizar uma filtragem para separar a estrutura que representa o cruzamento de rodovias dentre as várias estruturas não artificiais que podem estar presentes na cena.



Figura 25 – Exemplos de imagens de regiões de cruzamentos, com as respectivas resultantes do pré-processamento e as estruturas espúrias. (a - b) Problemas de estruturas geradas por edificações; (c - d) Problemas de estruturas geradas por solo exposto.

Os problemas que precisam ser resolvidos nessa etapa são exemplificados na figura 25, em que quatro regiões de cruzamento com seus respectivos resultados do pré-processamento são apresentados.

Nas figuras 25(a) e 25(b) são apresentados dois exemplos de regiões de cruzamento que também contém construções e solo exposto. Os exemplos das figuras 25(c) e 25(d) são situações que apresentam solo com uma cobertura diferenciada (solos sem cobertura verde) que geram respostas espectrais parecidas com as rodovias.

Nesse sentido, e considerando que os dados de entrada são as imagens binarizadas, o método proposto realiza nesta etapa a filtragem das estruturas “espúrias” que estão indicadas pelo contorno tracejado em vermelho na figura 25. A filtragem proposta é realizada em três sub-etapas que são: esqueletização da imagem; análise do esqueleto (modelagem topológica) e filtragem topológica do esqueleto.

3.2.1 Esqueletização da Região de Cruzamento

A primeira sub-etapa da modelagem e filtragem topológica é a aplicação de um algoritmo que realize uma esqueletização da região de cruzamento, gerando uma representação compacta da região de cruzamento. Esta representação é definida como o Esqueleto dos Objetos da Região de Cruzamento (EORC).

A esqueletização da região de cruzamento é realizada aplicando-se a transformada do eixo médio (seção 2.6) nas imagens binárias das regiões. Um exemplo desse processo para as imagens indicadas na figura 25 é apresentado na figura 26, que mostra os EORCs com as estruturas relevantes e espúrias. Estas representações podem ser do cruzamento ou de estruturas geradas pelas edificações (figura 26(a-b)), bem como resultado de uma área de solo exposto no entorno do cruzamento (figura 26(c – d)), as quais são definidas como estruturas espúrias. Ambas as estruturas espúrias estão indicadas em contornos tracejados na figura 26(a - d).

Após o processo de esqueletização, as regiões passam a ser representadas e referenciadas somente pelos seus esqueletos. Dessa forma, uma região de cruzamento é agora definida pelo EORC que representam tanto os cruzamentos de rodovias como os falsos positivos ou estruturas espúrias.

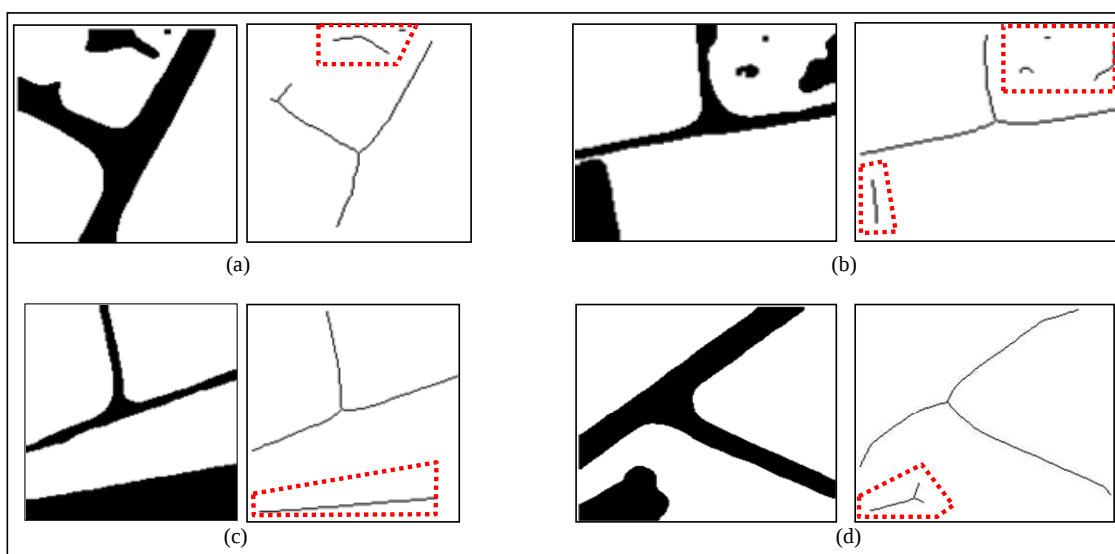


Figura 26 – Determinação dos EORCs: (a – d) Exemplos de aplicações da transformada do eixo médio para as regiões de cruzamento na sua forma binária, indicando os EORCs que compõem a região.

3.2.2 Análise do Esqueleto

O objetivo desta sub-etapa é criar um modelo topológico para o EORC, organizando esses esqueletos em estruturas que permitam separar os cruzamentos das estruturas espúrias, as quais podem dar origem aos falsos positivos. A figura 27 define um modelo para os EORCs (figura 27(d)) que é formado por estruturas semânticas (figura 27(c)), organizadas pelo agrupamento de ramos ou braços que estão ligados entre si.

Os ramos ou braços (figura 27(b)) são definidos por conjuntos de pixels que compõem o esqueleto (figura 27(a)), ligados entre si e limitados por pixels que são definidos como pontos de cruzamentos ou terminais.

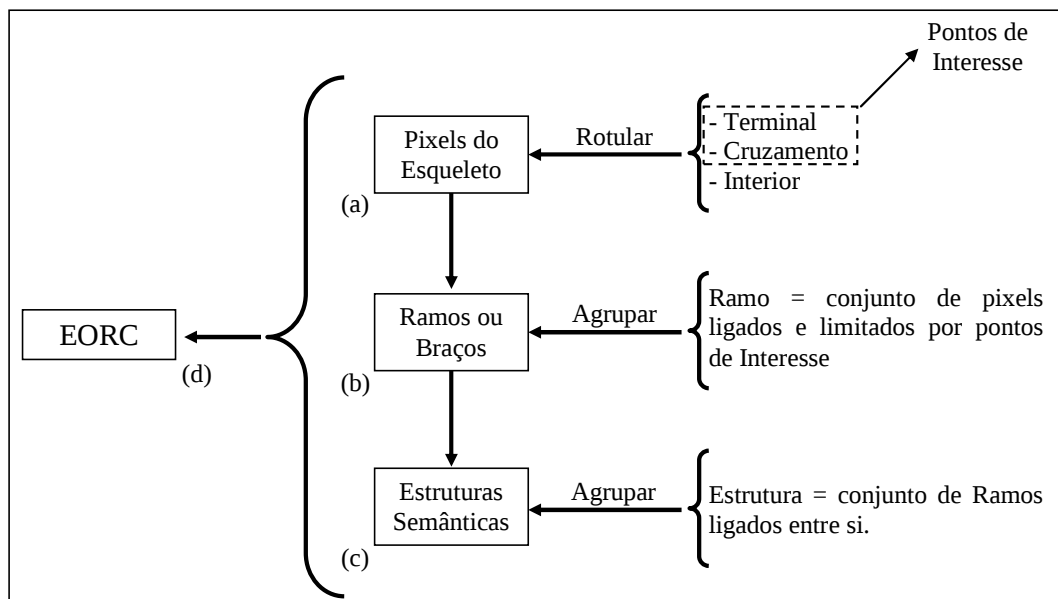


Figura 27 – Modelo Topológico para as estruturas presentes na região de cruzamento esqueletizada; (a) Pixels de esqueleto rotulados; (b) Ramos ou braços modelados; (c) Modelos de estruturas semânticas; (d) EORC.

Conforme a figura 27, tanto os cruzamentos quanto os elementos espúrios definem estruturas semânticas que são modeladas topologicamente, permitindo que o próximo passo seja capaz de selecionar qual estrutura representa o cruzamento. A próxima etapa efetuará então o reconhecimento do cruzamento descartando os elementos espúrios na cena.

Nesse sentido, a modelagem topológica das estruturas que compõem o EORC passa por dois processos que são: a rotulação dos pixels do esqueleto e agrupamentos de pixels para formar os ramos; e o agrupamento dos ramos para formar as estruturas (figura 27(b – c)).

A modelagem topológica é construída hierarquicamente seguindo a sequência da figura 27(a – c), ou seja:

1. Primeiro os pixels que compõem os esqueletos são rotulados como pixels terminais, pixels de cruzamentos ou pixels interiores (figura 27(a)).
2. Depois os pixels são agrupados em “ramos” que são formados por pixels ligados e limitados por pontos de interesse (pontos terminais e de cruzamento) (figura 27(b)); e
3. Por fim, os ramos ligados entre si são agrupados, representando uma estrutura semântica segundo a figura 27(c).

Segundo Di Ruberto (2004), um pixel pode formalmente ser definido como terminal, de cruzamento ou interior da seguinte forma:

- Definição 1 – Um pixel do esqueleto é definido como pixel terminal se ele tem, além dele, apenas mais um pixel na sua vizinhança.
- Definição 2 – Um pixel do esqueleto é definido como pixel de cruzamento se ele tem, além dele, mais que dois pixels na sua vizinhança.
- Definição 3 – Um pixel do esqueleto é definido como pixel interior ao “ramo” se, além dele, existe apenas dois pixels na sua vizinhança.

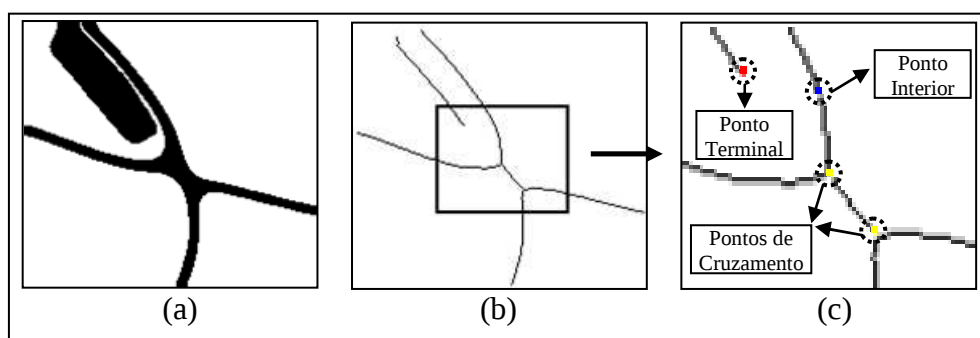


Figura 28 – Tipos de rótulos para os pixels que formam o esqueleto. (a) Imagem Binária; (b) Esqueleto com seleção de exemplo; (c) Exemplo de pixels rotulados.

Um exemplo de rotulação de pixels pode ser verificado na figura 28, que apresenta uma região binária (figura 28(a)) que, após o processo de esqueletização (figura

28(b)), teve seus pixels rotulados conforme pode ser visto na figura 28(c) demonstrando um exemplo de pontos terminais, pontos interiores e pontos de cruzamentos.

O processo de rotulação em função da transformada do eixo médio (seção 2.4) também define para cada pixel do esqueleto seu rótulo em função de sua ordem de tangência (seção 2.6). Obtém-se o mesmo resultado indicado na figura 24(c) com os pixels do esqueleto rotulados como interiores com a cor azul, pixels de cruzamento da cor amarela e os terminais na cor vermelha.

O próximo passo é o agrupamento dos pixels que pertençam a um mesmo “ramo” do esqueleto. Isto é realizado percorrendo todos os pixels partindo de um ponto final ou de cruzamento e agrupando-os, formando o ramo da estrutura semântica. Assim um ramo é definido pelos pixels interiores ligados entre si e limitado por pontos de cruzamentos ou terminais (pontos de interesse).

Por último, as estruturas semânticas são organizadas agrupando os ramos ligados entre si, completando a modelagem topológica da região de cruzamento baseada no seu EORC (figura 27(d)).

Um exemplo dessa modelagem para uma região de cruzamento (figura 28(a)) é apresentado na figura 29, com o EORC dividido em estruturas semânticas, com seus respectivos ramos também separadas.

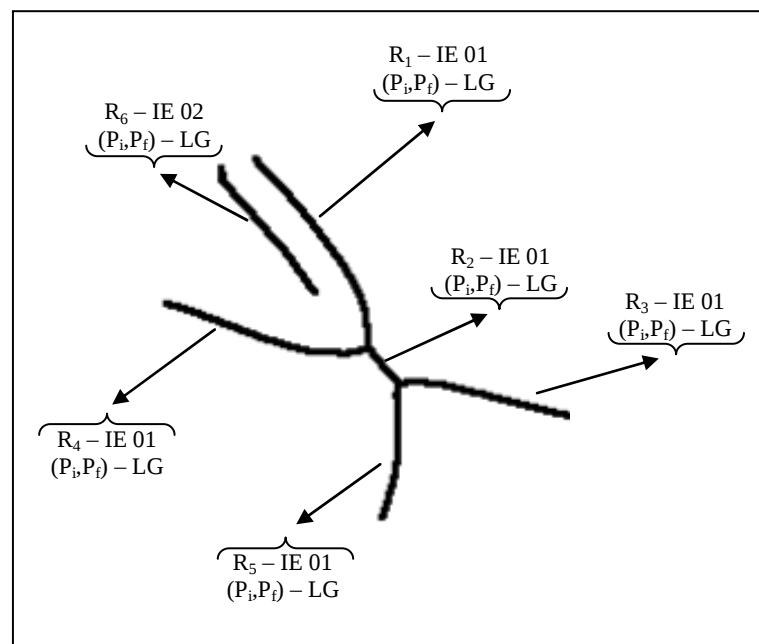


Figura 29 – Exemplo de modelagem topológica com duas estruturas semânticas (IE01 e IE02), que compõem o EORC, com suas respectivas informações.

Tabela 01 – Relatório das Estruturas Semânticas - RES

IE	# Branches	# Junctions	# End-point	Average Branch Length	# Triple points	# Quadruple points	Maximum Branch Length
01	5	2	4	72,561	2	0	102,296
02	1	0	2	71,811	0	0	71,811

As estruturas semânticas são denominadas por Identificadoras de Estruturas (IE) e cada um dos ramos que a compõe tem as seguintes informações: número do ramo (R_n), identificação da estrutura a qual o ramo pertence (IE); coordenadas dos pixels iniciais e finais do ramo (P_i , P_f) e comprimento do ramo (LG).

Estas informações são armazenadas em dois relatórios dos quais, um contém as informações genéricas da região (esqueleto dividido em suas estruturas semânticas), que é o Relatório das Estruturas Semânticas (RES) mostrado na tabela 01. O outro é definido como Relatório dos Ramos das Estruturas Semânticas (RRES), o qual caracteriza individualmente os elementos (ramos) que compõem as estruturas semânticas e disponibiliza as informações dos ramos, que é o RRES da figura 29, como mostra a tabela 02.

Tabela 02 – Relatório dos Ramos das Estruturas Semânticas - RRES

R_i	IE	Branch length	X_i	Y_i	X_f	Y_f	Euclidean distance
1	01	102,296	41	3	90	85	95,525
2	01	98,355	2	66	90	85	90,028
3	01	79,627	177	115	104	101	74,330
4	01	62,142	96	159	104	101	58,549
5	01	21,799	90	85	104	101	21,260
6	02	71,811	26	7	67	61	67,801

No relatório mais genérico (RES), exemplificado na tabela 01, as informações topológicas das estruturas indicam o número de ramos que compõem cada estrutura (*# Branches*), o número de pontos terminais (*# End-point*), o número de pontos de cruzamento (*# Junctions*), quais os tipos de pontos de cruzamentos, ou seja, X (*# Quadruple points*) ou T (*# Triple points*), além do comprimento médio (*Average Branch Length*) e comprimento máximo (*Maximum Branch Length*) de cada estrutura.

O Relatório dos Ramos das Estruturas Semânticas – RRES - é um relatório mais detalhado, como indica a tabela 02. Neste relatório estão indicadas a estrutura semântica a qual pertence (IE), o comprimento (*Branch length*), as coordenadas iniciais (X_i , Y_i) e finais (X_f , Y_f) além da distância euclidiana entre tais coordenadas (*Euclidean distance*) para cada um dos ramos (R_i).

3.2.3 Filtragem Topológica do Esqueleto

A última sub-etapa é a filtragem propriamente dita, que ocorre com base na modelagem topológica do EORC. A filtragem realizada no EORC tem como objetivo selecionar a estrutura semântica que representa o cruzamento a ser extraído dentro da região. Assim é preciso definir algumas regras topológicas para o elemento cruzamento.

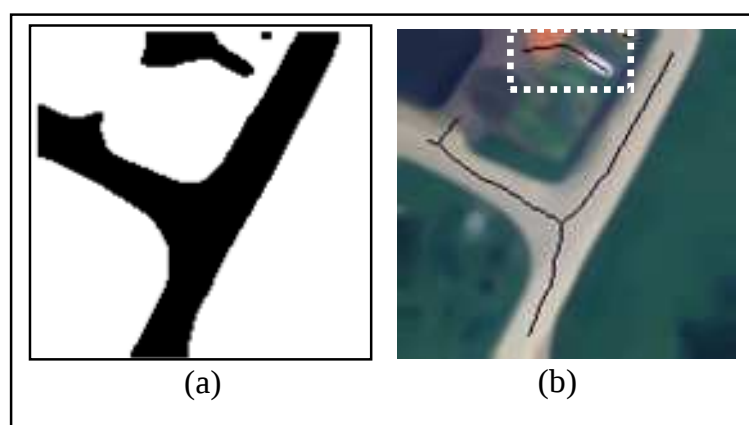


Figura 30 – Exemplo de uma região de cruzamento com o EORC. (a) Imagem Binária da região; (b) EORC sobreposto à imagem original.

Tabela 03 – Relatório dos Ramos das Estruturas Semânticas (RRES), da figura 30

R_i	IE	Branch length	X_i	Y_i	X_f	Y_f	Euclidean distance
1	01	86,811	109	9	65	77	80,994
2	01	62,255	16	45	65	77	58,523
3	01	49,385	52	121	65	77	45,880
4	01	13,314	24	35	16	45	12,806
5	01	4,414	12	44	16	45	4,123
6	02	37,971	50	8	83	16	33,956
7	03	3,000	90	2	93	2	3,000

Tabela 04 – Relatório das Estruturas Semânticas (RES), da figura 30.

IE	# Branches	# Junctions	# End-point	Average Branch Length	# Triple points	# Quadruple points	Maximum Branch Length
01	5	2	4	42,953	2	0	86,811
02	1	0	2	37,971	0	0	37,971
03	1	0	2	3,000	0	0	3,000

Para exemplificar essa necessidade, a figura 30(a) apresenta a imagem binária da região com três estruturas semânticas indicadas no EORC da figura 30(b), modeladas topologicamente com seus respectivos relatórios apresentados nas tabelas 03 e 04, que representam os relatórios RRES e RES, respectivamente. A filtragem ocorre baseando-se nas regras topológicas inerentes à estrutura que representa o cruzamento. Essas regras são explicitadas por:

Regra I – A estrutura (esqueleto) que representa o cruzamento tem um ou mais pontos de cruzamento.

Regra II – Quando existem duas ou mais estruturas com pontos de cruzamentos, o esqueleto que representa o cruzamento deverá ter a maior soma dos comprimentos dos ramos que compõem o esqueleto.

Um exemplo da filtragem baseada na regra topológica I é apresentado na figura 30, na qual se verifica a existência de três estruturas na região de cruzamentos (figura 30(a)). No entanto, as estruturas indicadas pelo quadrado tracejado na figura 30(b) não contém pontos de cruzamentos, como mostra a elipse tracejada no relatório RES indicado na tabela 04, o que garante que as mesmas não representam cruzamentos. Assim, a filtragem baseada na regra topológica I é realizada com as informações do RES que indica as características topológicas da região de forma mais geral.

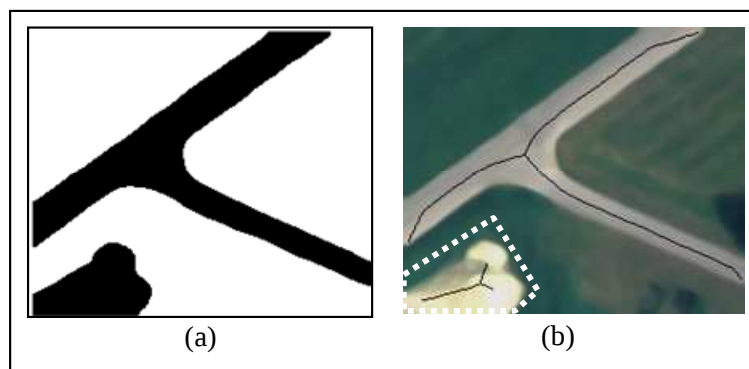


Figura 31 – Exemplo de uma região de cruzamento com o EORC. (a) Imagem Binária da região; (b) EORC sobreposto sobre a imagem original.

Tabela 05 – Relatório dos Ramos das Estruturas Semânticas (RRES), da figura 31

R_i	IE	Branch length	X_i	Y_i	X_f	Y_f	Euclidean distance
1	01	182,137	226	168	80	85	167.943
2	01	154,480	197	3	80	85	142.874
3	01	106,882	3	143	80	85	96.400
4	02	43,556	12	182	51	171	40.522
5	02	14,657	55	158	51	171	13.601
6	02	9,657	59	175	51	171	8.944

Tabela 06 – Relatório das Estruturas Semânticas (RES), da figura 31.

IE	# Branches	# Junctions	# End-point	Average Branch Length	# Triple points	# Quadruple points	Maximum Branch Length
01	3	1	3	147.833	1	0	182.137
02	3	1	3	22,623	1	0	43,556

Uma filtragem baseada na regra topológica II é realizada na situação em que existam mais estruturas com pontos de cruzamento, como no exemplo da figura 31(a). Essa filtragem ocorre com base no RRES (tabela 05), pois este relatório permite efetuar a soma dos comprimentos dos ramos das estruturas como indica o círculo tracejado na tabela 05.

A figura 31 apresenta um exemplo de aplicação da filtragem baseada na regra topológica II. Neste exemplo, os dois esqueletos têm as mesmas características quando se avalia o número de pontos de cruzamentos e de ramos, como pode ser verificado na tabela 06 (RES). Assim, a primeira regra não é suficiente para selecionar a estrutura de cruzamento, mas quando se faz uma análise da soma dos comprimentos dos ramos, que é possível

utilizando o RRES indicado na tabela 05, a maior estrutura é escolhida conforme preconiza a regra topológica II.

3.3 Delineamento do Cruzamento

A última etapa do método proposto é o delineamento do cruzamento, uma vez que a seleção e ou detecção da estrutura que representa o elemento cruzamento dentro da região já foi realizada. Nesse sentido, partindo de uma região que contém várias feições definidas como não naturais, e entre elas o cruzamento, o método proposto utiliza essa etapa para delinear somente o cruzamento separando-o das estruturas espúrias, obtendo como resultado o polígono que descreve o cruzamento extraído.

Após a filtragem topológica realizada na etapa anterior, a estrutura remanescente é a que representa apenas o cruzamento. Para realizar o delineamento do cruzamento serão utilizados como pontos sementes somente os pixels que estão rotulados como pontos de cruzamentos ou pontos terminais, definidos como pontos de interesse.

Um exemplo dos pontos de interesse que compõem o resultado da filtragem topológica pode ser verificado na figura 32. Como o algoritmo proposto para o delineamento utiliza como ponto inicial somente os pontos de interesse, um exemplo desses pontos que compõem a estrutura semântica resultante da filtragem topológica está sobreposto na imagem em que ocorrerá o delineamento, que neste método são as imagens binárias indicadas a figura 32.

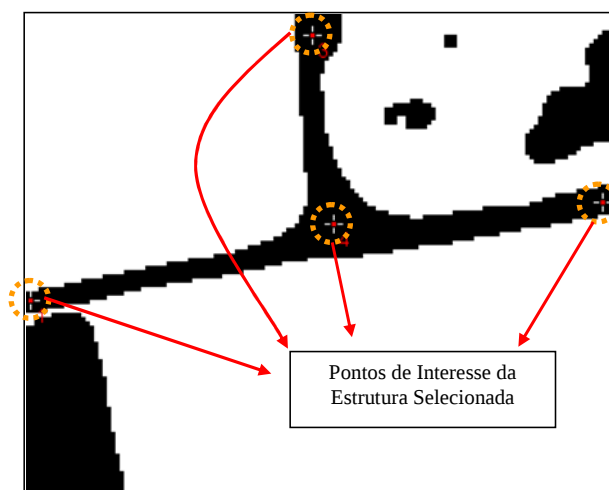


Figura 32 – Pontos de interesse da estrutura filtrada sobrepostos na imagem binária.

3.3.1 Aplicação do Algoritmo de “*Level Set*”

O algoritmo de *Level Set* é muito eficiente para extração de uma determinada feição em uma região ruidosa ou preenchida com mais feições que não sejam de interesse como, por exemplo, as estruturas espúrias. Este é o problema em questão haja vista que o cruzamento já foi detectado pela filtragem topológica e, no entanto, o mesmo ainda precisa ser delineado e separado das outras feições presentes na imagem.

Malladi e Sethian (1995) colocam algumas vantagens do algoritmo de *Level Set* frente a outros métodos de contorno ativo como o *Snakes* (KASS et al., 1988), sendo estas vantagens indicadas com mais detalhes na seção 2.5.

No trabalho de Malladi e Sethian (1995), é creditada ao algoritmo de *Level Set* a vantagem de contar com menos parâmetros ligados diretamente a sua inicialização (um ponto é suficiente), a possibilidade de se definir naturalmente um critério de parada a partir da imagem (neste caso as bordas do objeto de interesse), além da velocidade de processamento no que tange os métodos baseados em EDP. A figura 33 apresenta um exemplo de aplicação do *Level Set* em uma região de cruzamento utilizando apenas um ponto de interesse, sendo este utilizado como ponto inicial ou ponto semente.

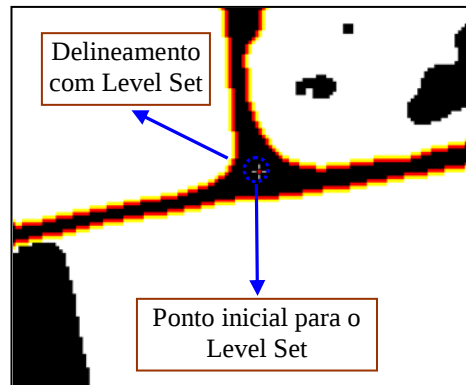


Figura 33 – Exemplo de delineamento do cruzamento em uma região na sua forma binária utilizando o algoritmo *Level Set*.

O exemplo apresentado na figura 33 é para um ponto semente. No entanto, como o algoritmo de delineamento utiliza os pontos de interesse da estrutura selecionada, pelo menos três pontos são utilizados como pontos iniciais ou sementes no método proposto. Essa quantidade de pontos gera uma maior robustez na aplicação do algoritmo de *Level Set*, como pode ser verificado na figura 34.

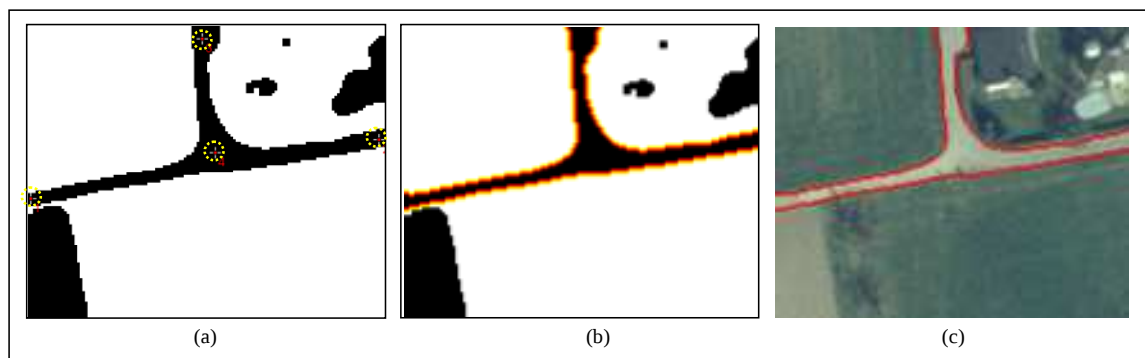


Figura 34 – Exemplo de aplicação do algoritmo *Level Set*; (a) Pontos de Interesse como pontos iniciais ao *Level Set* na região binária; (b) Resultado do delineamento do cruzamento entre as outras estruturas na região; (detectado e delineado); (c) Sobreposição do Cruzamento Extraído na imagem original.

O resultado do processo de delineamento pode ser verificado no exemplo da figura 34. Neste exemplo os pontos iniciais ou sementes (figura 34(a)) são resultantes da filtragem topológica e, para que somente o cruzamento seja delineado, esses pontos devem estar no interior da feição de interesse. O resultado do algoritmo de *Level Set*, que é o cruzamento delineado, é apresentado na figura 34(b).

A figura 34(c) apresenta o resultado final do processo de extração que aqui é entendido como detecção e delineamento. A detecção foi realizada na filtragem topológica e o delineamento realizado com o algoritmo de *Level Set* conforme descrito nesta seção, cuja sobreposição do polígono extraído está indicado na figura 34(c).

4 Materiais e Métodos

Este capítulo está dividido em três seções onde são apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento do método proposto, além da forma de avaliação dos resultados que serão discutidos no próximo capítulo. A seção 4.1 apresenta os aspectos computacionais inerentes ao desenvolvimento deste trabalho, enquanto na seção 4.2 são descritos os procedimentos adotados para realizar a avaliação numérica dos resultados da extração. Por último, na seção 4.3 se encontram as imagens utilizadas nos experimentos.

4.1 Aspectos Computacionais

O método proposto no capítulo 3 tem a maioria de suas etapas desenvolvidas em um *software* proprietário de Visão Computacional denominado HALCON, versão 10.0, desenvolvido e distribuído pela empresa MVTec. As outras etapas do método foram implementadas em linguagem C e no software de distribuição livre denominado FIJI, que utiliza o ambiente *ImageJ*, ambos em plataforma Windows – PC .

Considerando os *softwares* HALCON e FIJI, bem como os programas desenvolvidos em linguagem C, os módulos computacionais utilizados no método estão distribuídos da seguinte forma:

- Etapa de Pré-processamento – Etapa desenvolvida utilizando o software HALCON para os procedimentos de suavização e estimativa de ruídos. Este processo foi complementado com algoritmos próprios do *software FIJI* utilizando um script desenvolvido em linguagem *Python* *Java* para o ambiente *FIJI*, em que se aplicou o índice espectral e a binarização de Otsu que são algoritmos disponíveis no software.
- Modelagem e Filtragem Topológica – Utilizou-se o software *FIJI* para a esqueletização e análise do esqueleto, criando um relatório dos resultados. A modelagem e a filtragem topológica foram implementadas em linguagem C, pautando-se nos relatórios dos resultados e selecionando os pontos sementes para a última etapa;

- Etapa de Delineamento – Com base no resultado da filtragem topológica, um novo script em *Python Java* foi escrito para que o *software FIJI* aplicasse o algoritmo de *Level Set* (*plugin* do *software*), realizando o delineamento do cruzamento sendo as bordas extraídas no *software HALCON*, que gera um arquivo vetorial do cruzamento extraído.

Os resultados para cada uma das etapas estão disponíveis em formato de arquivos, respeitando a sequência indicada na figura 21 que indica o fluxograma do método proposto para este trabalho.

4.2 Procedimentos para Análise dos Resultados

As formas de análise dos resultados obtidos pelo método proposto são visual e numérica, na qual a primeira baseia-se nos vetores extraídos sobrepostos sobre a imagem original, enquanto a segunda utiliza a aplicação de dois critérios quantitativos relacionando os resultados obtidos pelo método com as extrações realizadas pelo operador, que são denominadas cruzamentos de referência. Esta avaliação é realizada com base nos critérios utilizados em Fazan e Dal Poz (2012).

Na figura 35, o cruzamento tomado como referência é indicado pela cor cinza e sua área é indicada por A_R , enquanto o cruzamento extraído segundo o método proposto é indicado pela cor branca com sua área definida por A_E e, por último, a intersecção entre os dois cruzamentos está indicada na figura 35 pela cor vermelha. O valor da área de intersecção será representado por $A_{R \cap E}$.

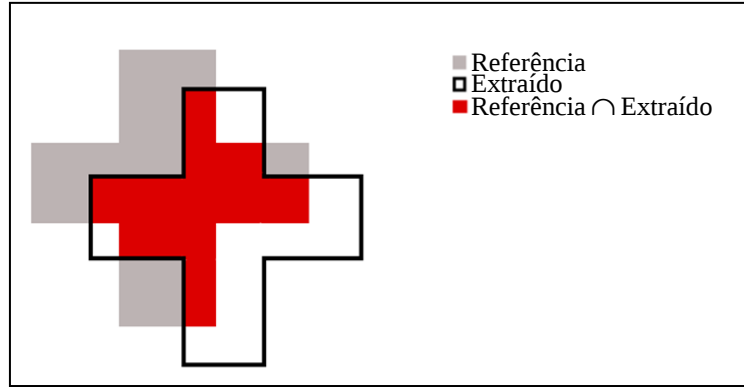


Figura 35 – Representações para o cruzamento de referência; o cruzamento extraído e a intersecção entre os cruzamentos de referência e extraído.

Os critérios utilizados para avaliação numérica do método proposto são as medidas de completeza C_1 e correção C_2 , que são definidas da seguinte forma:

Completeza – Esta medida é a razão entre a área de intersecção dos cruzamentos, extraído e de referência, e a área do cruzamento de referência como indica a equação 52;

$$C_{comp} = \frac{A_{E \cap R}}{A_R} \cdot 100\% \quad (52)$$

Correção: Medida definida pela razão entre a área de intersecção dos cruzamentos, extraído e de referência, e a área do cruzamento extraído como indica a equação 53.

$$C_{corr} = \frac{A_{E \cap R}}{A_E} \cdot 100\% \quad (53)$$

Considerando que o método proposto utiliza imagens com os cruzamentos selecionados sobre elas, é possível determinar medidas de completeza e correção globais utilizando os resultados calculados individualmente, para cada um dos cruzamentos. Nesse sentido, a completeza global ($COMP_{global}$) e a correção global ($CORR_{global}$) são definidas conforme as equações 54 e 55:

$$COMP_{global} = \frac{\sum A_{R \cap E}}{\sum A_R} \quad (54)$$

$$CORR_{global} = \frac{\sum A_{R \cap E}}{\sum A_E} \quad (55)$$

Os cruzamentos utilizados para avaliar o método proposto são os cruzamentos simples e complexos, de acordo com os classificados do tipo Y, T ou X, para cruzamentos simples e complexos de primeira classe (quando não existem “ilhas” no seu interior) e de segunda classe (quando há presença de “ilhas”), de acordo com a classificação apresentada na figura 03.

4.3 Imagens Utilizadas Para Testes

As imagens utilizadas para avaliar o método proposto compreendem regiões de cruzamentos selecionadas nas imagens do projeto *"Data EuroSDR test on road extraction"*. Este projeto teve a finalidade de realizar testes com métodos para extração de rodovias e foi coordenado, principalmente, por um grupo de pesquisadores ligados à Universidade de Munique, Alemanha.

Neste trabalho foram utilizadas cinco ortoimagens, das quais duas foram geradas a partir de imagens tomadas com a câmara ADS40, com uma resolução de 30 cm (Imagens ADS1 e ADS2), e as demais com resolução de 50 cm (Imagens Aerial_1, Aerial_2 e Aerial_3). Detalhes adicionais sobre essas imagens podem ser encontradas em Baltsavias et al. (2004) e Mayer et al. (2006).

Nessas imagens, a maioria dos cruzamentos existentes em áreas definidas como rurais foram selecionados para testar o método proposto neste trabalho. Dessa forma, para as imagens ADS1 e ADS2, indicadas na figura 36, foram selecionados 15 e 19 cruzamentos respectivamente.

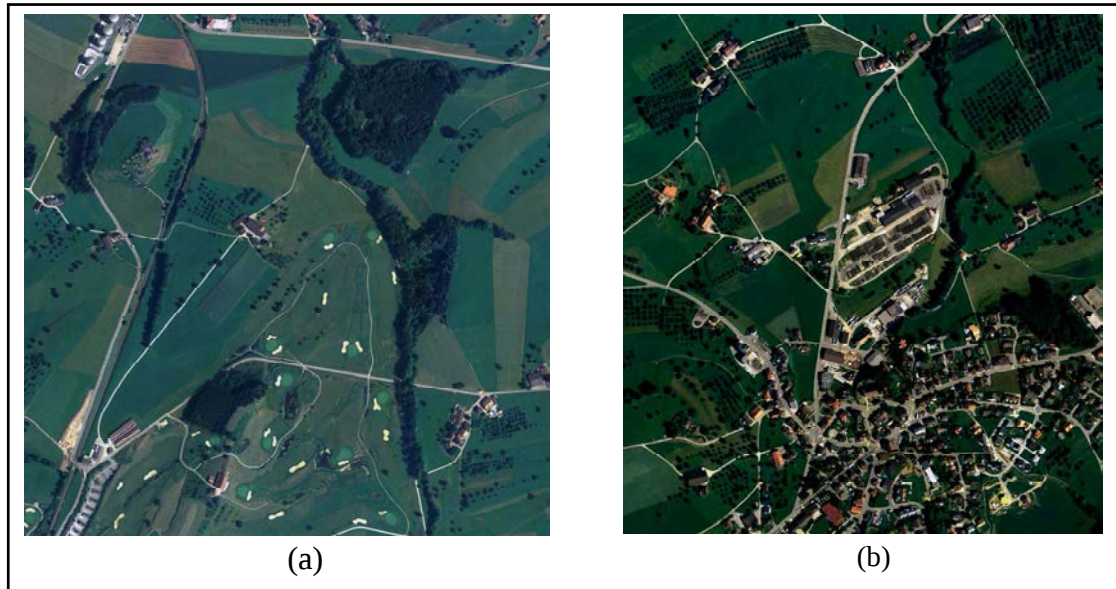


Figura 36 – Ortoimagens da câmara ADS40; (a) ADS1; (b) ADS2

Nas imagens nomeadas como Aerial_1, Aerial_2 e Aerial_3, o procedimento para seleção de regiões de cruzamentos segue o mesmo padrão das imagens ADS1 e ADS2 e foi selecionada a maioria dos cruzamentos em regiões rurais. Estas imagens estão indicadas na figura 37 e contam com 30, 40 e 39 regiões de cruzamentos selecionados nas imagens Aerial_1, Aerial_2 e Aerial_3, respectivamente.

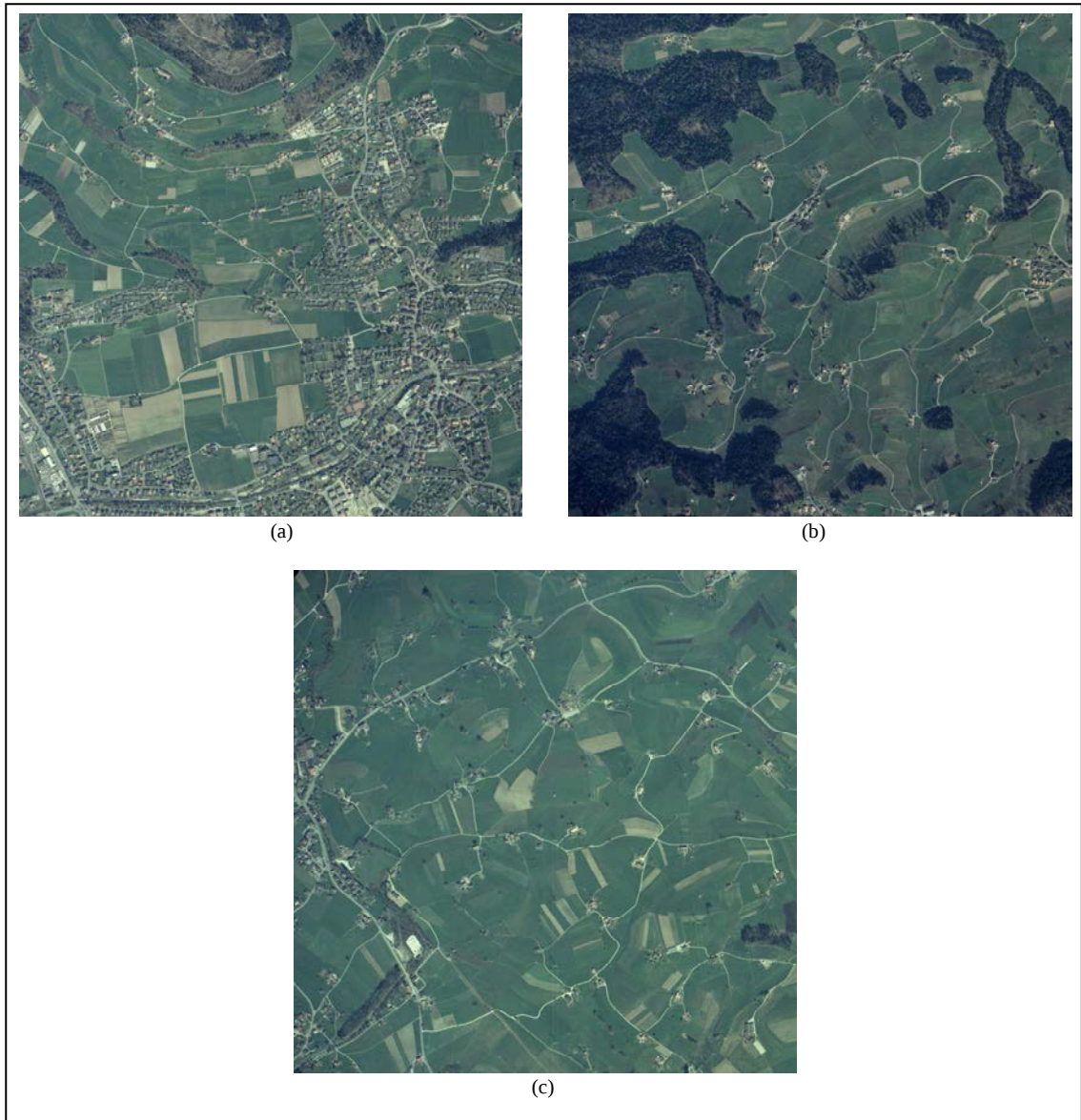


Figura 37 – Ortoimagens geradas das imagens aéreas. (a) Aerial_1; (b) Aerial_2; (c) Aerial_3

5 Resultados Experimentais e Análises

Neste capítulo são realizados os experimentos para estimar os parâmetros utilizados na aplicação dos algoritmos de suavização e do índice espectral, bem como os experimentos utilizados para avaliar a metodologia proposta.

O capítulo é dividido em duas seções das quais a primeira contempla os experimentos utilizados para estimar os parâmetros dos algoritmos. Esta seção ainda dividi-se em duas subseções nas quais uma define os parâmetros de suavização e a outra contempla os parâmetros necessários na matriz utilizada no índice espectral proposto.

A segunda seção é destinada a apresentação dos resultados e as respectivas análises, referentes à avaliação do método proposto no capítulo 3. Esta seção é dividida em seis subseções, sendo uma para cada imagem apresentadas no capítulo anterior (ADS1, ADS2, Aerial_1, Aerial_2 e Aerial_3) e uma que encerra o capítulo com a síntese dos resultados. Os critérios de completeza e correção foram calculados para cada um dos cruzamentos extraídos que foram: 15 cruzamentos para imagem teste 01; 19 para imagem teste 02; 30 para imagem teste 03; 40 para imagem teste 04; e 39 para imagem teste 05.

5.1 Experimentos para estimar parâmetros

Nesta seção os experimentos propostos têm a finalidade de estimar os parâmetros utilizados no algoritmo de suavização (seção 3.1.1) e os parâmetros que compõem a matriz que define o índice espectral (seção 3.1.2).

5.1.2 Parâmetros do algoritmo de suavização

O algoritmo de suavização proposto neste trabalho foi o Fluxo de Curvatura Média (AUBERT e KORNPORBST, 2002), que é o precursor do conhecido

algoritmo de Perona e Malik (1990) demonstrado na seção 2.2. Esse algoritmo realiza uma difusão na direção ortogonal ao gradiente preservando as bordas da imagem, de maneira que o processo de suavização foi dividido em duas etapas que são: a estimativa da taxa de ruído e a estimativa dos parâmetros do algoritmo de suavização.

5.1.1.1 Estimativa da taxa de ruído na imagem

No intuito de obter o máximo em automação, o método proposto utiliza uma estimativa da taxa de ruído nas sub-imagens, utilizando-o para realizar os processamentos seguintes com os parâmetros definidos em função dessa estimativa.

Para determinar a taxa de ruído foi aplicado o método de Föerstner (1999), que utiliza uma máscara específica (IMMERKAER, 1996) para inicializar um processo iterativo, definindo uma medida de homogeneidade para cada pixel. Esta medida é calculada com base nas primeiras derivadas para os valores em tons de cinza em cada um dos canais RGB, assumindo que o ruído da imagem é gaussiano (FÖERSTNER, 1999).

Para exemplificar o resultado dessa estimativa, as taxas de ruídos calculadas segundo o método de Föerstner (1999) para os cruzamentos 08 e 09 da imagem ADS1 (figura 38 (a,b)) são, respectivamente, 1,36456 e 1,35656.



Figura 38 – Exemplos de cruzamentos da imagem ADS1. (a) Cruzamento 08. (b) Cruzamentos 09.

5.1.1.2 Estimativa do parâmetro de suavização

Em análise de imagens, o sucesso dos métodos depende principalmente da qualidade das imagens de entrada. No entanto, estas nem sempre têm a qualidade necessária para as etapas subsequentes que integram um processo. Isto ocorre por várias razões tais como: qualidade dos sensores, o ruído natural inerente a qualquer sinal, interferências de alvos, problemas de transmissão, dentre outros (seção 2,2).

Tomando como premissa que não há imagem sem ruído, é importante considerar uma maneira eficiente de atenuá-lo (AUBERT e KORNPROBST, 2002). Assim, a etapa de suavização é historicamente uma das mais antigas preocupações na fase de pré-processamento, além de ser indispensável para a maioria das aplicações.

Existem muitas maneiras de atenuar o ruído em uma imagem, as quais utilizam várias abordagens para isso. Dentre elas podem ser citadas as abordagens baseadas em filtros espaciais e/ou no domínio da frequência (JAIN, 1989), as abordagens com modelagens estocásticas (GEMAN e GEMAN, 1984) e os modelos construídos com base no cálculo variacional ou Equações Diferenciais Parciais - EDPs (AUBERT e KORNPROBST, 2002). Neste trabalho optou-se por utilizar a última abordagem.

Dessa forma, o método proposto utiliza uma suavização da imagem baseada no Fluxo de Curvatura Média – MCF (seção 2.2). O critério utilizado para a escolha do algoritmo MCF foi a comparação dos resultados da taxa de ruído após o processamento realizado por três algoritmos consagrados, tendo por base uma ampla amostra de cruzamentos.

Nessa comparação utilizou-se um conjunto de 30 regiões de cruzamentos, com valores para a taxa de ruído estimada segundo Föerstner (1999), antes e depois das suavizações. Os algoritmos de suavização utilizados na comparação foram o de Difusão Anisotrópica (PERONA E MALIK, 1990), Mediana (HUANG et al., 1979) e o próprio algoritmo do Fluxo de Curvatura Média - MCF (AUBERT e KORNPROBST, 2002). As taxas de ruído estimadas a partir das imagens suavizadas por estes algoritmos e a partir das imagens originais são apresentadas no gráfico da figura 39.

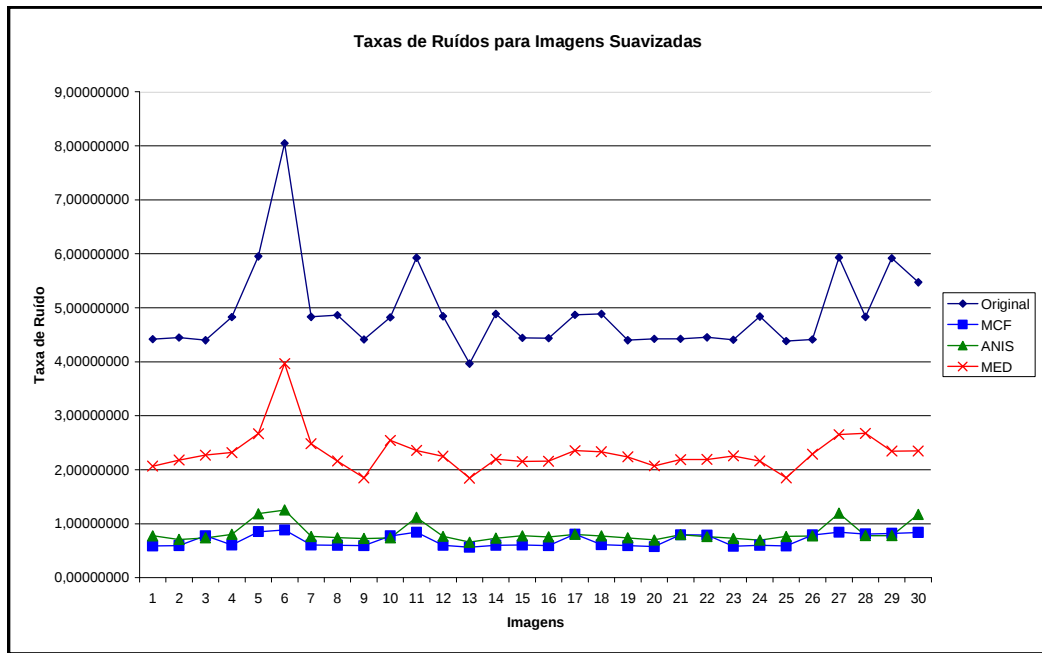


Figura 39 – Taxa de ruído para um conjunto de 30 imagens originais e após a aplicação de três conhecidas formas de atenuação de ruídos (fluxo de curvatura média, difusão anisotrópica, mediana).

Nota-se que a maioria dos resultados para as regiões de cruzamentos apresenta as menores taxas de ruídos depois de passar por uma suavização realizada com o Fluxo de Curvatura Média, conforme pode ser verificado no gráfico da figura 39.

O algoritmo de suavização escolhido tem alguns parâmetros que devem ser definidos (seção 2.2) como o número de iterações, o tamanho da malha em que a EDP é resolvida, além do parâmetro sigma que determina o grau de suavização por meio do desvio-padrão da correspondente gaussiana. Nesse sentido, em todos os experimentos realizados no trabalho, tendo em vista a automatização do processo, foram definidos valores fixos para os dois primeiros parâmetros, com exceção do sigma.

O valor de sigma é então determinado de forma automática em função da taxa de ruído k_0 da imagem original, estimada conforme a seção anterior, ou seja, $\sigma = f(k_0)$.

Para definir a função f , um procedimento foi realizado, englobando todas as imagens deste trabalho (143 regiões de cruzamentos utilizados na avaliação), baseando-se no nível de suavização σ_i de cada imagem e no número de estruturas detectadas nas imagens suavizadas ($\#E_i$).

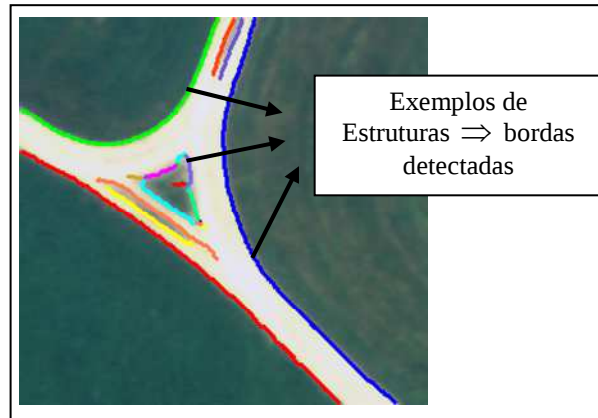


Figura 40 – Exemplo de cruzamento com estruturas detectadas na forma de bordas, plotadas sobre a imagem.

Inicialmente cabe esclarecer que, uma estrutura é definida como uma das bordas detectada na imagem por um detector de bordas, como o detector de bordas de Canny (1986). Um exemplo de estruturas é apresentado na figura 40, que mostra uma imagem com suas bordas detectadas.

O procedimento realizado consistiu em determinar um valor $\#E_i$ para cada nível de suavização $\sigma_i = f(k_0)$, sendo k_0 a taxa de ruído para a imagem original. No conjunto total de imagens deste trabalho calculou-se $\sigma_i = n_i \cdot k_0$, com n_i pertencente a $\left\{\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \dots, 1, \dots, 4, 5\right\}$, gerando um conjunto de pares ordenados $(\sigma_i, \#E_i)$, com $i = 1, \dots, 9$.

Na figura 3.06(a-j) é apresentado um exemplo desse conjunto para uma das regiões de cruzamento, com os níveis de suavizações σ_i e suas respectivas quantidades de estruturas $\#E_i$ detectadas, considerando o $k_0 = 4,4535$ estimado para a imagem original desse exemplo.

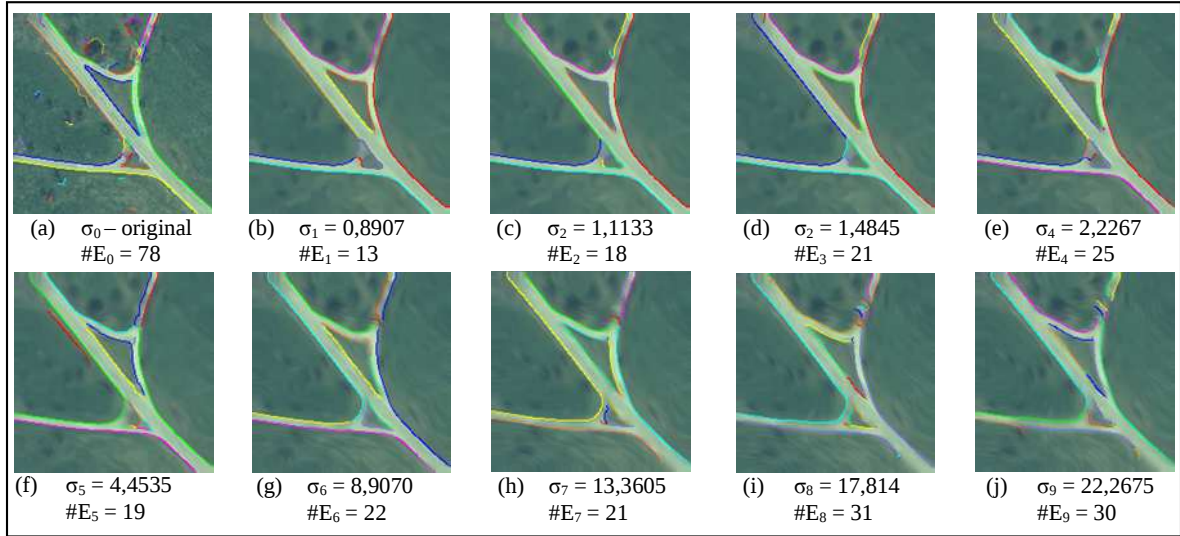


Figura 41 – Exemplo de uma da imagem de cruzamento com σ_i variando no intervalo $\left[\frac{k_0}{5}, 5k_0\right]$ e os respectivos números de estruturas detectadas $\#E_i$.

Considerando as regiões de cruzamento utilizadas neste trabalho e os pares $(\sigma_i, \#E_i)$, explicitado anteriormente para cada região, optou-se por calcular uma média do número de estruturas detectadas para cada um dos níveis de suavização para todos os cruzamentos de uma mesma imagem, segundo a equação 56.

$$\mu_{(\sigma_i, \#E_i)} = \frac{\sum_{j=1}^n \#E_j}{n} \quad (56)$$

Em que $\mu_{(\sigma_i, \#E_i)}$ é a média calculada para cada um dos índices de suavização fixando o índice e fazendo variar o número de estruturas detectadas ($\#E_j$) com $j = 1 \cdots n$, sendo n o número de cruzamentos de uma determinada imagem.

O gráfico das médias das estruturas detectadas em função dos níveis de suavizações para cada uma das imagens utilizadas neste trabalho é apresentado na figura 42.

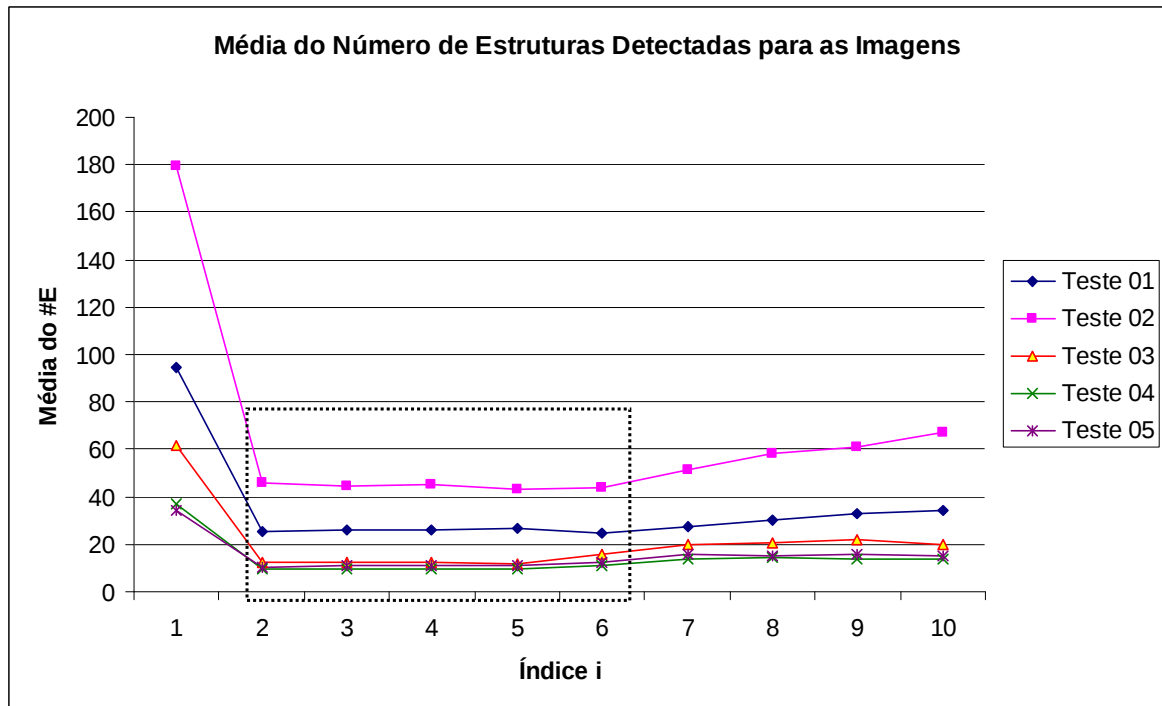


Figura 42 – Gráfico da média dos números de estruturas detectadas em função do nível de suavização para cada um dos conjuntos de cruzamentos utilizados neste trabalho.

Baseando-se no gráfico um padrão para as regiões de cruzamentos pode ser constatado, ao menos para os cruzamentos utilizados neste trabalho, que são: 15 cruzamentos para a imagem teste 01, 19 cruzamentos para imagem teste 02, 30 cruzamentos na imagem teste 03, 40 cruzamentos na imagem teste 04 e 39 cruzamentos na imagem teste 05, que são as imagens ADS1, ADS2, AERIAL_01, AERIAL_02 e AERIAL_03 do capítulo 4.

Este padrão pode ser verificado mediante a análise do gráfico da figura 42, que mostra o número de estruturas detectadas para um conjunto de cruzamentos ($\#E_j$) em função dos seus índices de suavizações (σ_i). Nota-se que, no intervalo de 2 a 6 para o índice i , os valores $\#E$ têm um comportamento aproximadamente constante e inferior aos outros valores calculados para as respectivas imagens. Este intervalo corresponde às imagens suavizadas com $\sigma_i = n_i \cdot k_0$, para $n_i \in \left[\frac{1}{5}, 1 \right]$.

O padrão constatado neste experimento é importante, pois o índice de suavização necessário ao método proposto deve encontrar um equilíbrio entre a minimização da taxa de ruído e a detecção de um número mínimo de estruturas espúrias, de forma a não gerar a pulverização das estruturas de interesse (seção 2.2).

Baseando-se no procedimento realizado e nos resultados obtidos para as 143 imagens utilizadas neste trabalho, com resultados indicados na figura 42, podem ser verificadas duas situações:

- 1 - A primeira é que o nível de suavização para essas imagens sempre gera uma queda considerável no número de estruturas detectadas para índices i maiores que 1. Isso faz sentido uma vez que o primeiro índice refere-se à imagem original.
- 2 A segunda situação é relacionada ao aumento no número de estruturas detectadas em função do aumento dos níveis de suavizações. Esse comportamento é esperado, uma vez que as estruturas passam a ser “pulverizadas” ou deterioradas com níveis mais acentuados de suavização (seção 2.2).

Com base nas situações indicadas optou-se em selecionar o valor de n_i no intervalo do quadro tracejado, indicado no gráfico da figura 42. Assim, o valor de sigma utilizado no processo de suavização foi definido como $\sigma = \frac{k_0}{3}$, sendo k_0 a taxa de ruído estimada para a imagem original, ou seja, $n_i = \frac{1}{3}$.

5.1.2 Parâmetros do índice espectral

Entre os índices indicados na seção 2.1, o que apresentou melhores resultados visuais para as regiões de cruzamento foi o construído com base no método proposto por Ruifrok e Johnston (2001), cujos detalhes da sua construção serão indicados a seguir.

A proposta nesse índice espectral é explorar algumas características das regiões de cruzamentos nas áreas rurais, tais como: maior presença de asfalto ou concreto, quando comparadas com outras regiões da uma imagem em área rural, e a menor presença de vegetação se comparada com a imagem mais abrangente.

Um exemplo dessas características relacionadas à resposta espectral pode ser verificado quando os histogramas de uma imagem mais abrangente, com suas várias feições indicados na figura 43(b), são comparados com os histogramas de uma região de cruzamento em uma área rural (figura 43(a)).

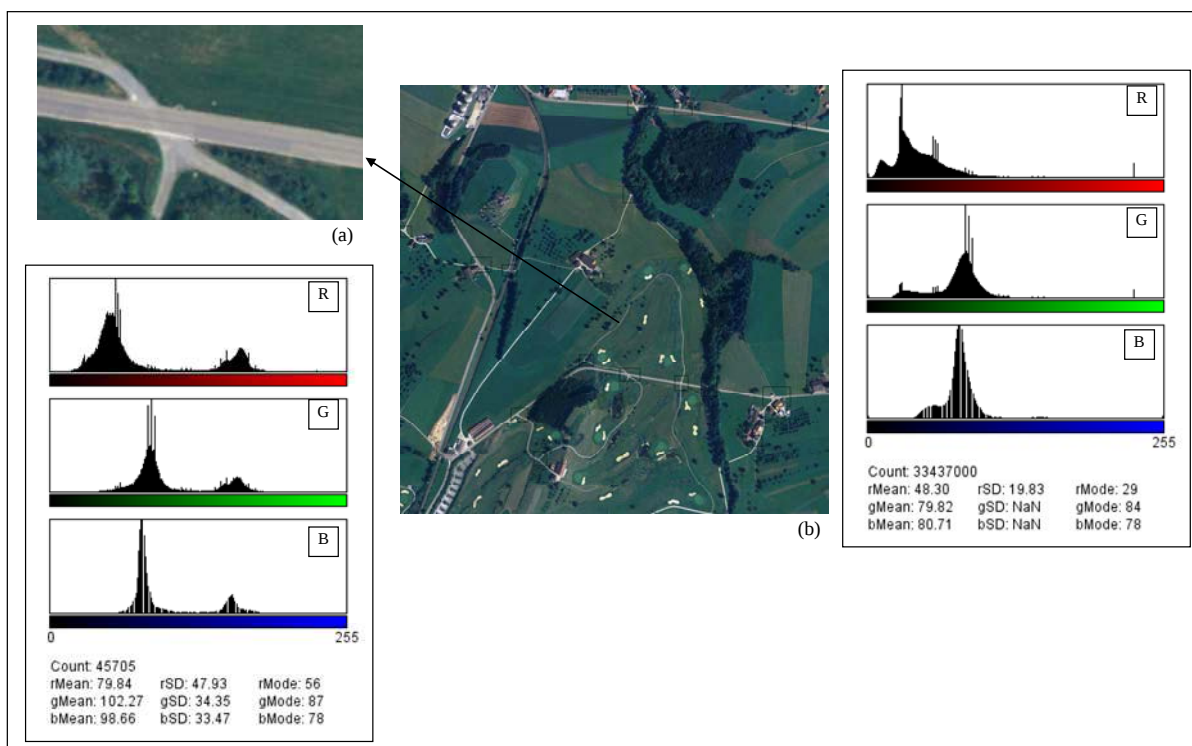


Figura 43 – Comparação dos histogramas da região de cruzamento com os histogramas da imagem mais abrangente para os canais RGB. (a) Região de cruzamento de rodovias com os seus histogramas para os canais RGB; (b) Imagem mais abrangente com seus respectivos histogramas nos canais RGB.

As características dos histogramas da região de cruzamento em área rural indicam a presença de feições artificiais, uma vez que a totalidade das feições presentes na região geralmente ocasiona ou dão origem a picos no histograma de forma separada. Situações que não ocorrem na imagem mais abrangente, como mostra a figura 43(b).

Os cruzamentos de rodovias em áreas rurais são elementos bem explícitos e geralmente seus histogramas são bi ou multimodais (um pico para elementos naturais e outros para feições antrópicas), de forma que a definição de um índice espectral eficiente para o problema em questão deva levar em consideração estas características das regiões de cruzamentos.

Para a formulação do índice são levadas em consideração as hipóteses para a região de cruzamento, tais como a presença de concreto e/ou de asfalto para a pavimentação e a presença de áreas verdes no entorno da região de cruzamento. Bowker (1985) caracteriza as refletâncias do concreto e do asfalto como diretamente dependentes do comprimento de onda no espectro visível. Desta forma, o índice deverá dar mais ênfase aos canais cuja

diferença entre o elemento cruzamento e o seu entorno seja a maior possível, conforme pode ser verificado na figura 44.

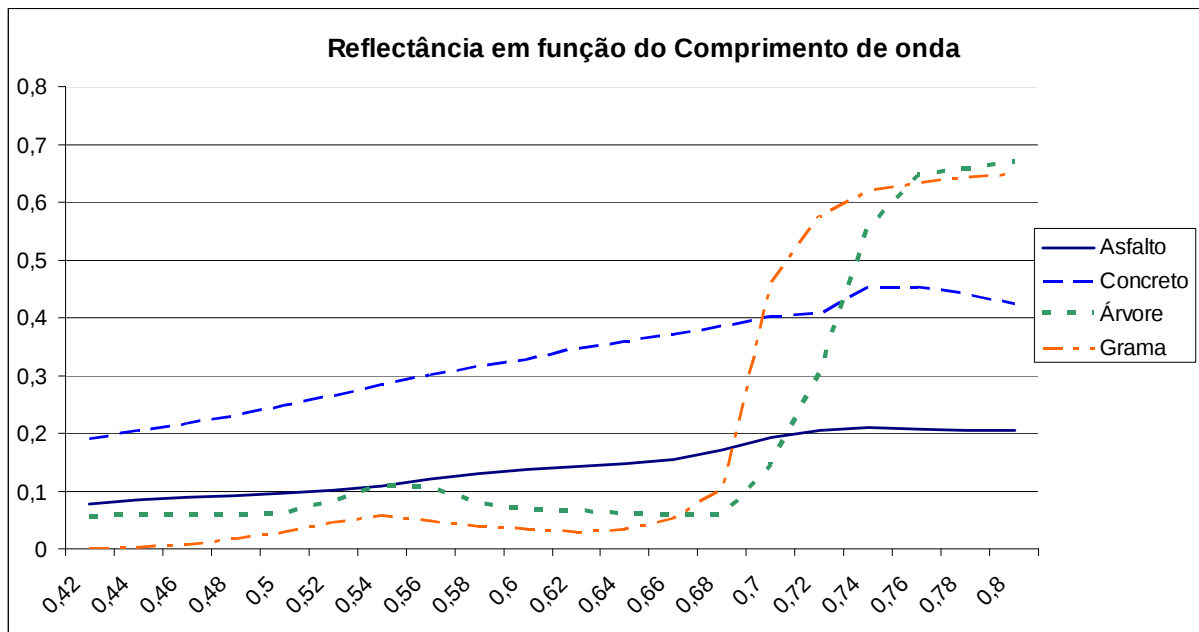


Figura 44 – Gráfico de refletância em função do comprimento de onda de alguns elementos que podem compor uma região de cruzamento. Fonte (BOWKER, 1985).

No intuito de verificar as hipóteses, utilizou-se uma amostra de possíveis elementos de uma região de cruzamento (figura 45(a)) que são áreas de vegetação rasteira (figura 45(b)), áreas com vegetação densa (figura 45(c)) e áreas de rodovias (figura 45(d)). Esses elementos foram utilizados como amostras para calcular o percentual de intensidade em cada um dos canais nas respectivas amostras, gerando um vetor de indicação de cores para cada uma delas.

Estes vetores agrupados formam a matriz de amostra de cores que é utilizada no processo de deconvolução de cores, aplicando o método de Ruifrok e Johnston (2001), explicitado na seção 2.1. A matriz criada para essa amostra é apresentada na figura 45(e).

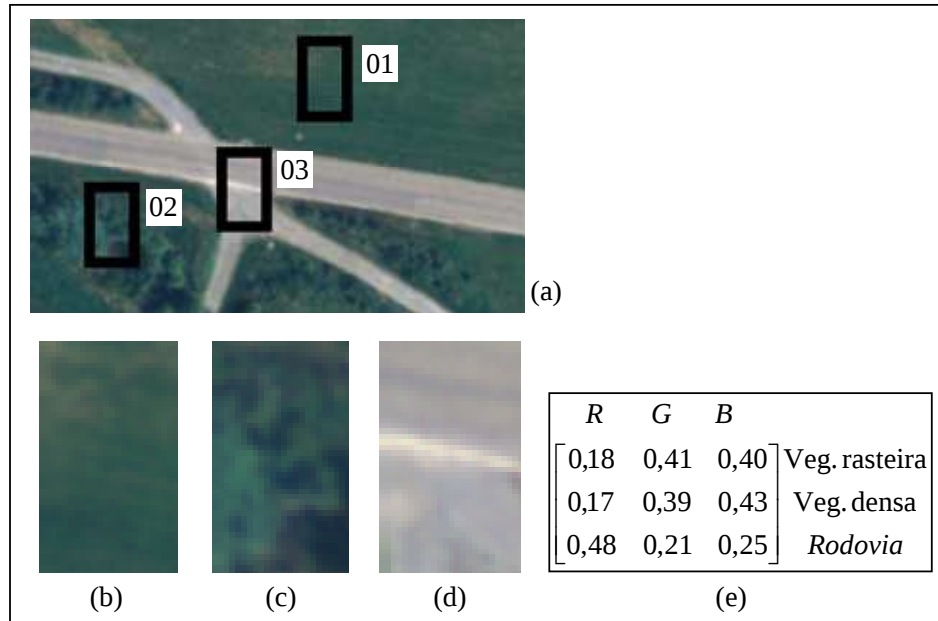


Figura 45 – (a) Região de cruzamento com suas respectivas amostras; (b) Amostra de região de vegetação rasteira – Quadro 01; (c) Amostra de região de vegetação densa – Quadro 02; (d) Amostra da região de rodovia – Quadro 03; (e) Matriz com vetores de indicações de cores para os elementos da região de cruzamento de rodovias.

Com base nos percentuais médios das intensidades dos pixels mostrados na matriz da figura 45(e), aplica-se o algoritmo de deconvolução de Ruifrok e Johnston (2001). As correspondentes equações das transformações lineares para os elementos: vegetação rasteira, vegetação densa e rodovias são indicadas a seguir (equação 57).

$$\begin{aligned}
 I_{(VEG_RASTEIRA)} &= 0,29979187R + 0,6828593G + 0,6662042B \\
 I_{(VEG_DENSE)} &= 0,2810397R + 0,6447382G + 0,7108652B \\
 I_{RODOVIA} &= 0,82684916R + 0,36174652G + 0,4306506B
 \end{aligned} \tag{57}$$

A aplicação desses índices é mostrada a título de exemplificação na figura 46. A figura 46(a) mostra o resultado para o índice de vegetação rasteira, a figura 46(b) para o índice de vegetação densa e por último a figura 46(c) mostra o resultado para o índice de rodovia.

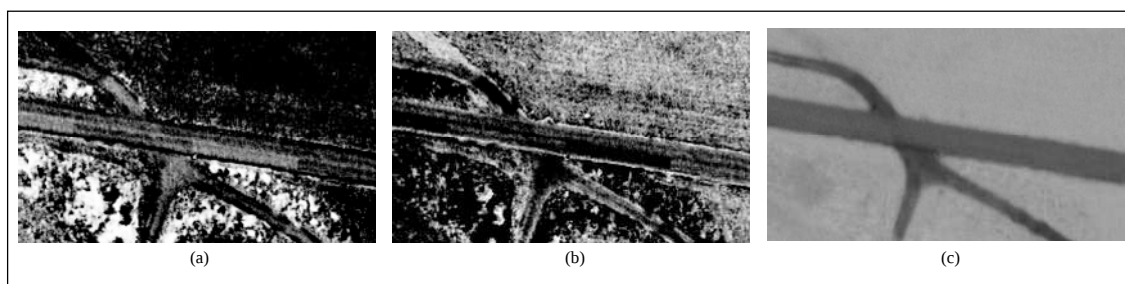


Figura 46 – Resultados do índice utilizado. (a) Vegetação rasteira; (b) Vegetação densa; (c) Rodovias.

Verificando o resultado apresentado na figura 46(c), que é a terceira resultante segundo o método de Ruifrok e Johnston (2001) e cujas matrizes foram calculadas segundo as amostras, percebe-se que o índice espectral para a região de cruzamento pode ser utilizado com uma eficiência satisfatória no método proposto de acordo com a avaliação experimental realizada nas próximas seções.

5.2 Experimentos para avaliação do método

Nesta seção serão apresentadas as avaliações realizadas para validar o método proposto. Para isto foram consideradas as imagens testes apresentadas no capítulo 4, sendo que os cruzamentos indicados nas imagens testes foram avaliados de forma individual.

Na avaliação proposta optou-se por categorizar os cruzamentos com extração insatisfatória se os mesmos apresentarem resultados inferiores a 80% para os critérios de completeza e correção. Este valor foi escolhido com base nos critérios adotados por Mayer et al. (2006) (Projeto EuroSRD) que utiliza as mesmas imagens para avaliar métodos de extração da malha viária, mas considera resultados satisfatórios para completeza superior a 60% e correção superior a 75%.

As próximas subseções serão destinadas para apresentação e discussão das avaliações realizadas nas imagens testes indicadas no capítulo 04, com indicação de seus respectivos cruzamentos de rodovias.

5.2.1 Imagem teste 01

Os cruzamentos selecionados para a imagem teste 01 (ADS1) estão discriminados na figura 47 com seus respectivos números. Estes cruzamentos foram processados individualmente segundo o método proposto no capítulo 3, e foram avaliados numericamente baseando-se nos critérios indicados no capítulo 4 (equações 52 a 55). Os resultados para esta avaliação em cada um dos cruzamentos estão na tabela 07.

Os resultados para a completeza global e correção global, segundo equações 54 e 55, para os 14 cruzamentos extraídos da imagem teste 01 são 92% e 93%, respectivamente.

Tabela 07 – Indicadores de Qualidade para os Cruzamentos da Imagem Teste 01

Cruzamento	A_R	A_E	$A_{E \cap R}$	Completeza	Correção
01	11914	9979	9811	82%	98%
02	31214	30837	30503	98%	99%
03	7285	6812	6518	89%	96%
04	4396	1898	1696	39%	89%
05	3769	3860	3742	99%	97%
06	4400	3275	3041	69%	93%
07	15276	14504	14081	92%	97%
08	2778	3163	2567	92%	81%
09	10540	10633	10225	97%	96%
10	7017	7426	7001	100%	94%
11	-----	-----	-----	-----	-----
12	3600	4040	3513	98%	87%
13	8453	8934	8413	100%	94%
14	5010	4998	4611	92%	92%
15	12257	15982	12180	99%	76%
Resultados Globais				92%	93%

Segundo a classificação para tipos de cruzamentos (figura 03), encontrados na figura 47, existem quatro simples do tipo em X (cruzamentos 03, 04, 10 e 11) e cinco simples em forma de Y (cruzamentos 06, 08, 12, 13 e 14). Os cruzamentos 01, 02, 07, 09 e 15 são definidos como complexos de primeira classe enquanto o cruzamento 05 é do tipo complexo de segunda classe, pois tem a presença de ilha.

No experimento utilizando a imagem teste 01 apenas o cruzamento número 11 não foi extraído, sendo considerado como uma falha total do método proposto que não foi considerada nas estatísticas globais para a imagem. Esta falha no processo de extração ocorre por falta do sinal de rodovia na região de cruzamento, uma vez que o mesmo está totalmente coberto pela sombra de árvores.

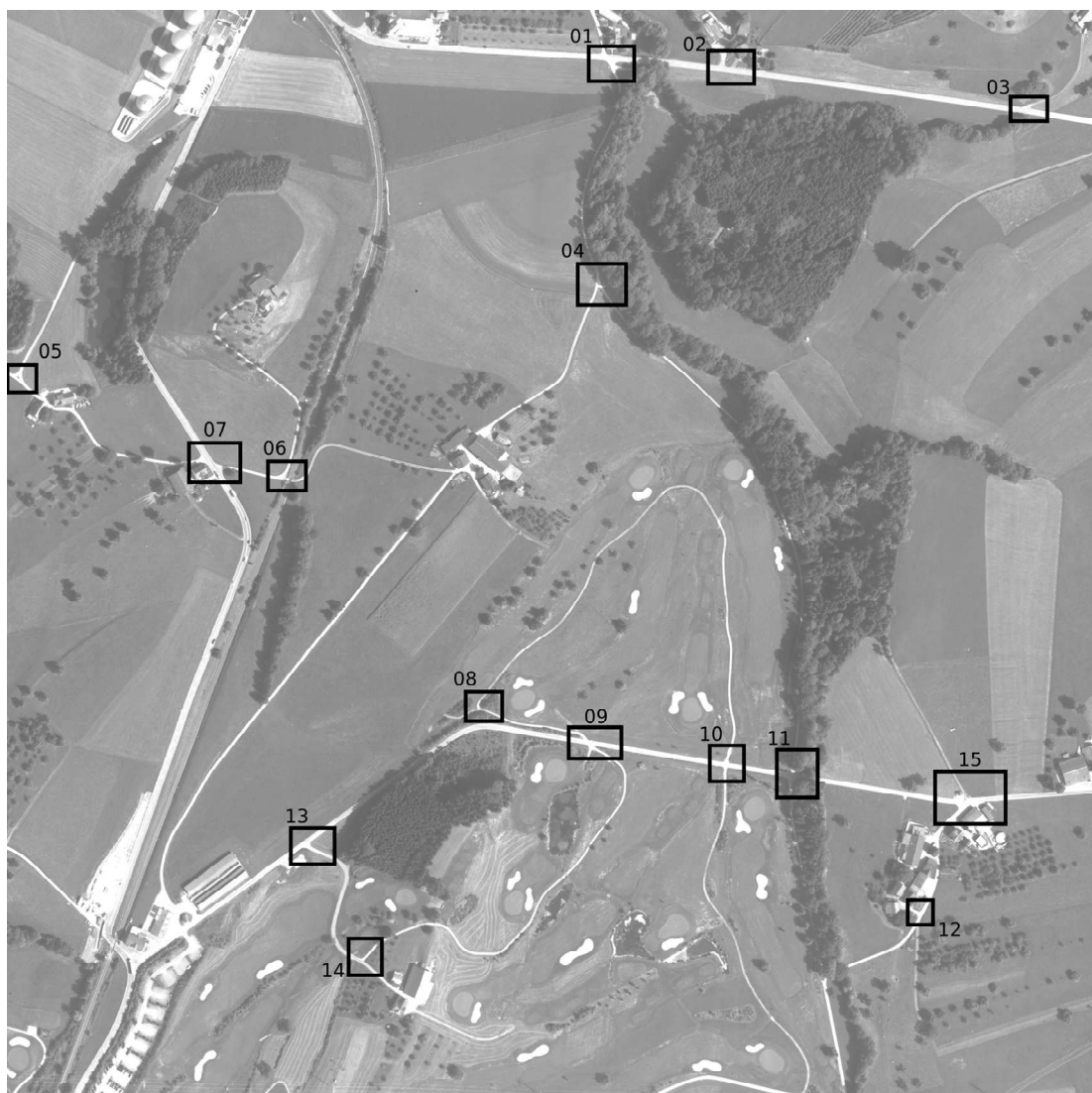


Figura 47 – Imagem teste 01 (ADS1) – 15 cruzamentos selecionados.

Dois cruzamentos da imagem teste 01 apresentaram problema de extração no experimento realizado com relação ao critério completeza, com resultados inferiores a 80% nesse critério. Estes são os cruzamentos 04 (figura 48(a)) e 06 (figura 48(b)) com os resultados da extração sobrepostos à imagem original.

O problema na extração do cruzamento 04, indicado na figura 48(a), é referente à grande presença de sombra projetada sobre a rodovia que impede a extração dos braços do cruzamento.

No cruzamento 06 (figura 48(b)) o problema está na presença de uma linha férrea que perturbou a resposta espectral na etapa de pré-processamento, como pode ser visto na figura 48(c) que apresenta a imagem binária e seu respectivo esqueleto. Nesta imagem, a filtragem topológica não detectou a parte da rodovia indicada em tracejado na figura 48(c) como pertencente ao cruzamento.

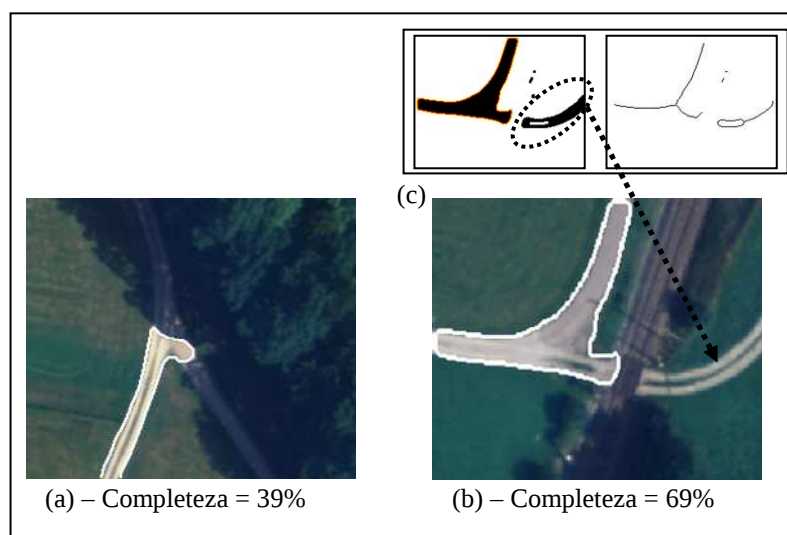


Figura 48 – Resultado da Extração para os cruzamentos inferior a 80%. (a) Cruzamento 04; (b) Cruzamentos 06; (c) Etapas de pré-processamento.

Com relação ao critério de correção, apenas o cruzamento 15 (figura 49) da imagem teste 01 obteve resultado insatisfatório. O problema na extração desse cruzamento foi causado na etapa de segmentação que não separou o cruzamento da residência presente no seu entorno, como indica a figura 49.

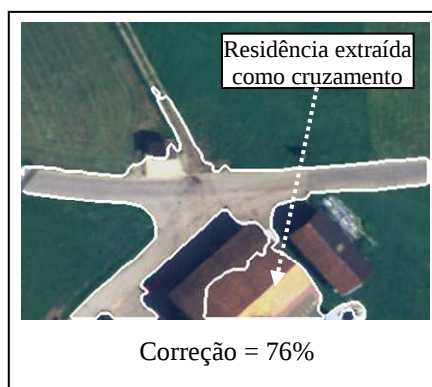


Figura 49 – Resultado da extração para o cruzamento 15, cuja correção foi inferior a 80%.

Segundo Ravanbakhsh et al. (2008), a maioria dos processos de extração de segmentos de rodovias necessitam de uma definição da largura das rodovias que serão extraídas. Esta informação é indicada na forma de um parâmetro nos algoritmos de extração. Como a maioria dos métodos utilizados nas extrações de cruzamentos de rodovias primeiro extrai os segmentos de rodovias que são os ramos que compõem os cruzamentos, a diferença de largura ou do tipo de rodovia (principal ou secundária) acaba sendo um elemento dificultador do processo por causa das parametrizações das larguras.

Nesse sentido, os cruzamentos 09 (figura 50(a)) e 10 (figura 50(b)), da imagem teste 01 merecem atenção, uma vez que ambos apresentam resultados satisfatórios mesmo diante das diferenças das larguras e dos tipos de rodovias que compõem os cruzamentos.

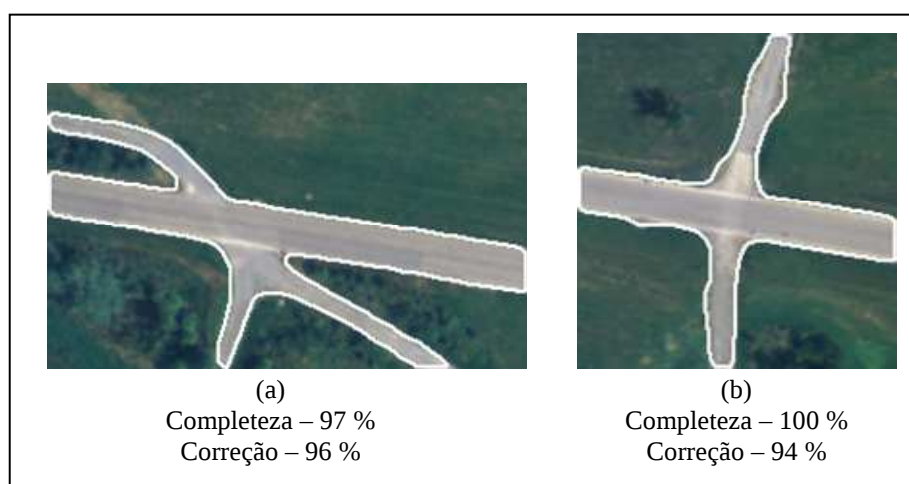


Figura 50 – Exemplo de Resultados satisfatórios para cruzamentos da imagem teste 01. (a) Cruzamento 09; (b) Cruzamento 10.

A extração do cruzamento 05, definido como complexo de segunda classe (cruzamentos com presenças de ilhas), é um exemplo importante para mostrar a robustez do método proposto. Este exemplo tem a presença de elementos que dificultam a resposta espectral como, por exemplo, o interior da ilha que não está bem definida e a presença de manchas sobre a rodovia. No entanto, o cruzamento foi extraído de forma satisfatória com 99% de completeza e 97% de correção, como pode ser verificado na figura 51.



Figura 51 – Exemplo do resultado da extração de um cruzamento complexo com a presença de ilha. Imagem teste 01 – Cruzamento 05.

5.2.2 Imagem teste 02

A imagem teste 02 apresenta um total de 19 cruzamentos que estão indicados na figura 52, com os resultados individuais dos cruzamentos indicados na tabela 08 segundo os critérios de completeza e correção.

Os cruzamentos selecionados para a imagem teste 02 (figura 52) estão indicados com quadros e os seus respectivos números. Nesta imagem teste, os resultados globais com relação aos critérios de completeza e correção são respectivamente 88% e 92%.

Tabela 08 – Indicadores de Qualidade para os Cruzamentos da Imagem Teste 02

Cruzamento	A_R	A_E	$A_{E \cap R}$	Completeza	Correção
01	4284	5070	3681	86%	73%
02	6741	6878	6532	97%	95%
03	22193	21242	20060	90%	94%
04	6159	6222	5998	97%	96%
05	19504	19321	18766	96%	97%
06	4866	4449	4248	87%	95%
07	4412	4819	4408	100%	91%
08	5675	5946	5361	94%	90%
09	5635	5488	5207	92%	95%
10	14738	14790	14253	97%	96%
11	20732	20757	19854	96%	96%
12	3811	4209	2681	70%	64%
13	7848	5132	5045	64%	98%
14	6559	6104	5587	85%	92%
15	6540	7346	6527	100%	89%
16	7989	4727	4596	58%	97%
17	13296	8558	7797	59%	91%
18	26779	26825	24641	92%	92%
19	16162	16731	14076	87%	84%
Resultados Globais				88%	92%

A imagem teste 02 apresenta treze cruzamentos classificados como simples, que são subdivididos em quatro cruzamentos na forma de X (cruzamentos 08, 12, 13 e 16) e nove cruzamentos na forma de Y (cruzamentos 01, 02, 04, 06, 07, 09, 10, 14 e 15). Os cruzamentos classificados como complexos de primeira classe nessa imagem são os de números 03, 05, 11, 17, 18 e 19, salientando que nenhum cruzamento foi classificado como complexo de segunda classe nessa imagem.



Figura 52 – Imagem teste 02 (ADS2) – 19 cruzamentos selecionados.

Entre os cruzamentos extraídos nessa imagem, quatro foram classificados como insatisfatório (inferior a 80%) para o critério completeza e dois cruzamentos apresentaram resultados insatisfatórios (inferior a 80%) para o critério correção.

Os cruzamentos que apresentaram resultados insatisfatórios para o critério completeza foram os cruzamentos 12, 13, 16 e 17, discutidos a seguir. O cruzamento 12 será discutido junto com o cruzamento 01 por contemplar problemas de completeza e de correção.

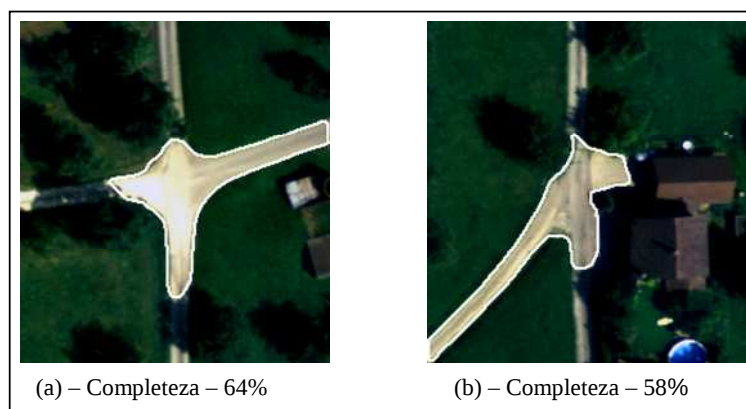


Figura 53 – Resultados das Extrações dos cruzamentos sobrepostos sobre as imagens originais. (a) cruzamento 13; (b) cruzamento 16.

Os cruzamentos 13 (figura 53(a)) e 16 (figura 53(b)) apresentam o mesmo problema, com extrações insatisfatórias para o critério completeza. Em ambos os cruzamentos existe uma sobreposição excessiva de sombras sobre os leitos das rodovias que formam os cruzamentos, como pode ser verificado nas figuras 53(a) e 53(b) que mostram os resultados das extrações plotados sobre as imagens originais.

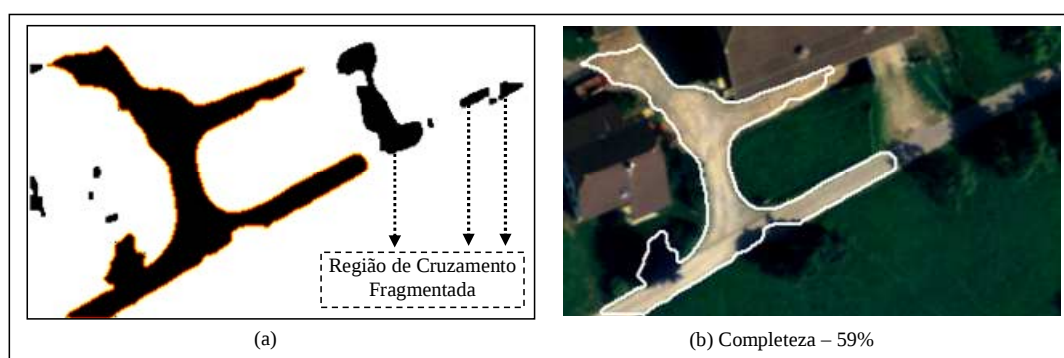


Figura 54 – Exemplo de resultado da extração insatisfatória para completeza. (a) Resultado da segmentação e do delineamento; (b) Sobreposição do cruzamento extraído sobre imagem original para o cruzamento 17.

O resultado da extração para o cruzamento 17 (figura 54(b)) também é considerado insatisfatório, demonstrando um exemplo de problema do método quando a estrutura que representa o cruzamento fica fragmentada no final da etapa de pré-processamento. Essa fragmentação da estrutura, bem como as outras feições que podem estar adjacentes à região de cruzamento, modifica o resultado da extração porque são tratadas como

estruturas espúrias, embora possa haver partes do cruzamento entre elas como verificado na figura 54(a).

Resultados insatisfatórios quanto à correção foram constatados nesse experimento nos cruzamentos 01(figura 55(a)) e 12 (figura 55 (b)), sendo que ambos apresentam como mesmo problema a presença de solo exposto adjacente à rodovia. Esta situação não permite que a estrutura que representa o solo exposto seja separada da estrutura que representa o cruzamento na filtragem topológica.

Tal situação pode ser verificada nas figuras 55(c – d) que representam os resultados dos pré-processamentos e os delineamentos dos cruzamentos nas respectivas regiões. Nesse exemplo é possível verificar as estruturas espúrias que estão disjuntas das estruturas que representam o cruzamento, bem como aquelas que não estão disjuntas e, portanto, não puderam ser separadas.

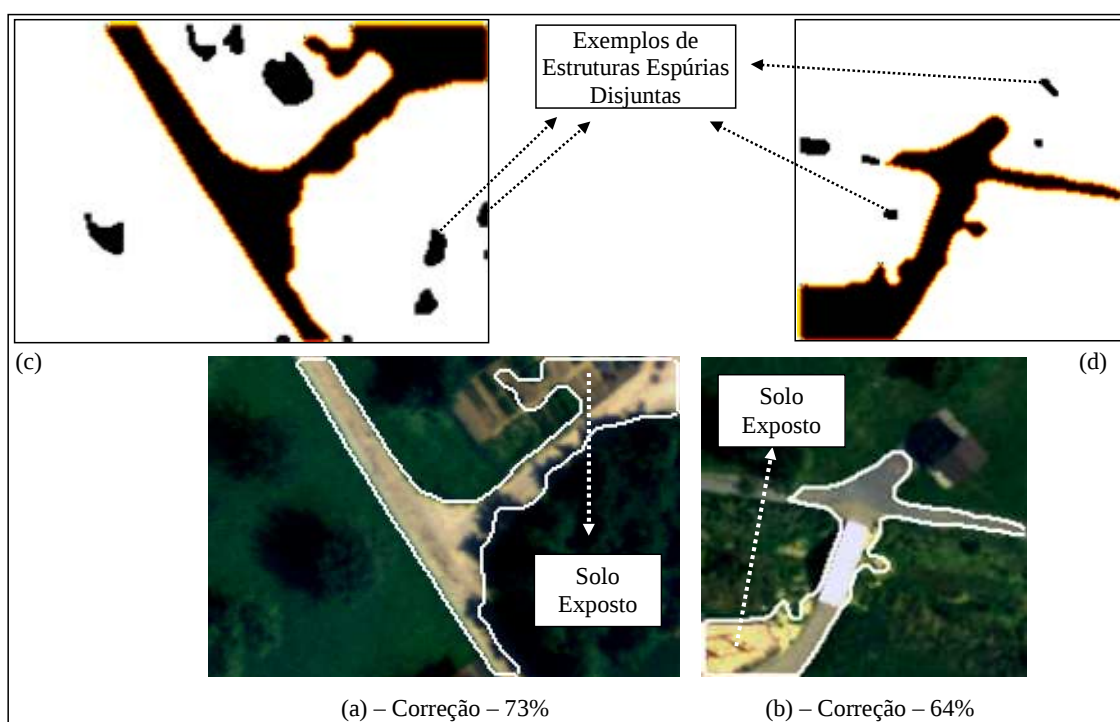


Figura 55 – Cruzamentos 01 e 12. (a – b) Resultados das Extrações plotados sobre as imagens originais; (c – d) Resultados do pré-processamentos e delineamentos dos cruzamentos com exemplos de estruturas espúrias.

Na prática, um dos pontos chaves do método proposto para obter sucesso na extração é o isolamento da estrutura que representa o cruzamento das estruturas espúrias, o que pode ser verificado nos exemplos da figura 55 que mostra a necessidade desse isolamento

(figuras 55(c – d)). Neste exemplo, os cruzamentos não puderam ser isolados das áreas de solo expostos porque elas estavam adjacentes às rodovias que compõem o cruzamento.

Segundo Ravanbakhsh et al. (2008) a maioria dos métodos utilizados para extração de cruzamentos de rodovias realizam primeiro a extração dos segmentos de rodovias (DAL POZ et al., 2006), para depois realizar o delineamento da região de cruzamento. Assim, distúrbios causados pelas respectivas sombras das árvores e edificações, o baixo contraste entre rodovias e seus entorno, além de veículos sobre as rodovias são as principais razões para as falhas na extração dos segmentos e, conseqüentemente, da não extração dos cruzamentos.

Nesse sentido, a imagem teste 02 tem alguns cruzamentos que merecem atenção devido aos resultados favoráveis para a extração de cruzamentos. Estes resultados mostram a robustez e a flexibilidade do método proposto frente aos problemas mencionados anteriormente.

Os cruzamentos 03 (figura 56(a)) e 05 (figura 56(b)) são exemplos de resultados satisfatórios que superaram os problemas clássicos encontrados na literatura. As figuras 56 (a – b) apresentam exemplos de um veículo (figura 56(a)) sobre o leito da rodovia e sombras sobre uma das bordas perturbando a resposta espectral. No entanto, esses problemas foram contornados pelo método devido à característica do algoritmo de delineamento utilizado.

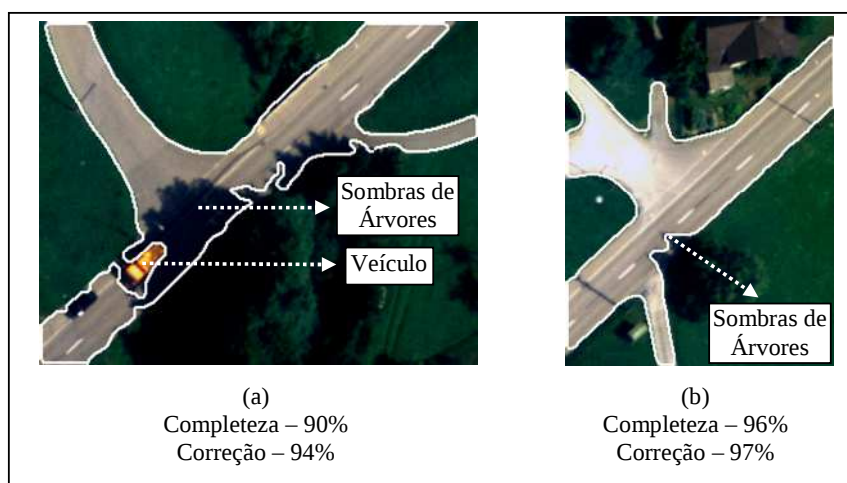


Figura 56 – Resultado da extração dos cruzamentos frente a problemas comuns, sobrepostos sobre as imagens originais. (a) Cruzamento 03; (b) Cruzamento 05.

Os cruzamentos 10 (figura 57(a)) e 11(figura 57(b)) são exemplos da robustez do método frente aos problemas de cruzamentos formados por rodovias com larguras diferentes e com faixas de sinalização, no caso das imagens de alta resolução.



Figura 57 – Resultados da extração sobrepostos sobre as imagens originais. (a) Cruzamento10; (b) Cruzamento 11.

5.2.3 Imagem teste 03

Neste experimento, a imagem utilizada (GSD $\sim 50\text{cm}$) tem um total de 30 cruzamentos selecionados. Estes cruzamentos estão indicados na figura 5.12 que mostra todos os cruzamentos com seus respectivos números.

Dentre os 30 cruzamentos indicados na figura 58 existem 20 classificados como simples, dos quais 4 são simples do tipo X (cruzamentos 12, 14, 20 e 21) e 16 são do tipo Y (cruzamentos 02, 03, 05, 08, 09, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 19, 23, 24, 25 e 28). Os 10 cruzamentos restantes foram classificados como complexos, sendo 8 de primeira classe (cruzamentos 01, 04, 06, 07, 26, 27, 29 e 30) e dois de segunda classe (cruzamentos 13 e 22).

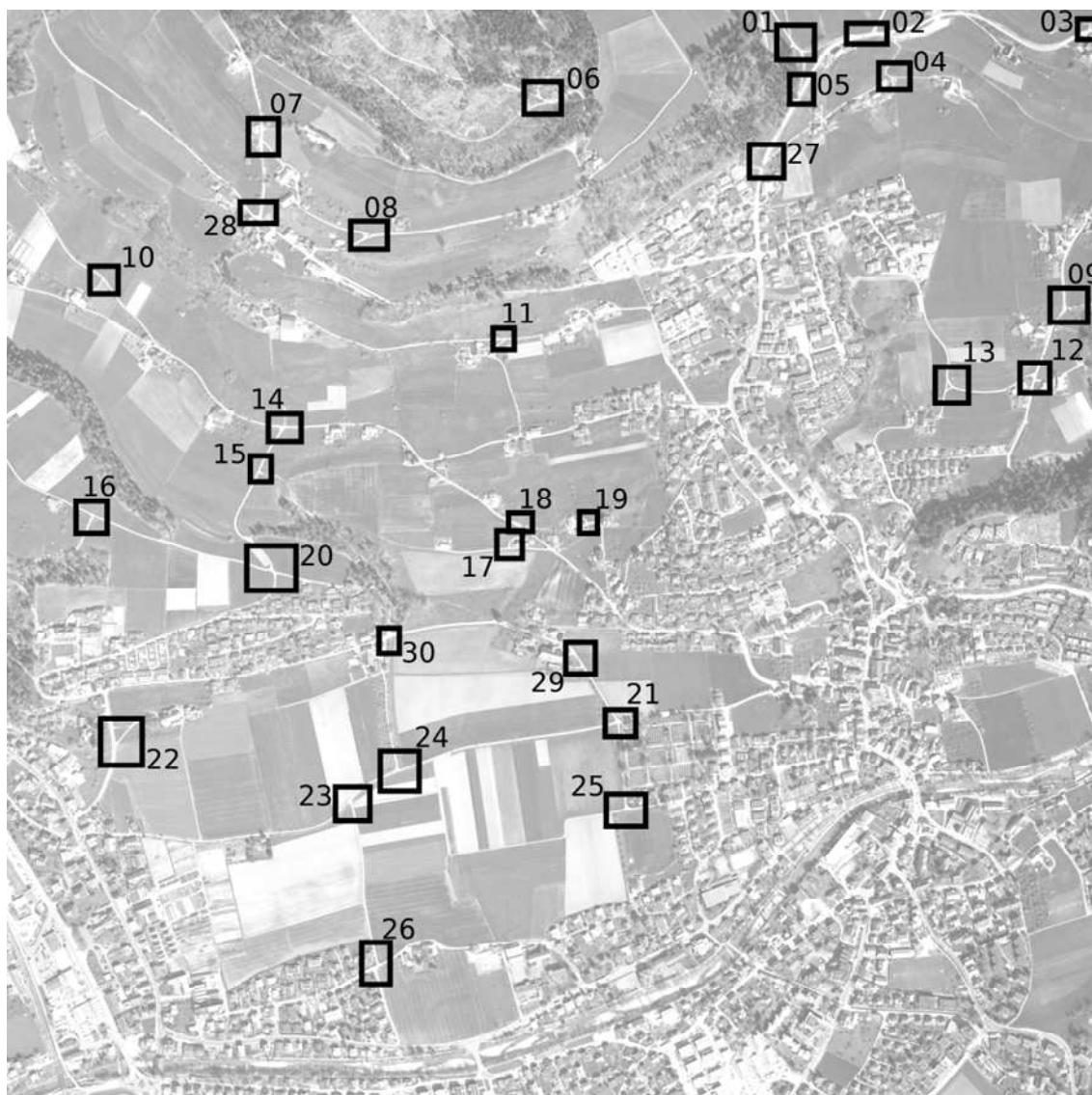


Figura 58 – Imagem teste 03 (Aerial_1) – 30 cruzamentos selecionados.

Os resultados globais para os trinta cruzamentos selecionados e processados nessa imagem teste apresentaram uma completeza global de 92% e uma correção global de 89%.

Os valores obtidos para a completeza e a correção individual de cada cruzamento, com exceção do cruzamento 23 que não foi extraído, estão indicados na tabela 09.

Tabela 09 – Indicadores de Qualidade para os Cruzamentos da Imagem Teste 03

Cruzamento	A_R	A_E	$A_{E \cap R}$	Completeza	Correção
01	1770	1800	1500	85%	83%
02	2877	3127	2842	99%	91%
03	1668	1808	1489	89%	82%
04	1074	1071	931	87%	87%
05	1901	1930	1712	90%	89%
06	1376	1491	1165	85%	78%
07	2023	2380	1737	86%	73%
08	1424	1456	1217	85%	84%
09	1590	1617	1469	92%	91%
10	1042	969	884	85%	91%
11	730	809	687	94%	85%
12	1869	1601	1511	81%	94%
13	1399	1419	1372	98%	97%
14	1397	1351	1316	94%	97%
15	881	937	831	94%	89%
16	1077	1153	1071	99%	93%
17	877	841	820	94%	98%
18	728	845	698	96%	83%
19	615	634	581	94%	92%
20	2259	2464	2210	98%	90%
21	1384	1086	1016	73%	94%
22	3407	3271	3094	91%	95%
23	-----	-----	-----	-----	-----
24	1351	1486	1301	96%	88%
25	1139	1291	1112	98%	86%
26	1994	2045	1894	95%	93%
27	2506	2555	2403	96%	94%
28	1564	1651	1515	97%	92%
29	1293	1388	1251	97%	90%
30	1236	1193	1083	88%	91%
Resultados Globais				92%	89%

Considerando os critérios apresentados no início deste capítulo para definir uma extração como satisfatória ou não (satisfatórios são resultados superiores a 80%), esta imagem teste apresentou problemas para completeza somente no cruzamento 21 e problemas de correção nos cruzamentos 06 e 07.

O cruzamento 21 (figura 59) não foi extraído satisfatoriamente tendo em vista o critério completeza, pois um dos ramos ou braços da rodovia que compõe o cruzamento na forma de X não foi extraído. Conforme pode ser verificado na figura 59, a falha foi gerada pela sombra sobreposta sobre todo o leito da rodovia.

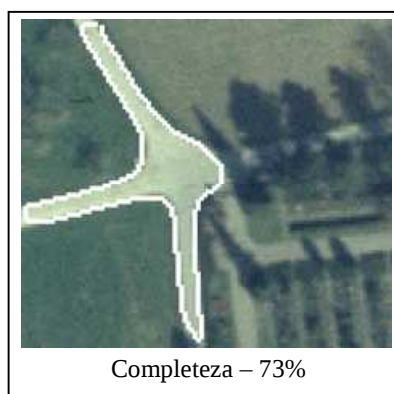


Figura 59 – Resultado da extração do cruzamento 21, sobreposto sobre a imagem original.

Os cruzamentos 06 (figura 60(a)) e 07 (figura 60(b)) são situações que apresentam resultados insatisfatórios no que se refere à correção. O problema de extração no cruzamento 06 é explicado pela má definição das bordas das rodovias que compõem o cruzamento. Este problema é gerado pelo baixo contraste entre a rodovia e seu entorno, conforme indica a figura 60(a) que apresenta o resultado da extração plotado sobre a imagem original.

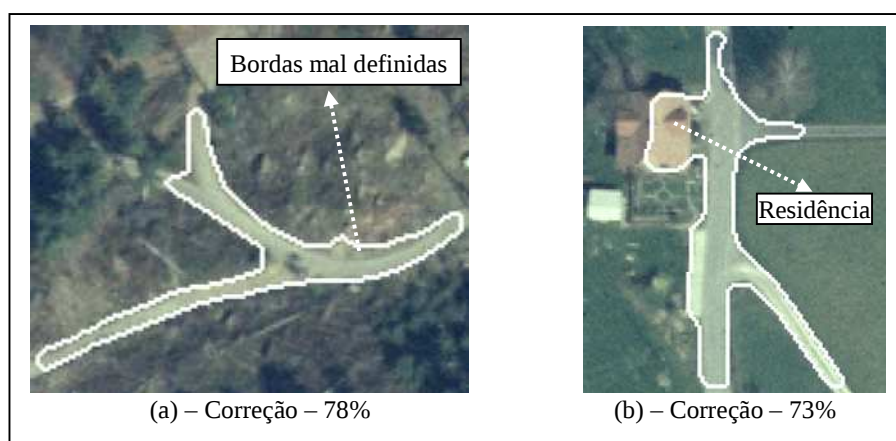


Figura 60 – Resultado da extração para cruzamentos que apresentaram problemas de correção na imagem teste 03; (a) Cruzamento 06; (b) Cruzamento 07.

O cruzamento 07 (figura 60(b)) tem problema de extração no critério correção gerado pela presença de uma residência na adjacência do cruzamento. Esta estrutura não foi separada na etapa de pré-processamento e foi indicada como parte do cruzamento de forma equivocada, indicando um falso positivo.

Por outro lado, os cruzamentos 13 (figura 61(a)) e 22 (figura 61(b)) são exemplos nesse experimento que merecem destaque por apresentarem bons resultados, mesmo sendo cruzamentos complexos de segunda classe. O destaque é devido à presença de ilhas que sempre geram dificuldades adicionais aos métodos de extração de cruzamentos de rodovias.

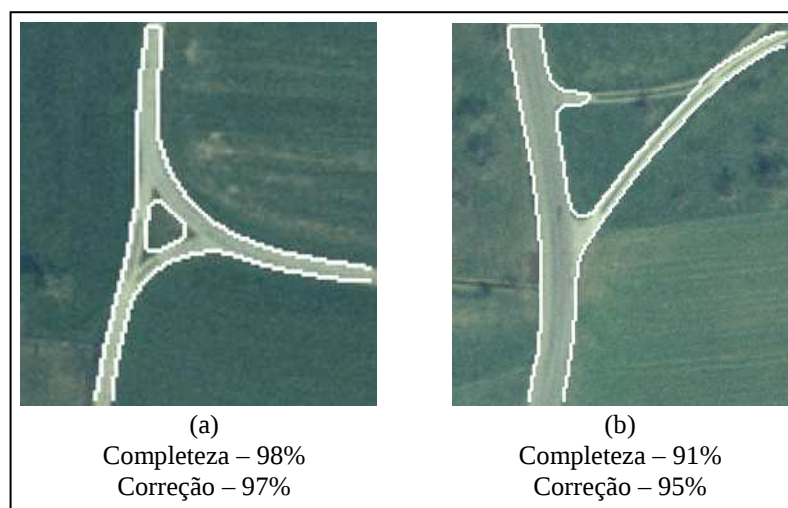


Figura 61 – Resultados para Extração de cruzamentos complexos de segunda classe. (a) Cruzamento 13; (b) Cruzamento 22.

Estes exemplos são importantes, pois mostram que o método proposto realiza a extração de cruzamentos simples e complexos sem a necessidade de uma classificação prévia do tipo de cruzamento.

O cruzamento 13 (figura 61(a)) obteve um resultado satisfatório para ambos os critérios, além de realizar a extração completa da ilha no seu interior. No caso do cruzamento 22 (figura 61(b)), o resultado também foi considerado satisfatório mesmo não realizando a extração completa da ilha. Esta situação mostra a robustez do método pelo fato de não exigir procedimentos diferentes para extração de cruzamentos simples e complexos.

Os cruzamentos 20 (figura 62(a)) e 23 (figura 62(d)) são situações que mostram a dependência que o método tem da etapa de pré-processamento. Para o caso do cruzamento 20, no qual a etapa de pré-processamento foi capaz de separar as estruturas na região de cruzamento (figura 62(a)), o resultado da extração foi superior a 90% para os dois critérios (figura 62(c)).

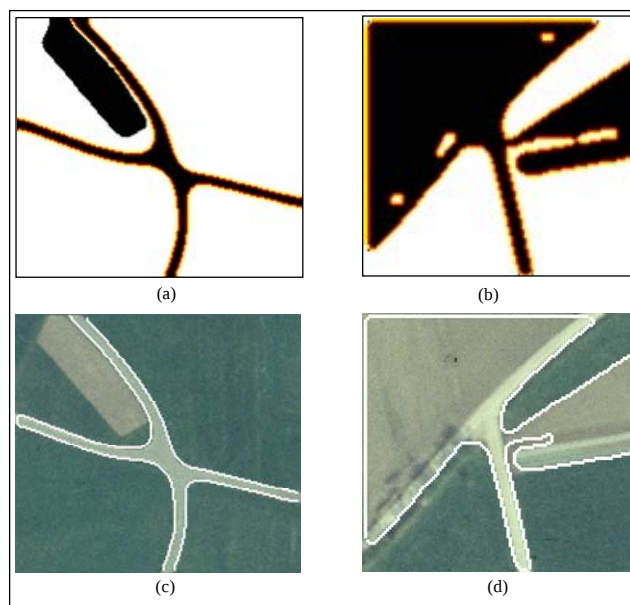


Figura 62 – Exemplo da importância do pré-processamento. (a – b) Resultados dos pré-processamentos e delineamentos para os cruzamentos 20 e 23; (c) Resultado da extração plotado sobre imagem original do cruzamento 20; (d) Falha total para o cruzamento 23.

Por outro lado, o pré-processamento falhou na tarefa de separar as estruturas na região do cruzamento 23 (figura 62(b)), gerando uma falha total no método proposto como indica a figura 62(d).

Estes exemplos mostram que se a etapa de pré-processamento gerar uma imagem com a estrutura que representa a região de cruzamento isolada, as etapas seguintes (filtragem topologia e delineamento) completam o processo de extração satisfatoriamente.

A figura 63 (cruzamentos 25 e 26) mostra um exemplo da importância da etapa de pré-processamento (figura 63(c-d)) realizada com sucesso, uma vez que as estruturas espúrias estão isoladas da estrutura que representa o cruzamento.

Dessa forma as etapas seguintes de filtragem topológica e delineamento também terão sucesso, como é possível verificar no êxito da filtragem topológica que detecta a estrutura que representa o cruzamento na figura 63(c-d). O resultado final também é satisfatório com a aplicação do algoritmo de delineamento apresentado na figura 63(a-b), que tem os cruzamentos extraídos sobrepostos sobre a imagem original.

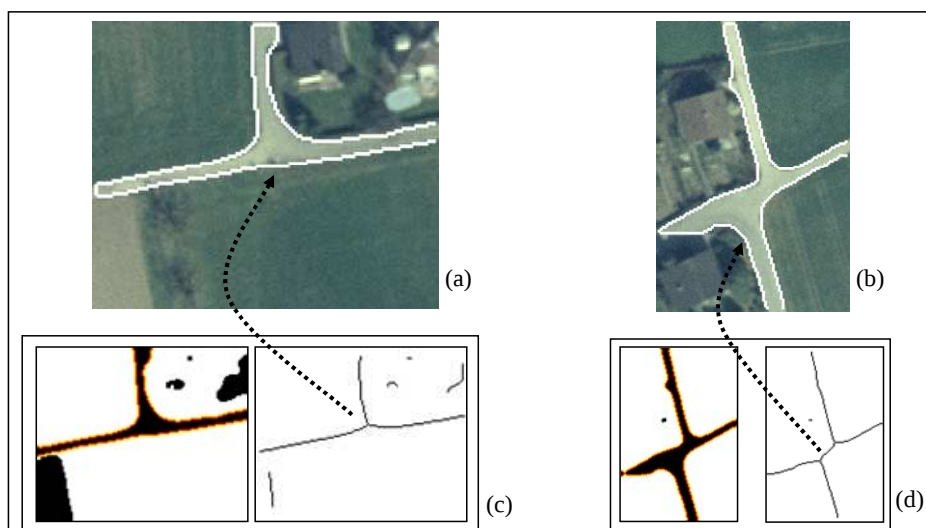


Figura 63 – Resultado da extração para os cruzamentos 25 e 26. (a) Resultado sobreposto sobre imagens original do cruzamento 25; (b) Resultado sobreposto sobre imagem original do cruzamento 26; (c – d) Resultados do pré-processamentos com esqueletos e cruzamentos delineados.

5.2.4 Imagem teste 04

Conforme mostra a figura 64, foram selecionados 40 cruzamentos na imagem teste 04, a qual tem as mesmas características daquela utilizada no experimento anterior.

Os cruzamentos que aparecem nessa imagem são de maioria simples e na forma de Y, ressaltando que apenas o cruzamento 23 foi identificado como simples na forma de X e os sete demais cruzamentos são classificados como complexos. Dentre os cruzamentos complexos, 4 são de primeira classe (cruzamentos 16, 17, 36 e 37) e 3 são cruzamentos complexos de segunda classe (cruzamentos 11, 12 e 27).

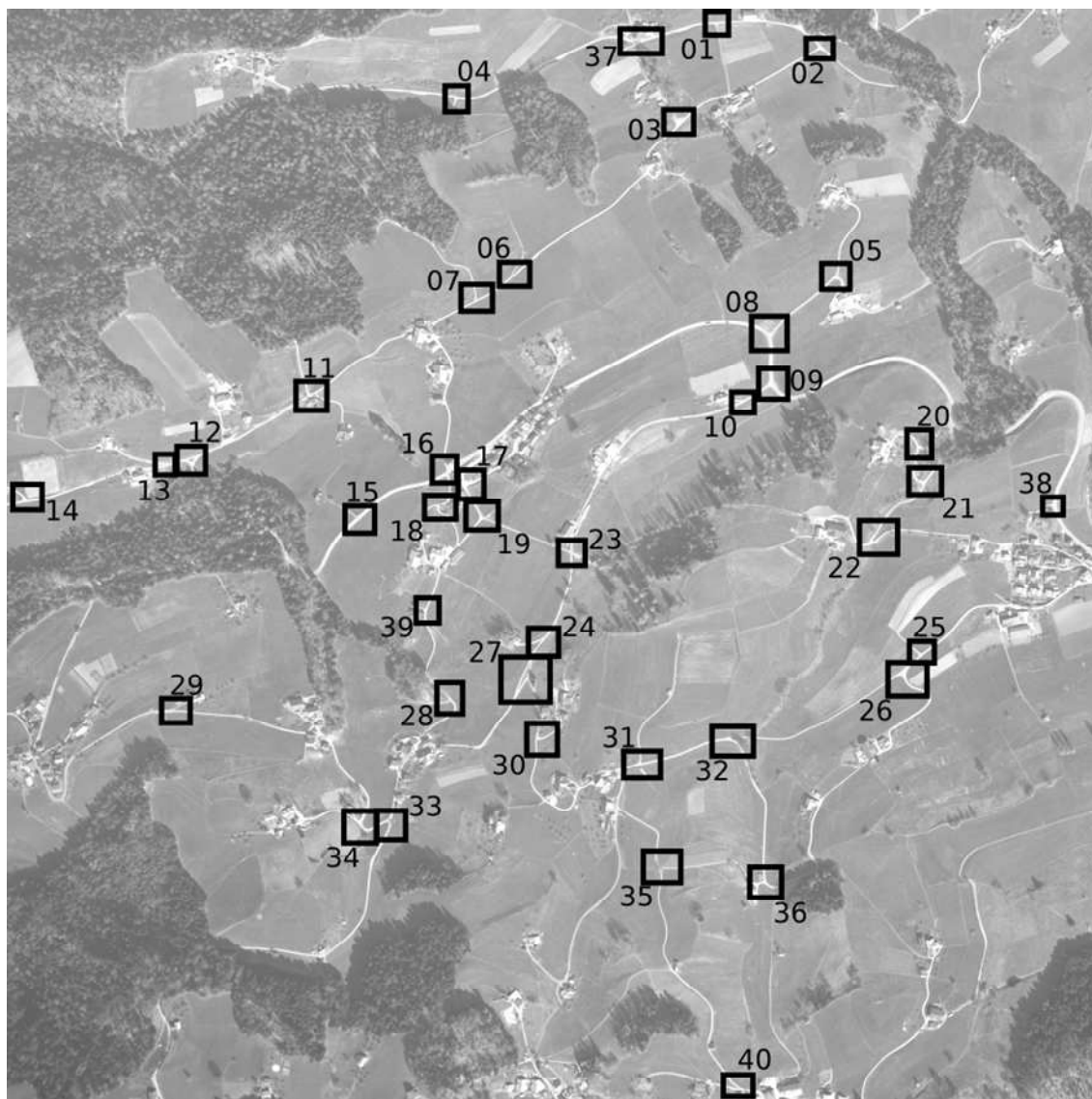


Figura 64 – Imagem teste 04 (Aerial_2) – 40 cruzamentos selecionados.

Os indicadores globais de qualidade para a imagem teste 04 são 92% para a completeza e 90% para a correção. Os resultados individuais para a completeza e a correção dos 40 cruzamentos estão discriminados na tabela 10.

Os cruzamentos 04 e 32 apresentaram problema de extração no que se refere à completeza, enquanto os cruzamentos 03, 13, 23 e 37 obtiveram resultados para a extração, que foram considerados insatisfatórios em relação à correção.

Tabela 10 – Indicadores de Qualidade para os Cruzamentos da Imagem Teste 04

Cruzamento	A_R	A_E	$A_{E \cap R}$	Completeza	Correção
01	718	753	695	97%	92%
02	1095	1142	1004	92%	88%
03	1131	1282	994	88%	78%
04	821	681	641	78%	94%
05	1315	1344	1266	96%	94%
06	975	1158	963	99%	83%
07	1024	1046	1012	99%	97%
08	2271	2352	2221	98%	94%
09	2473	2543	2408	97%	95%
10	737	800	729	99%	91%
11	1400	1391	1149	82%	83%
12	1540	1359	1291	84%	95%
13	724	910	680	94%	75%
14	1091	1163	1037	95%	89%
15	1766	1734	1639	93%	95%
16	1941	1974	1718	89%	87%
17	1859	1967	1735	93%	88%
18	1097	1064	996	91%	94%
19	1197	1130	1102	92%	98%
20	823	778	753	91%	97%
21	1218	1259	1208	99%	96%
22	1467	1451	1416	97%	98%
23	1095	1427	1058	97%	74%
24	1234	1279	1154	94%	90%
25	802	884	790	99%	89%
26	1618	1784	1606	99%	90%
27	2694	2585	2309	86%	89%
28	980	861	816	83%	95%
29	1164	1295	1080	93%	83%
30	1082	1095	1060	98%	97%
31	994	1071	982	99%	92%
32	1275	979	868	68%	89%
33	1267	1287	1249	99%	97%
34	1618	1671	1590	98%	95%
35	1061	1013	934	88%	92%
36	1407	1368	1317	94%	96%
37	2265	2762	2073	92%	75%
38	957	914	838	88%	92%
39	654	667	604	92%	91%
40	870	929	832	96%	90%
Resultados Globais				92%	90%

Os problemas referentes ao critério de completeza da extração para os cruzamentos 04 (figura 65(a)) e 32 (figura 65(b)) estão vinculados a problemas de sombra cobrindo o leito da rodovia.

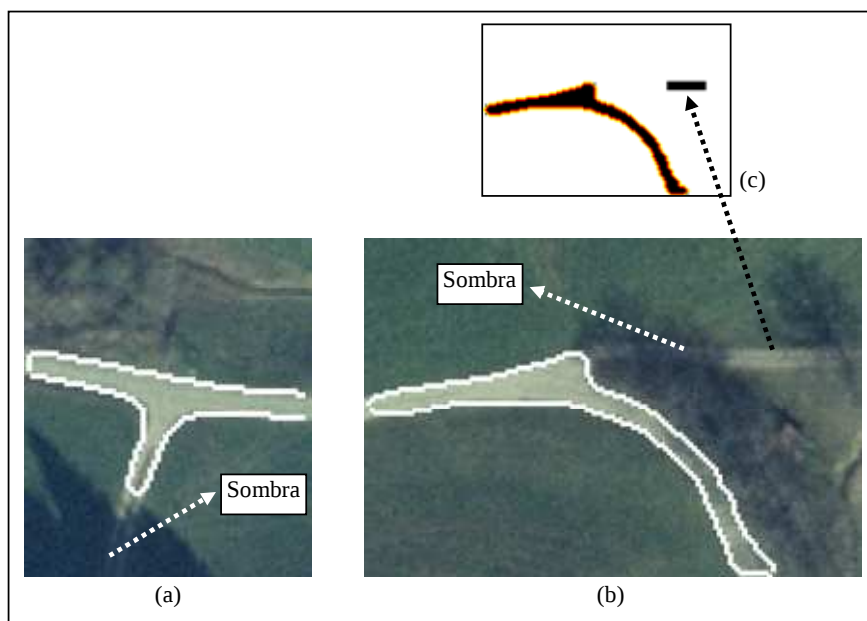


Figura 65 – Exemplos de extração com problemas de sombra para imagem teste 04. (a) Resultado da extração para o cruzamento 04; (b) Resultado da extração para o cruzamento 32; (c) Resultado do pré-processamento e do delineamento do cruzamento 32.

A diferença dos resultados está vinculada à maneira como a sombra interfere nas extrações. No caso do cruzamento 04 (figura 65(a)) a sombra não permitiu que parte da rodovia fosse detectada em nenhuma das etapas, enquanto no cruzamento 32 (figura 65(b)) a sombra fragmentou a estrutura que representa o cruzamento (figura 65(c)). Por causa desse fato, o segmento de rodovia foi considerado como uma estrutura espúria e, portanto, a mesma não foi delineada como cruzamento.

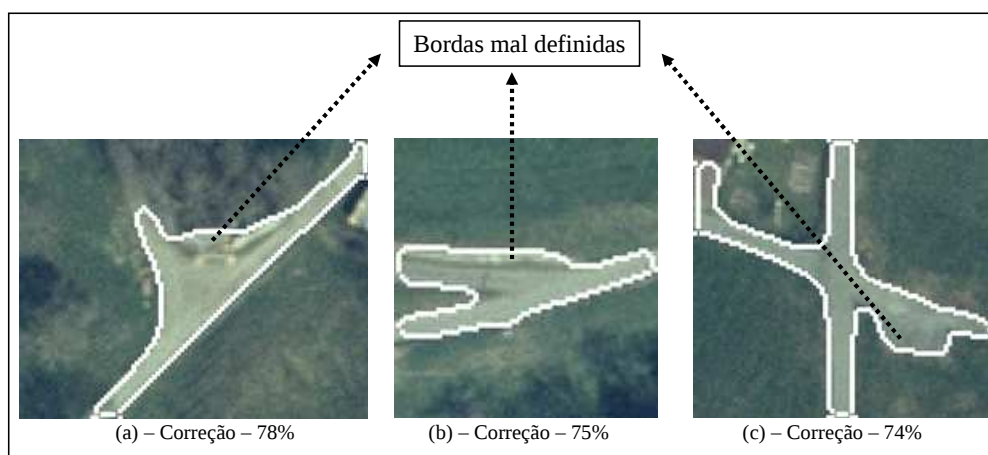


Figura 66 – Resultados das extrações plotados sobre imagens originais em cruzamentos que apresentam problemas de correção para imagem teste 04; (a) Cruzamentos 03; (b) Cruzamento 13; (c) Cruzamento 23.

Os cruzamentos 03 (figura 66(a)), 13(figura 66(b)) e 23 (figura 66(c)) são situações em que os problemas para a correção decorrem da má definição das bordas que compõem as rodovias dos cruzamentos.

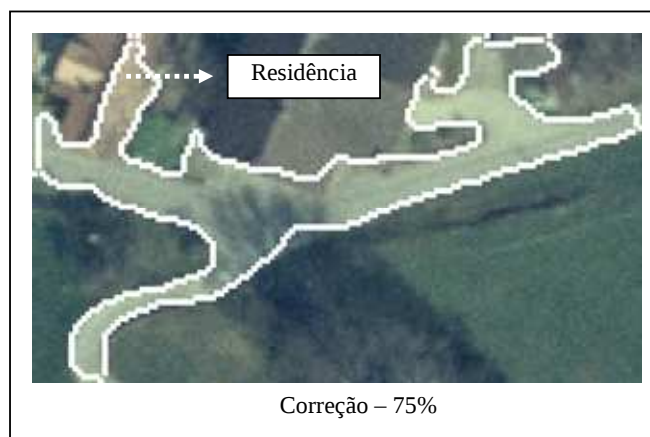


Figura 67 – Resultado da extração para o cruzamento 37 sobreposto sobre a imagem original, indicando a residência delineada como falso positivo junto ao cruzamento.

O problema de correção encontrado na extração do cruzamento 37 (figura 67) foi gerado principalmente pela presença de uma residência na adjacência do cruzamento que não foi isolada na etapa de pré-processamento. Como pode ser verificado na figura 67, o maior problema estava no falso positivo gerado pela residência delineada com o cruzamento e não nas sombras projetadas sobre a borda da rodovia.

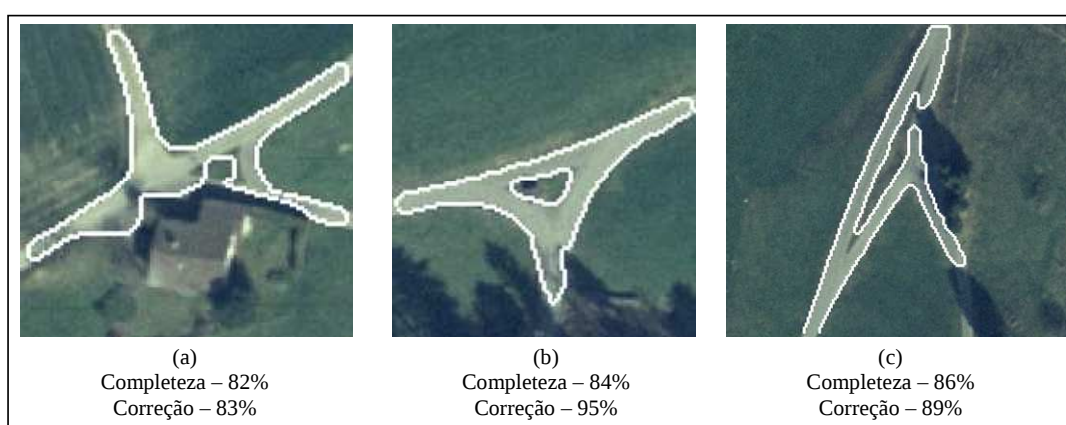


Figura 68 – Resultados de Extrações para cruzamentos complexos de segunda classe para imagem teste 04. (a) Cruzamento 11; (b) Cruzamento 12; (c) Cruzamento 27.

Alguns cruzamentos na imagem teste 04 também exemplificam a eficiência do método proposto, principalmente frente à alguns problemas que exigem esforços adicionais para serem resolvidos como, por exemplo, a presença de ilhas no interior do cruzamento (RAVANBAKHS et al., 2008).

Os cruzamentos 11 (figura 68(a)), 12 (figura 68(b)) e 27 (figura 68(c)) são exemplos de cruzamentos dos tipos complexos de segunda classe (existem ilhas) que merecem atenção, uma vez que suas extrações atingiram resultados satisfatórios tanto para a completeza quanto para a correção, conforme pode ser visto na figura 68(a-c).

A presença de áreas de solo exposto nas adjacências dos cruzamentos também é um problema que precisa ser superado pelo método, o qual deve isolar tais áreas na etapa de pré-processamento por se tratarem de estruturas espúrias, obtendo assim sucesso nas etapas seguintes.

Um exemplo dessa situação é apresentado na figura 69 (a-b) (cruzamentos 14 e 26), em que a extração dos cruzamentos foi considerada satisfatória mesmo com a presença de áreas de solo exposto que foram isoladas no pré-processamento (figura 69(c-d)).

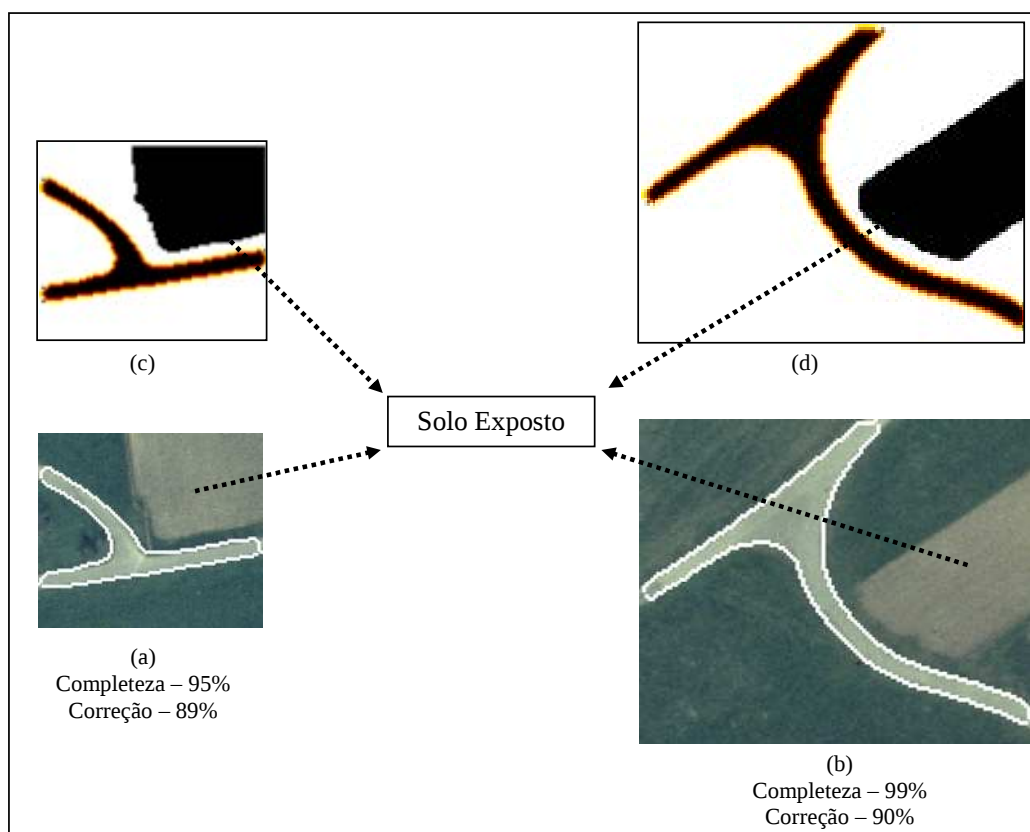


Figura 69 – Exemplos de resultados satisfatórios para extração de cruzamentos com solo exposto nas adjacências, isolados no pré-processamento para a imagem teste 04. (a) Cruzamento 14; (b) Cruzamento 26; (c – d) Resultado do pré-processamento para os cruzamentos 14 e 26.

De forma análoga ao que ocorre na situação de áreas de solo exposto, os cruzamentos 17 (figura 70(c)) e 36 (figura 70(d)) também exemplificam a robustez do método proposto diante da presença de estruturas espúrias geradas por outras feições, tais como residências. No entanto, a necessidade já constatada de separar essas estruturas daquela que representa o cruzamento (figura 70(a-b)) é fundamental para que os resultados da extração sejam satisfatórios.

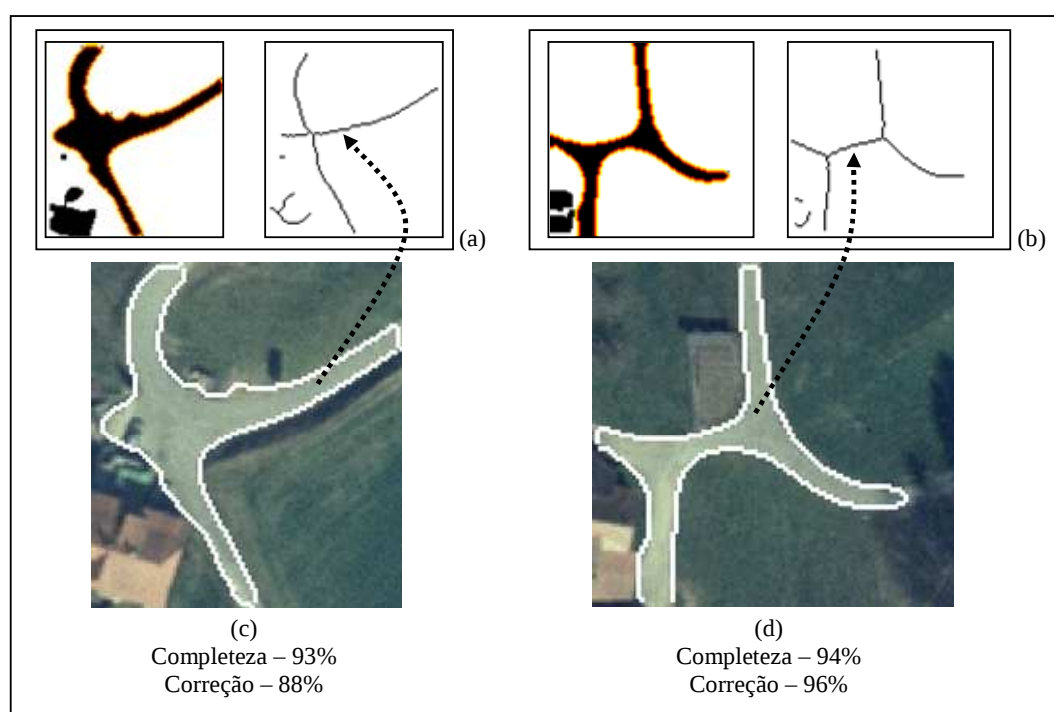


Figura 70 – Exemplos de resultados satisfatórios para cruzamentos com estruturas espúrias, tais como residências; (a – b) Resultados dos pré-processamentos com esqueletos e cruzamentos delineados para cruzamentos 17 e 36; (c – d) Resultados das extrações sobrepostas sobre os cruzamentos 17 e 36 originais.

5.2.5 Imagem teste 05

A última imagem utilizada para avaliar o método proposto é a imagem teste 05, que tem as mesmas características das imagens testes 03 e 04 e na qual foram selecionados 39 cruzamentos, que estão indicados na figura 71.

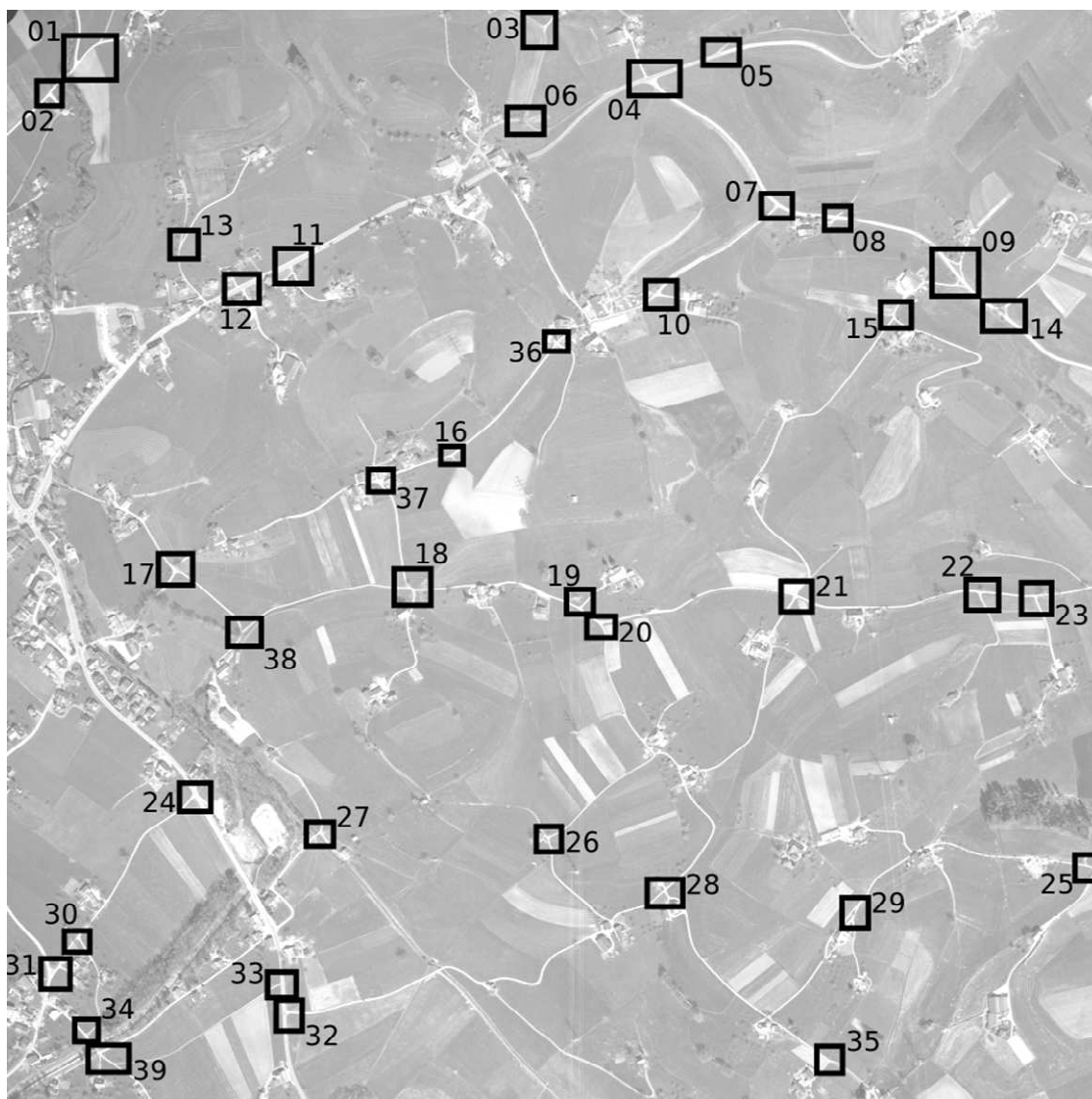


Figura 71 – Imagem teste 05 (Aerial_3) – 39 cruzamentos selecionados.

Dentre os 39 cruzamentos selecionados na imagem teste 05 (figura 71), 29 são classificados como cruzamentos simples cuja maioria apresenta a forma de Y (21 cruzamentos), enquanto oito são identificados na forma de X (cruzamentos 04, 12, 15, 17, 18, 21, 36 e 37).

Dez cruzamentos estão classificados como complexos nessa imagem, sendo que oito cruzamentos são considerados complexos de primeira classe (cruzamentos 01, 08, 11, 24, 28, 29, 31 e 39) e apenas os cruzamentos 09 e 14 são classificados como complexos de segunda classe.

Os resultados globais para os critérios de completeza e correção nesta imagem teste são de 94% e 91% respectivamente. A tabela 11 apresenta os indicadores de completeza e correção para todos os cruzamentos selecionados nessa imagem teste.

Tabela 11 – Indicadores de Qualidade para os Cruzamentos da Imagem Teste 05

Cruzamento	A_R	A_E	$A_{E \cap R}$	Completeza	Correção
01	2362	2887	2359	100%	82%
02	1295	1307	1196	92%	92%
03	1806	1814	1656	92%	91%
04	4172	4412	4167	100%	94%
05	2024	1945	1909	94%	98%
06	1636	1915	1525	80%	79%
07	1687	1635	1593	94%	97%
08	1686	1553	1487	88%	96%
09	4505	4626	4440	99%	96%
10	1133	1211	1083	96%	89%
11	3398	3586	3370	99%	94%
12	3040	3432	3023	99%	88%
13	720	760	655	91%	86%
14	2917	2779	2678	92%	96%
15	1109	1037	962	87%	93%
16	777	667	649	84%	97%
17	2071	1696	1635	79%	96%
18	1421	1435	1382	97%	96%
19	918	927	894	97%	96%
20	1092	1059	1044	96%	99%
21	1491	1455	1430	96%	98%
22	1105	1086	1074	97%	99%
23	1019	1027	979	96%	95%
24	2727	2704	2681	98%	99%
25	888	895	856	96%	96%
26	742	1536	734	99%	48%
27	813	836	779	96%	93%
28	1390	1779	1325	95%	74%
29	1336	1410	1296	97%	92%
30	1034	722	681	66%	94%
31	2459	2478	2375	97%	96%
32	1761	1803	1739	99%	96%
33	1363	1342	1329	98%	99%
34	807	1152	804	100%	70%
35	789	880	785	99%	89%
36	891	906	820	92%	91%
37	1266	1664	1061	84%	64%
38	1026	1160	1010	98%	87%
39	2091	1898	1695	81%	89%
Resultados Globais				94%	91%

Os cruzamentos que tiveram problemas de extração em termos de completeza (completeza inferior a 80%) na imagem teste 05 (figura 71) foram os cruzamentos 17 (figura 72(c)) e 30 (figura 72(d)). Em ambos os casos o problema na extração foi causado pela sombra sobre o leito da rodovia, fragmentando a estrutura que representa o cruzamento. A figura 72(a – b) mostra os resultados dos pré-processamentos com seus respectivos esqueletos, indicando o problema que implicará em falhas nas etapas seguintes. Os resultados das extrações estão sobrepostos sobre as imagens originais como mostra a figura 72(c – d).

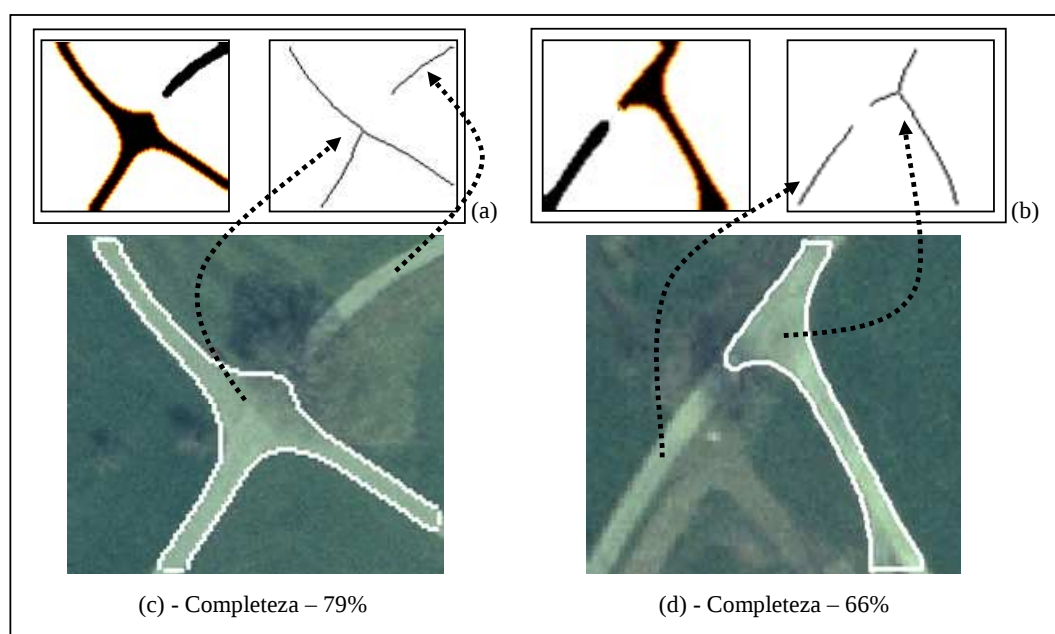


Figura 72 – Exemplos de resultados de extrações considerados insatisfatórios no critério completeza para imagem teste 05.(a – b) Resultados dos pré-processamentos; (c – d) Extrações sobrepostos sobre as imagens originais para os cruzamentos 17 e 30.

Os cruzamentos da imagem teste 05 que apresentaram problemas de extração com relação ao critério correção foram os cruzamentos 06, 34, 26, 28 e 34, discutidos a seguir.

No que se refere aos cruzamentos 06 (figura 73(a)) e 34 (figura 73(b)), os problemas gerados nas extrações em termos de correção estão relacionados à resposta espectral da rodovia que, nestes exemplos, têm um baixo contraste com o seu entorno.

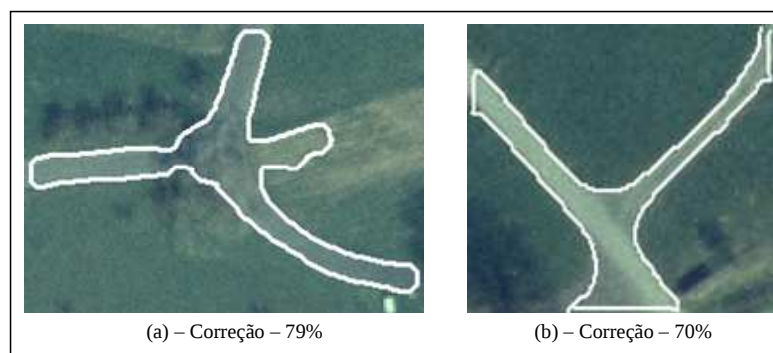


Figura 73 – Exemplos de resultados de extrações consideradas insatisfatórias com relação ao critério correção para imagem teste 05. (a – b) Resultados das extrações sobrepostos sobre os cruzamentos 06 e 34.

Os cruzamentos 26 (figura 74(a)), 28 (figura 74(b)) e 37(figura 74(c)) apresentam os problemas de correção relacionados à presença de residências adjacentes aos cruzamentos, as quais não foram isoladas no pré-processamento. Estas edificações geram falsos positivos na extração e implicam em baixos índices de correção (figuras 74(a-c)).

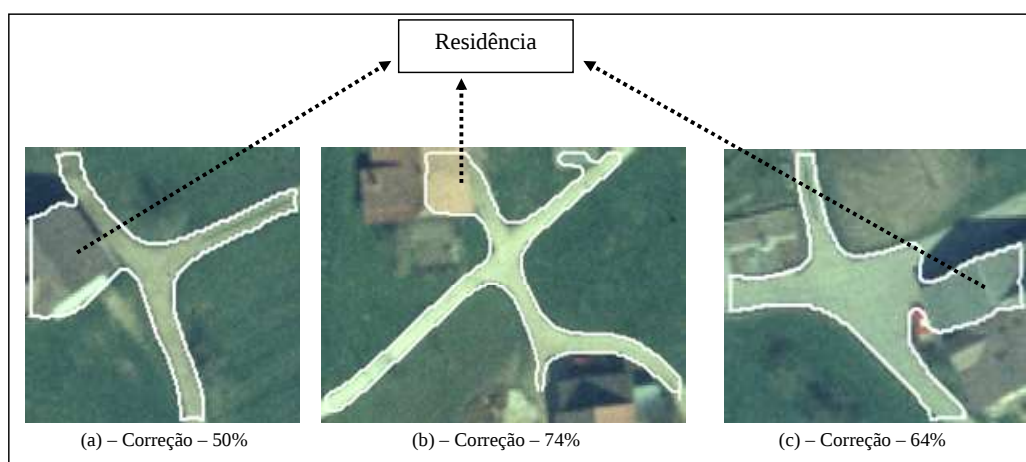


Figura 74 – Exemplos de resultados de extrações considerados insatisfatórios com relação ao critério correção para imagem teste 05, (a – c) Resultados das extrações sobrepostos sobre os cruzamentos 26, 28 e 37.

Mesmo com a presença do conhecido problema de ilhas, os dois cruzamentos complexos de segunda classe (cruzamentos 09 e 14) na imagem teste 05 apresentaram resultados satisfatórios para ambos os índices de qualidade, como pode ser verificado na figura 75(a-b).

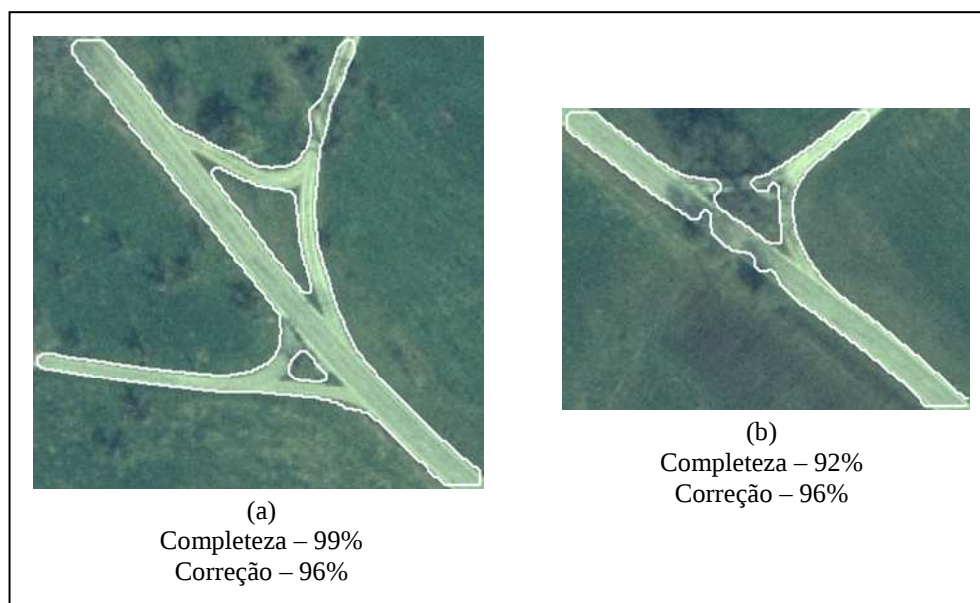


Figura 75 – Resultado da extração para os cruzamentos complexos de segunda classe da imagem teste 05. (a – b) Resultados sobrepostos sobre as imagens originais para os cruzamentos 09 e 14.

Segundo Ravanbakhsh et al. (2008), os cruzamentos classificados como complexos de segunda classe têm um grau de dificuldade maior para o processo de extração por conta das ilhas, de maneira que nos trabalhos destinados à extração de cruzamentos as ilhas são detectadas aplicando-se um procedimento específico.

No entanto, este exemplo mostra que o método proposto é eficiente na extração de cruzamentos com ilhas (cruzamentos complexos de segunda classe) sem a necessidade de um procedimento específico para extração destas.

Por fim, é importante ressaltar que pelo fato de não existir um procedimento específico para extrair ilhas no método proposto, a extração de cruzamentos pode ocorrer com ilhas totalmente definidas ou em ilhas não definidas de forma completa (figura 75(b)), bem como nas situações onde existam mais ilhas em uma mesma região, como mostra a figura 75(a).

5.2.6 Síntese

Os resultados globais para os critérios de completeza e correção obtidos com o método proposto, para as imagens testes utilizadas na avaliação, estão organizados e tabulados no gráfico indicado na figura 76.

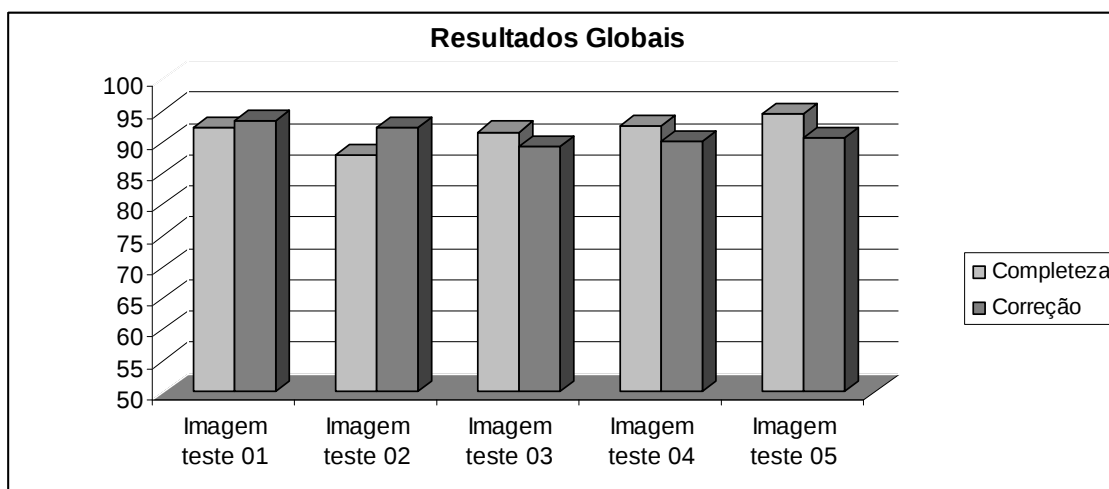


Figura 76 – Gráfico para resultados globais das imagens testes.

Neste gráfico é possível verificar que, de forma global, os resultados são considerados satisfatórios para o método proposto segundo os critérios definidos no capítulo 4, uma vez que todas as imagens apresentaram resultados globais superiores a 80% em ambos os critérios.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Este capítulo é destinado às conclusões e trabalhos futuros que podem surgir em decorrência do trabalho desenvolvido. Na primeira seção estão as principais conclusões acerca da avaliação do método proposto que foi aplicado às imagens testes, bem como os resultados obtidos para os critérios de avaliação utilizados que são completeza e correção. Na segunda seção estão as perspectivas dos trabalhos futuros, que visam melhorar os resultados, corrigindo os problemas diagnosticados no capítulo de resultados e análises (capítulo 5).

6.1 Conclusões

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um método específico para realizar a extração de cruzamentos simples e complexos de rodovias, utilizando ferramentas tradicionais da área de análise de imagens.

Para alcançar este objetivo foi proposto um método baseado em três etapas, as quais são: pré-processamento, modelagem e filtragem topológica e o delineamento do elemento cruzamento na região de interesse.

O método proposto foi extensivamente avaliado, utilizando cinco imagens aéreas das quais foram selecionados 143 cruzamentos que representam praticamente todos os cruzamentos presentes em áreas rurais nas imagens testes. Os critérios utilizados na avaliação dos resultados experimentais foram os parâmetros de completeza e correção, que obtiveram resultados globais para as imagens que variam de 88% a 94% para a completeza e de 89% a 93% para o critério correção.

Baseando-se nos resultados globais de completeza e correção pode-se concluir que o método proposto é satisfatório. Por outro lado, a análise específica dos resultados para os 143 cruzamentos permite determinar conclusões sobre as causas que geram resultados satisfatórios e insatisfatórios, tomando-se por base o limiar de 80% para os parâmetros de qualidade.

Constataram-se os seguintes problemas que normalmente geram resultados insatisfatórios.

- Problema de fragmentação do esqueleto utilizado na construção do EORC. Esta fragmentação é resultado de uma falha na etapa de pré-processamento causada por sombras de árvores e edificações que, projetadas sobre o leito da rodovia, prejudicam o sinal gerando estruturas tratadas como espúrias, uma vez que as mesmas não estão ligadas aos cruzamentos.
- Problema de isolamento da estrutura que representa o cruzamento na EORC. Este problema também é consequência de falhas na etapa de pré-processamento. Isto decorre das edificações e áreas de solo exposto que se apresentam contíguas às rodovias e, portanto, não são isoladas das regiões de cruzamento. Este problema é responsável por áreas de falsos positivos no resultado final da extração onde as mesmas são delineadas junto aos cruzamentos, prejudicando a taxa de extração principalmente em relação ao critério correção.
- Problemas gerados pelas bordas dos cruzamentos mal definidas. Esta situação é constatada em regiões de baixo contraste entre rodovias que compõem o cruzamento e seu entorno, gerando resultados insatisfatórios para o método proposto principalmente no que tange ao critério de correção na avaliação.

Por outro lado, a análise geral dos resultados obtidos, apresentada no capítulo 5, permite identificar duas características do método proposto. Tais características são:

- O método proposto pode ser considerado robusto quando se considera o alto índice de resultados satisfatórios obtidos. Esta conclusão é amparada por uma análise de todos os cruzamentos, pois somente 10 cruzamentos apresentaram resultados abaixo do esperado para o critério de completeza e 11 deles têm resultados insatisfatórios no critério correção. Assim, para os 143 cruzamentos avaliados obteve-se taxas de 7% e 8% de resultados insatisfatórios nos critérios de completeza e correção, respectivamente.

- O método proposto também pode ser considerado flexível no que tange à sua capacidade de realizar extração de cruzamentos simples e complexos. Esta característica é comprovada pelo número de cruzamentos complexos de primeira ou segunda classe extraídos pelo método (39 cruzamentos complexos). Esta quantidade representa 27% do número total de cruzamentos extraídos, sendo que estes resultados satisfatórios foram alcançados sem a necessidade de procedimentos específicos para extrair tais cruzamentos, nem a modificação dos parâmetros que foram mantidos em todos os experimentos.

Considerando o método desenvolvido e os resultados obtidos neste trabalho, algumas conclusões gerais podem ser destacadas quanto ao método e suas etapas. Tais conclusões são:

- O método é bastante dependente da etapa de pré-processamento. Neste sentido, para que o método proposto obtenha um resultado satisfatório é necessário que a estrutura que represente o cruzamento esteja suficientemente isolada das estruturas definidas como espúrias.
- A etapa de modelagem e filtragem topológica pode ser considerada bastante eficaz, pois não foram verificados resultados avaliados como insatisfatórios que estejam vinculados a esta etapa do método.
- O algoritmo utilizado para o delineamento (*Level Set*) também se mostrou eficiente ao contornar os problemas que, normalmente, geram falsos positivos nas tradicionais metodologias para extração de rodovias/cruzamentos.
- No que tange ao algoritmo, a principal vantagem do método proposto frente aos outros métodos encontrados na literatura é o seu grau de automação, uma vez que os parâmetros utilizados nos algoritmos são os mesmos para todas as sub-imagens (regiões de cruzamentos) utilizadas na avaliação.

Por fim, este trabalho apresenta um método específico para extração de cruzamentos de rodovias, caracterizado como robusto e flexível. Estas características foram comprovadas com uma ampla e diversificada quantidade de dados, obtendo resultados

satisfatórios para a maioria dos cruzamentos apresentados. Os problemas encontrados estão dentro do esperado, pois os mesmos são problemas característicos nos trabalhos relacionados na literatura.

6.2 Trabalhos Futuros

Com relação aos trabalhos futuros, algumas recomendações podem ser indicadas para melhorar os resultados do método proposto e, assim, considerar o mesmo como um módulo específico no desenvolvimento de um sistema de extração, complementação e atualização de malhas viárias baseada em imagens digitais de alta resolução.

Considerando que a etapa mais crítica do método proposto é o pré-processamento, os algoritmos que possam melhorar a eficiência nesta etapa aumentariam a robustez do método proposto garantindo que as feições antrópicas estejam isoladas o suficiente para os processamentos subsequentes. Isto pode ser obtido com técnicas de classificação de imagens, adicionando informações provenientes de outros sensores ou bandas espectrais como o infravermelho próximo, por exemplo.

Uma alternativa para isolar as regiões de cruzamentos pode ser incluída reformulando o modelo topológico proposto para o EORC. Esta melhoria no modelo topológico pode ser realizada incorporando informações de outras fontes, tais como imagens de outros sensores, dados “laser” ou de bancos de dados geográficos, criando regras que possam ser mais rígidas ou flexíveis dependendo da necessidade.

Para concluir, a principal recomendação para trabalhos futuros é o desenvolvimento de um método automático para selecionar, na imagem, a região de cruzamento (sub-imagem) na qual será aplicado o método proposto para extração de cruzamentos. Esse método a ser desenvolvido poderá ser baseado em informações, que são definidas como de alto-nível, gerando características semânticas do elemento cruzamentos que possam contribuir para a sua seleção. Este é o passo fundamental para integrar o método desenvolvido aos tradicionais métodos utilizados para extração, complementação e atualização da malha viária de forma automática.

7 Referências Bibliográficas

AHMED, B.; ALI, H.; ARIFUL, I. Automatic extractions of road intersections from satellite imagery in urban areas. **6th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)**, Dhaka, Bangladesh, pp. 686-689, 2010.

AHMED, B.; RAHMAN, F. Automatic Road Extractions from High Resolution Satellite Imagery Using Road Intersection Model in Urban Areas. **Computer Engineering and Intelligent Systems**, Vol. 2, n. 4, pp. 82-93, 2011.

AUBERT, G.; KORNPORST, P. **Mathematical Problems in Image Processing: Partial Differential Equations and the Calculus of Variations**. Vol. 147, Springer, 286p, 2002.

BALTSAVIAS, E.; O'SULLIVAN, L.; ZHANG, C. Automated Road Extraction And Updating Using The Atomi System - Performance Comparison Between Aerial Film, Ads40, Ikonos And Quickbird Orthoimagery. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Vol. 35 (B4), pp. 1053-1058, 2004.

BARCELOS, C. A. Z. Restauração e Análise de Imagens Via Equações Diferenciais Parciais. **Tendências em Matemática Aplicada e Computacional**, Vol. 3, n. 2, pp. 1 – 13, 2002.

BARSI, A.; HEIPKE, C. Detecting road junctions by artificial neural networks, **2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas (URBAN 2003)**, ISPRS-ASPRS-IEEE, Berlin, pp. 129 - 132, 2003.

BARSI, A.; HEIPKE, C.; WILLRICH F. Junction extraction by artificial neural network system – JEANS. In **ISPRS – Commission III Symposium on Photogrammetric Computer Vision**, Graz, Austria, 2002.

BAUMGARTNER, A.; STEGER, C.; MAYER, H.; ECKSTEIN, W.; EBNER, H. Automatic road extraction based on multi-scale, grouping, and context. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol. 65, n 7, pp. 777-785, 1999.

BLUM, H. A transformation for extracting new descriptors of shape. In: **W. WathenDunn (ed). Models for the perception of speech and visual form**. Cambridge: MIT Press, 1967.

BOICHIS, N.; COCQUEREZ, J. P.; AIRAULT, S. A top down strategy for simple crossroads extraction. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences**, Vol. 32 (part 2/1), pp. 19-26, 1998.

BOICHIS, N.; VIGLINO, J. M.; COCQUEREZ, J. P. Knowledge based system for the automatic extraction of road intersections from aerial images. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences**, Vol. 33 (part 3), pp. 27-34, 2000.

BOWKER, D. E. **Spectral reflectances of natural targets for use in remote sensing studies**. National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Branch, 181p, 1985.

CANNY, J. A Computational approach to edge detection, **IEEE Pattern Analysis and machine Intelligence**, Vol. 8, n. 6, pp. 679 – 698, 1986.

CHOI, H. I.; CHOI, S. W.; MOON, H. P. Mathematical theory of medial axis transform. **Pacific Journal of Mathematics**, Vol. 181, n. 1, pp.57–88, 1997.

DAL POZ, A. P. Reconhecimento e delineamento automático de segmentos de rodovias através de objetos semânticos. **Livro: Série em Ciências Geodésicas**. Vol 3. Curitiba - PR. pp. 262-275, 2003.

DAL-POZ, A. P.; VALE, G. M.; ZANIN, R. B. Automatic extraction of road seeds from high-resolution aerial images, **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, Vol. 77, n. 3, pp. 509–520, 2005.

DE GUNST, M. Knowledge-based Updating of Maps by Interpretation of Aerial Images. **Proc. of 12th IAPR International Conference on Pattern Recognition**, Vol. 1, pp. 811-814, 1994.

DELINGETTE, H.; MONTAGNAT, J. Shape and Topology Constraints on Parametric Active Contours. **Computer Vision and Image Understanding**, Vol. 83, n. 2, pp 140-171, 2001.

DI RUBERTO, C. Recognition of shapes by attributed skeletal graphs. **Pattern Recognition**, Vol. 37, n. 1, pp. 21-31, 2004.

EVANS, L.C.; SPRUCK, J. Motion of level sets by mean curvature, I. **Jounal of Geometric Analysis**, Vol. 2, n. 2, 1991.

FÖRSTNER, W. Image Preprocessing for Feature Extraction in Digital Intensity, Color and Range Images, **Springer Lecture Notes on Earth Sciences, Summer School on Data Analysis and the Statistical Foundations of Geomatics**, 1999.

GAUTAMA, S.; GOEMAN, W.; D'HAeyer, J. Robust detection of road junctions in VHR images using an improved ridge detector. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences**, Vol. 35 (Part 3), pp. 815-819, 2004.

GÉE, CH.; BOSSU, J.; JONES, G.; TRUCHETET, F. Crop/weed discrimination in perspective agronomic images. **Computers and Electronics in Agriculture**, Vol. 60, pp. 49–59, 2008.

GEMAN, S.; GEMAN, D. Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images. **IEEE Transaction Pattern Analysis Machine Intelligence**, Vol. 6, pp. 721-741, 1984.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E.; **Digital Image Processing**. Addison-Wesley Publishing Company, 2000.

GRÜN, A. Semi-Automated Approaches to Site Recording and Modeling. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences**, 21th ISPRS Congress. Volume 33 (Part B5/1), pp. 309 – 318, 2000.

HAGUE, T.; TILLET, N.; WHEELER, H. Automated crop and weed monitoring in widely spaced cereals. **Precision Agriculture**, Vol. 1, n. 1, pp. 95–113, 2006.

HEIPKE, C.; STEGER, C.; MULTHAMMER, R. A hierarchical approach to automatic road extraction from aerial imagery. In **McKeown, Jr. D. M., Dowman, I. J. (Eds.), Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision II, Proc. SPIE**, Vol. 2486, pp. 222–231, 1995.

HU, J.; RAZDAN, A.; FEMIANI, J.C.; CUI, M.; WONKA, P. Road network extraction and intersection detection from aerial images by tracking road footprints. **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing**, Vol. 45, n. 12, pp. 4144–4157, 2007.

HUANG, T.; YANG, G. J.; TANG, G. Y. A fast two-dimensional median filtering algorithm. **IEEE Transaction on Acoustics, Speech, and Signal Processing**, Vol. 27, n. 1, 1979.

HUETE, A.; DIDAN, K.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 83, pp. 195–213, 2002.

IMMERKAER, J. Fast Noise Variance Estimation. **Computer Vision and Image Understanding**, Vol. 64, n. 2, pp. 300–302, 1996.

JAIN, A. K. **Fundamentals of digital image processing**. Prentice Hall, 569p, 1989.

KASS, M.; WITKIN, A.; TERZOPOULOS, D. Snakes: Active contour models. **International Journal of Computer Vision**, Vol. 1, pp. 321–331, 1988.

KATAOKA, T.; KANEKO, T.; OKAMOTO, H.; HATA, S. Crop growth estimation system using machine vision. **Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics**, pp. 1079–1083, 2003.

KOSOV, S.; ROTTENSTEINER, F.; HEIPKE, C.; LEITLOFF, J.; HINZ, S. 3D Classification Of Crossroads From Multiple Aerial Images Using Markov Random Fields. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences**, 22th ISPRS Congress, Melbourne, Australia, Vol. 39 (B3), 2012.

KOUTAKI, G.; UCHIMURA K. Automatic Road Extraction Based on Cross Detection in Suburb. **Proceedings of SPIE, Electronic Imaging**, 2004.

LAPTEV, I. Road Extraction Based on Line Extraction and Snakes. Thesis, Computational Vision and Active Perception Laboratory (CVAP), Royal Institute of Technology (KTH), Sweden, 1997.

LAPTEV, I.; MAYER, H.; LINDEBERG, T.; ECKSTEIN, W.; STEGER, C.; BAUMGARTNER, A. Automatic extraction of roads from aerial images based on scale-space and snakes. **Machine Vision and Applications**, Vol. 12, n. 1, pp. 23–31, 2000.

MALLADI, R.; SETHIAN, J. A. Image Processing via Level Set Curvature Flow. **Applied Mathematics**, Vol. 92, n. 15, pp. 7046–7050, 1995.

MAYER, H.; HINZ, S.; BACHER, U.; BALTSAVIAS, E. A test of automatic road extraction approaches. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences**, Vol. 36 (parte 3), pp. 209–214, 2006.

MAYER, H.; LAPTEV, I.; BAUMGARTNER, A. Multi-Scale and Snakes for Automatic Road Extraction. **In Proc. ECCV'98, Springer LNCS**, Vol. 1406, pp. 720-733, 1998.

MENA, J. B.; State of the art on automatic road extraction for GIS update: a novel classification. **Pattern Recognition Letters**, Vol. 24, n.16, pp.3037–3058, 2003.

MEYER, G. E.; HINDMAN, T. W.; LAKSHMI, K. Machine vision detection parameters for plant species identification. **In Meyer, G.E., DeShazer, J.A. (Eds.), Precision Agriculture and Biological Quality, Proceedings of SPIE**. Vol. 3543, pp. 327 – 335, 1998.

MITICHE, A.; AYED, I. B. **Variational and level set methods in image segmentation**. Springer, 2010.

NEGRI, M.; GAMBA, P.; LISINI, G.; TUPIN, F. Junction-aware extraction and regularization of urban road networks in high-resolution SAR images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Vol. 44, n. 10, pp. 2962–2971, 2006.

NIEDERÖST, M. Detection and reconstruction of buildings for a 3-D landscape model of Switzerland. **Proceedings of the UM3 2000 Workshop**, Tokyo, 2000.

NIU, X. A semi-automatic framework for highway extraction and vehicle detection based on a geometric deformable model. **ISPRS Journal of Photogrammetry e Remote Sensing**, Vol. 61, pp. 170–186, 2006.

OSHER, S.; SETHIAN, J. A. Fronts Propagating with Curvature-Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations. **Journal of Computational Physics**, Vol. 79, pp. 12-49, 1988.

OTSU, N., A thresholding selection method from gray-level histogram. **IEEE Transactions Systems Man Cybernet**, Vol. 1, pp. 62–66, 1979.

PARKER, J. R. **Algorithms for Image Processing and Computer Vision**. John Wiley & Sons, Inc., New York, 417p, 1997.

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. **Análise de Imagens Digitais: Princípios, Algoritmos e Aplicações**. Ed Thomson Learning, 2008.

PEIXOTO, A.; CARVALHO, P. C. P. Esqueletos de Objetos Volumétricos. **Technical Report MCC 34/00**, PUC-Rio, 2000.

PERONA P.; MALIK, J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**. Vol. 12, n. 7, pp.629–639, 1990.

PÉTERI, R.; RANCHIN, T. Automated road network extraction using collaborative linear and surface models. **MAPPs/ASPRS 2006 Fall Conference**, Texas, 2006.

PLOTZE, R. O.; BRUNO, O. M. Estudo e comparação de algoritmos de esqueletonização para imagens binárias. **In IV Congresso Brasileiro de Computação**, Vol. 1, pp. 59-64, 2004.

POLIDORIO, A. M.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G.; FLORES, F. C.; FRANCO, C. Realce do Grau de Artificialidade de Feições em Imagens Aéreas Coloridas. **Anais do III Colóquio de Ciências Geodésicas**, Curitiba - PR, 2003.

POULLIS, C.; YOU, S. Delineation and geometric modeling of road networks. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Vol. 65, pp. 165-181, 2010.

RAVANBAKHS, M.; FRASER, C. S. Extraction of Traffic Islands via Active Contours without Edges. **PCV 2010 - ISPRS Technical Commission III, Symposium on Photogrammetry, Computer Vision and Image Analysis**, Paris, Vol. 38, pp. 1-6, 2010.

RAVANBAKHS, M.; FRASER, C. S. Road Roundabout Extraction from very high Resolution Aerial Imagery. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences**, Vol. 38 (3/W4), pp. 19-26, 2009.

RAVANBAKHS, M.; HEIPKE, C.; PAKZAD, K. Road junction extraction from high resolution aerial imagery. **The Photogrammetric Record**, Vol. 23, n. 124, pp. 405-423, 2008.

RITTER, G. X.; WILSON, J. **Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra**. CRC Press, 1996.

RUIFROK, A. C.; JOHNSTON, D. A. Quantification of histochemical staining by color deconvolution. **Analytical and Quantitative Cytology and Histology**, Vol. 23, pp. 291-299, 2001.

RUSKONÉ, R., Road Network Automatic Extraction by Local Context Interpretation: application to the production of cartographic data. PhD.thesis, Université Marne-La-Vallée, 1996.

SETHIAN, J. A. **Level Set Methods; Evolving Interfaces in Geometry, Fluid Mechanics, Computer Vision and Material Sciences**. Cambridge University Press, 1996.

SETHIAN, J.A. Advancing Interfaces: Level Set and Fast Marching Methods, **Proceedings of the International Conference on Industrial and Applied Mathematics**, 1999.

SILVA, M., A.; DAL POZ, A. P. Detecção e reconstrução automática de junções de rodovia em imagens digitais de cenas rurais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Vol. 9, n. 2, pp. 263 – 281, 2003.

TEOH, C.; SOWMYA, A. Junction Extraction from high resolution images by composite learning. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences**, Vol. 33 (part 3), pp. 882–888, 2000.

VESTRAETE, M. M.; PINTY, B. Environmental information extraction from satellite remote sensing data. **In P. Kasibhatla, M. Heimann, P. Rayner, N. Mahowald, R. G. Prinn, D. E. Hartley (Eds.), Inverse Methods in Global Biogeochemical Cycles**, pp. 125-137, 1999.

WIEDEMANN, C. Improvement of Road Crossing Extraction and External Evaluation of the Extraction Results. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences**, Vol. 34 (Part 3), pp. 297-300, 2002.

WIEDEMANN, C.; HINZ, S. Automatic extraction and evaluation of road networks from satellite imagery. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences**, Vol. 32, CD-ROM, 1999.

WOEBBECKE, D. M.; MEYER, G. E.; MORTENSEN, D. A. Color indices for weed identification under various soil, residue and lighting conditions. **Transactions of the ASAE**, Vol. 38, pp. 259 – 269, 1995.

ZANIN, R. B.; DAL POZ, A. P. Metodologia automática para extração de cruzamento de rodovias em imagens de alta resolução. **Revista Brasileira de Cartografia**, Vol. 55, n. 2, pp. 55-65, 2003.

ZANIN, R. B.; MARTINS, E. F. O.; VALE, G. M.; DAL POZ, A. P. Extraction Of Simple Road Crossing. **PCV 2010 - ISPRS Technical Commission III Symposium on Photogrammetry Computer Vision and Image Analysis**, Paris, Vol. 38, pp. 55-59, 2010.

ZHANG, Q.; COULOIGNER, I. A Framework for Road Change Detection and Map Updating. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Vol. 35 (Part 2), pp.720-734, 2004.

DAUBECHIES, I. The wavelet transform, time frequency localization and signal analysis. **IEEE Transactions on Information Theory**, v.36, p.961-1005, 1990.