

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DALMAR JOSÉ DOS SANTOS

**EXTRAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DO CRUZAMENTO DE VIAS DE ÁREAS
URBANAS COM USO DE ORTOIMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL**

CURITIBA
2010

DALMAR JOSÉ DOS SANTOS

**EXTRAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DO CRUZAMENTO DE VIAS DE ÁREAS
URBANAS COM USO DE ORTOIMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós –
Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de
Ciências da Terra, Departamento de Geomática,
Universidade Federal do Paraná, como requisito
parcial para obtenção do grau de Mestre em
Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos

CURITIBA
2010

TERMO DE APROVAÇÃO

DALMAR JOSÉ DOS SANTOS

"EXTRAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DO CRUZAMENTO DE VIAS EM ÁREAS URBANAS COM USO DE ORTOIMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL

Dissertação nº 238 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

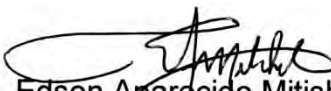


Orientador:

Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Alvaro Muriel Lima Machado
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 26 de agosto de 2010.

DEDICATÓRIA

Aos meus amados guias e protetores.

Aos meus pais Dalcino e Irene (*in memoriam*).

À minha amada esposa Carla, e meus filhos Gabriela e Caio.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Professor Dr. Daniel Rodrigues dos Santos, pela orientação, apoio, incentivo, dedicação, compreensão, conduta ética, ensinamentos, conselhos e paciência a mim dispensados durante a realização deste trabalho, minha eterna gratidão.

Ao Professor Dr. Quintino Dalmolin sempre presente para esclarecimentos de minhas dúvidas e ao Professor Dr. Edson Aparecido Mitishita que confiou em meu trabalho assinando como responsável por minha entrada no Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Aos membros das bancas do Seminário I e Defesa, Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita, Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal' Poz (UNESP), Prof. Dr. Álvaro Muriel Lima Machado, Prof. Dr. Hideo Araki e o Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita pelas sugestões oferecidas.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação que durante a fase de execução dos créditos das disciplinas trouxeram temas atualizados que puderam ser aplicados diretamente na pesquisa.

Aos meus colegas Naíssa Batista da Luz, André Mendonça, Márcio Augusto Reolon Schmidt, Alessandro Salles Carvalho e João Batista Tavares Júnior pelo auxílio e conselhos.

Aos meus sócios Josemar Ganho e Salvio Ramos Mafra pela compreensão quanto as minhas ausências em nossa empresa – Geofoto Brasil Tecnologia e Sistemas de Informação Terrestre e Aeroespacial Ltda. – durante a realização deste trabalho.

À Esteio Engenharia de Aerolevantamentos S.A. pelo fornecimento da ortoimagem na banda RGB sem a qual seria impossível a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio concedido no projeto Jovem Pesquisador nº. 570316/2008.

EPÍGRAFE

“Fazemos parte de uma sociedade onde o calor humano é necessário para que a igualdade se faça através do verdadeiro sentimento de solidariedade. Somos uma entidade fraterna caminhando para que os valores humanos sejam respeitados, onde a criatura possa sentir que o amor, a doação e a caridade existem dentro dos nossos corações. Trabalhamos para amenizar o sofrimento alheio através dos trabalhos de amor, caridade e movimentos sociais, assistindo a necessidade, valorizando o ser humano como um todo. Queremos que o trabalho de doação cresça cada vez mais dentro dos nossos corações. Nós todos trabalhamos no bem comum onde o êxito maior é o do dever cumprido, para que o trabalho atinja o objetivo a que nos propomos. A necessidade existe e o amor é a alavanca que nos impulsiona para sermos trabalhadores da caridade alheia.”

“Fraternidade” João Batista o Baiano.

RESUMO

Este trabalho propõe uma estratégia semi-automática para extração do cruzamento de vias onde são determinados pontos sementes de cruzamentos em vias utilizados como ponto de partida para a definição do delineamento das bordas do encontro das vias, denominado cruzamento de vias. A extração do cruzamento de vias é realizada com o uso de ortoimagem de alta resolução espacial em cenas correspondentes a áreas urbanas densas. Na aplicação da estratégia proposta é realizada a coleta manual de pixels, sobre a ortoimagem, que dá origem ao conjunto de dados de treinamento (amostras) utilizado no software WEKA para gerar a árvore de decisão que contem as faixas de valores de tons de cinza que permitem a segmentação da imagem e a separação dos pixels pertencentes à classe vias, onde, são aplicados operadores morfológicos e algoritmos para a geração de eixos de vias (esqueletos), a detecção de hipóteses de cruzamentos, à detecção de pontos sementes dos cruzamentos de vias e o delineamento e extração das bordas dos cruzamentos das vias. A estratégia proposta foi testada com dados reais e os resultados foram analisados permitindo uma avaliação global da estratégia, bem como, das situações potencialmente problemáticas. Os resultados apresentados nos experimentos demonstram a viabilidade da extração do cruzamento de vias, simples e complexos, em cenas de áreas urbanas densas. Este trabalho apresenta detalhes da metodologia, os experimentos realizados e os resultados obtidos.

Palavras-chave: Extração de cruzamentos, extração de malha viária, WEKA, segmentação de imagem, morfologia matemática, imagem de alta resolução.

ABSTRACT

This paper proposes a semi-automatic strategy for crossroads extraction where crossroads seed points are determined in pathways to be used as starting point for defining the outline of the edges of the streets meeting, called crossing channels. The extraction of the routes intersection is performed by using high spatial resolution orthoimage in scenes corresponding to dense urban areas. To implementing the proposed strategy the manual pixels collection on the orthoimage is performed, which gives rise to a set of training data (samples) used in WEKA software to generate the decision tree that contains the ranges of grey tones to allow image segmentation and pixels separations belonging to roads class, to which morphological operators and algorithms for shafts parts generating (skeletons), the detecting of possible intersections, the detection of crossroads seed points and definition of the outlines and edges of the streets meeting edges. Are applied the proposed strategy was tested with real data and the results were analyzed allowing an overall evaluation of the strategy, as well as potentially problematic situations. The results presented in the experiments demonstrate the feasibility of the crossroads extraction, both simple and complex, in dense urban areas scenes. This paper presents the methodology details, the experiments and the results.

Key words: crossroads extraction, roads network extraction, WEKA, image segmentation, mathematical morphology, high resolution image.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – SENSOR ADS40	11
FIGURA 2 – ÁRVORE DE DECISÃO BINÁRIA	16
FIGURA 3 – ALGORITMO PARA A CONSTRUÇÃO DE ÁRVORE DE DECISÃO	21
FIGURA 4 – PROCESSO DE EXTRAÇÃO DO CONHECIMENTO.....	22
FIGURA 5 – PROCESSO DE EXTRAÇÃO DO CONHECIMENTO UTILIZANDO WEKA.....	23
FIGURA 6 – EXEMPLO DE MALHA VIÁRIA EM ÁREA URBANA	24
FIGURA 7 – EXEMPLO DO MODELO CONTEXTUAL GLOBAL DE RODOVIAS	26
FIGURA 8 – EXEMPLO DO MODELO CONTEXTUAL LOCAL	27
FIGURA 9 – EXEMPLO DO MODELO CONTEXTUAL LOCAL.	27
FIGURA 10 – MODELO DE EXTRAÇÃO DE CRUZAMENTO DE VIA.....	29
FIGURA 11 – EXEMPLOS DE INTERSEÇÕES “Y” E “T”	31
FIGURA 12 – EXEMPLOS DE INTERSEÇÕES COM QUATRO E CINCO RAMOS.....	31
FIGURA 13 – EXEMPLO DE INTERCONEXÃO DO TIPO DIAMANTE	33
FIGURA 14 – EXEMPLO DE ESTRUTURAS ELEMENTAIS E ELEMENTOS ESTRUTURANTES	35
FIGURA 15 – EXEMPLO DO MODELO CONTEXTUAL LOCAL	35
FIGURA 16 – OPERADOR MORFOLÓGICO DE EROSIÃO.	37
FIGURA 17 – OPERADOR MORFOLÓGICO DE DILATAÇÃO	39
FIGURA 18 – OPERADOR MORFOLÓGICO DE ABERTURA	40
FIGURA 19 – OPERADOR MORFOLÓGICO DE FECHAMENTO	41
FIGURA 20 – EXEMPLO DE ALGORITMO DE ESQUELETIZAÇÃO	43
FIGURA 21 – EXEMPLO DE ALGORITMO DE PODA.....	45
FIGURA 22 – BORDA DE UMA VIA COM O EFEITO “DENTE DE SERRA” NOS PIXELS.....	46
FIGURA 23 – BORDA DE UMA VIA SEM O EFEITO “DENTE DE SERRA” NOS PIXELS.	46
FIGURA 24 – ALGORITMO DE BRESENHAM – CASO 1.	48
FIGURA 25 – ALGORITMO DE BRESENHAM – CASO 2.	48
FIGURA 26 – OBJETOS PRESENTES EM UMA PORÇÃO DE IMAGEM DE ALTA RESOLUÇÃO EM ÁREA URBANA	51
FIGURA 27 – EXEMPLO DE ELEMENTOS QUE CAUSAM OBSTRUÇÕES NAS VIAS.....	51
FIGURA 28 – MODELO DE RAVANBAKSH <i>ET AL.</i> (2007) ALTERADO	52
FIGURA 29 – FLUXOGRAMA GERAL DA ESTRATÉGIA SEMI-AUTOMÁTICA PROPOSTA	54
FIGURA 30 – ORTOIMAGEM NA BANDA RGB.....	56
FIGURA 31 – COLETA MANUAL NO ENVI DOS PIXELS DAS CLASSES.....	56
FIGURA 32 – ARQUIVO DE TEXTO DO CONJUNTO DE DADOS DA AMOSTRA.....	57
FIGURA 33 – MÓDULO (1): TRANSFORMA ENVI/WEKA	58
FIGURA 34 – ARQUIVO TEXTO FORMATO ARFF - WEKA	59
FIGURA 35 – TELA INICAL DO WEKA E A LEITURA DO ARQUIVO ARFF	59
FIGURA 36 – MÓDULO (2): TRANSFORMA WEKA/IF-THEN	60
FIGURA 37 – ARQUIVO DE TEXTO NO FORMATO IF-THEN.....	61

FIGURA 38 – MÓDULO (3) : EXTRAÇÃO DO CRUZAMENTO DE VIAS (ETAPA 06)	62
FIGURA 39 – ORTOIMAGEM RGB E SUA SEGMENTAÇÃO	64
FIGURA 40 – IMAGEM BINÁRIA CONTENDO PIXELS DA CLASSE VIAS	64
FIGURA 41 – FILTRO DE MEDIANA APLICADO NOS PIXELS DA CLASSE VIAS	65
FIGURA 42 – ELEMENTO ESTRUTURANTE EM FORMA DE DISCO	66
FIGURA 43 – RESULTADO DO OPERADOR MORFOLÓGICO DE EROÇÃO EM FORMA DE DISCO	66
FIGURA 44 – OPERADOR MORFOLÓGICO DE EROÇÃO PARA DETERMINAR AS BORDAS DA CLASSE VIAS.....	67
FIGURA 45 – EXEMPLO DE ELIMINAÇÃO E PREENCHIMENTO DE POLÍGONOS	68
FIGURA 46 – ELIMINAÇÃO E PREENCHIMENTO DE POLÍGONOS DA CLASSE VIAS	69
FIGURA 47 – ESQUELETIZAÇÃO DA IMAGEM CONTENDO A CLASSE VIAS	70
FIGURA 48 – PODA DO ESQUELETO DA CLASSE VIAS (EIXOS DE VIAS).....	71
FIGURA 49 – LOCALIZAÇÃO DAS HIPÓTESES DE CRUZAMENTOS.....	72
FIGURA 50 – DEFINIÇÃO DOS PONTOS SEMENTES DOS CRUZAMENTOS DE VIAS	74
FIGURA 51 – EXTRAÇÃO DO CRUZAMENTO DA VIA.....	74
FIGURA 52 – EXTRAÇÃO DOS CRUZAMENTOS DE VIAS	75
FIGURA 53 – LOCALIZAÇÃO DOS CRUZAMENTOS DE VIAS SELECIONADOS PARA ANÁLISE DO EXPERIMENTO.....	76
FIGURA 54 – EXPERIMENTO 01 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO)	79
FIGURA 55 – EXPERIMENTO 02 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO)	80
FIGURA 56 – EXPERIMENTO 03 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO)	81
FIGURA 57 – EXPERIMENTO 04 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO)	82
FIGURA 58 – EXPERIMENTO 05 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO COM FAIXAS)	83
FIGURA 59 – EXPERIMENTO 06 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO COM FAIXAS)	84
FIGURA 60 – EXPERIMENTO 07 (PAVIMENTO DO TIPO MISTO COM FAIXAS)	85
FIGURA 61 – EXPERIMENTO 08 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO COM FAIXA)	86
FIGURA 62 – EXPERIMENTO 09 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO COM FAIXA)	87
FIGURA 63 – EXPERIMENTO 10 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO COM FAIXA)	88
FIGURA 64 – EXPERIMENTO 11 (PAVIMENTO DO TIPO PARALELEPÍPEDO)	89
FIGURA 65 – EXPERIMENTO 12 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO)	90
FIGURA 66 – EXPERIMENTO 13 (PAVIMENTO DO TIPO MISTO)	91
FIGURA 67 – EXPERIMENTO 14 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO)	92
FIGURA 68 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 01.....	94
FIGURA 69 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 02.....	95
FIGURA 70 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 03.....	96
FIGURA 71 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 04.....	97
FIGURA 72 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 05.....	97
FIGURA 73 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 06.....	98
FIGURA 74 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 07.....	99

FIGURA 75 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 08.....	100
FIGURA 76 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 09.....	101
FIGURA 77 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 10.....	101
FIGURA 78 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 11.....	102
FIGURA 79 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 12.....	103
FIGURA 80 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 13.....	103
FIGURA 81 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 14.....	104

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CONJUNTO DE DADOS DE AMOSTRA DA ORTOIMAGEM	57
TABELA 2 – TIPO DE CRUZAMENTOS	72
TABELA 3 – DADOS GERAIS DOS EXPERIMENTOS.....	77
TABELA 4 – RESULTADOS ALCANÇADOS PELA ESTRATÉGIA PROPOSTA	105

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. Objetivo Geral	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. JUSTIFICATIVA	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. TRABALHOS RELACIONADOS	5
2.2. IMAGEM DIGITAL	9
2.2.1. Sensor digital aerotransportado - ADS40	10
2.3. SEGMENTAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL	13
2.3.1. WEKA	13
2.3.1.1. O algoritmo J48 na geração de árvore de decisão no WEKA	17
2.3.1.1.1. Principais conceitos usados na construção de árvore de decisão	20
2.3.1.2. A extração do conhecimento com WEKA	21
2.4. EXTRAÇÃO DA MALHA VIÁRIA EM ÁREAS URBANAS	23
2.4.1. Malha viária em área urbana	23
2.4.1.1. Vias no mundo real	24
2.4.1.2. Vias em imagens aéreas	25
2.4.1.3. Modelagem da malha viária	25
2.4.2. Princípios da extração da malha viária	28
2.4.3. Cruzamento (interseção) de vias em malha viária	28
2.4.3.1. Modelagem de Ravanbakhsh et al. (2007) para interseção de via	28
2.4.3.2. Definição de interseção de vias	29
2.4.3.3. Tipos de interseções de vias	30
2.4.3.3.1. Interseções em nível	30
2.4.3.3.2. Interseções em níveis diferentes (interconexões)	32
2.5. MORFOLOGIA MATEMÁTICA	33
2.5.1. Operadores morfológicos	34
2.5.1.1. Elemento estruturante	34
2.5.1.2. Operadores morfológicos básicos	36
2.5.1.2.1. Erosão	36
2.5.1.2.2. Dilatação	38
2.5.1.2.3. Abertura	39
2.5.1.2.4. Fechamento	40
2.5.2. Algoritmos morfológicos básicos	41
2.5.2.1. Esqueletização (Afinamento)	41
2.5.2.2. Poda	44

2.6. ALGORITMO DE BRESENHAM	46
3. MATERIAIS E MÉTODO	50
3.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	50
3.2. MODELO PROPOSTO PARA A EXTRAÇÃO DO CRUZAMENTO DE VIAS	52
3.3. ESTRATÉGIA PROPOSTA PARA EXTRAÇÃO DO CRUZAMENTO DE VIAS	53
3.4. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA (ETAPAS 01 A 06)	55
3.4.1. Ortoimagem (Etapa 01)	55
3.4.2. Coleta de amostra (Etapa 02)	56
3.4.3. Módulo (1) – Transforma ENVI/ARFF (Etapa 03)	58
3.4.4. WEKA: Geração da árvore de decisão (Etapa 04)	59
3.4.5. Módulo (2): Transforma WEKA/IF-THEN (Etapa 05)	60
3.4.6. Módulo (3): Extração dos cruzamentos de vias (Etapa 06)	61
4. EXPERIMENTOS REALIZADOS	63
4.1. DETALHAMENTO DOS PROCESSOS DO MÓDULO (3) PARA A EXTRAÇÃO DO CRUZAMENTO DE VIAS	63
4.1.1. Processo (I) – Segmentação da imagem em classes	63
4.1.2. Processo (II) – Separação da classe vias	64
4.1.3. Processo (III) – Filtro de mediana	65
4.1.4. Processo (IV) – Operador Morfológico de erosão em forma de disco	66
4.1.5. Processo (V) – Operador Morfológico de erosão para a determinação de bordas	67
4.1.6. Processo (VI) – Definição dos polígonos da classe vias	67
4.1.7. Processo (VII) – Eliminação e preenchimento dos polígonos	68
4.1.8. Processo (VIII) – Operador Morfológico de esqueletização	69
4.1.9. Processo (IX) – Operador Morfológico de poda	70
4.1.10. Processo (X) – Detecção de hipóteses de cruzamentos	71
4.1.11. Processo (XI) – Extração dos cruzamentos das vias	73
4.1.12. Processo (XII) – Aplicação do algoritmo de Bresenham	75
4.2. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS	75
4.3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS	79
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	92
5.1. EXPERIMENTO 01	94
5.2. EXPERIMENTO 02	95
5.3. EXPERIMENTO 03	95
5.4. EXPERIMENTO 04	96
5.5. EXPERIMENTO 05	97
5.6. EXPERIMENTO 06	98
5.7. EXPERIMENTO 07	98
5.8. EXPERIMENTO 08	99
5.9. EXPERIMENTO 09	100
5.10. EXPERIMENTO 10	101
5.11. EXPERIMENTO 11	102

5.12. EXPERIMENTO 12	102
5.13. EXPERIMENTO 13	103
5.14. EXPERIMENTO 14	104
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	106
6.1. CONCLUSÕES	106
6.2. RECOMENDAÇÕES	108
REFERÊNCIAS	110

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A malha viária é a superfície por onde transitam veículos, pessoas e animais compreendendo as rodovias, assim denominadas quando localizadas fora das áreas urbanas, e as vias quando localizadas no interior das áreas urbanas (BRASIL, 1997). A malha viária é de fundamental importância para o desenvolvimento econômico de qualquer país, uma vez que representam a solução para conexão entre regiões habitadas e o meio de transporte convencional de bens e pessoas.

Diferente das áreas rurais, a paisagem das áreas urbanas está em constante modificação devido à necessidade, pela população, da implantação de novas regiões para as funções urbanas básicas de habitação, trabalho, recreação e circulação. A implantação dessas regiões demanda a abertura de novas vias de acesso que provocam alterações na rede de malha viária e em consequência a desatualização das bases cartográficas existentes.

As alterações provocadas nas malhas viárias devem ser registradas nas bases cartográficas para que estas contenham a realidade local, a fim de permitir o controle do cadastro de equipamentos públicos de abastecimento de água, serviços de esgotos, energia elétrica, coletas de água pluvial, rede telefônica, rede de gás canalizado, segurança de tráfego, segurança pública, rastreamento, navegação de veículos, e sistemas baseados em localização (em inglês, *Location Based Systems* – LBS).

De acordo com Dal Poz (2002), o cruzamento de vias é um componente importante para a geração da malha viária. Apesar de serem importantes, os cruzamentos de vias, são raramente abordados em metodologias para extração de rodovias ou vias (BARSÍ *et al.*, 2002; RAVANBAKHSI *et al.*, 2007).

Do ponto de vista científico, o tema sobre a detecção e extração de cruzamentos de vias recai sobre a automação do processo fotogramétrico de interpretação e extração de objetos, a partir de imagens digitais envolvendo, segundo Jensen (2009), elementos de: (a) localização (coordenadas); (b) tonalidade e cor (níveis de cinza, sistema de cor HSI [em inglês *Hue, Saturation, Intensity*] e RGB [em inglês *Red, Green, Blue*]); (c) tamanho (comprimento, largura, perímetro e

área); (d) forma (características geométricas dos objetos); (e) textura (arranjos e disposição característicos de repetições de tom e cor); (f) padrão (arranjo espacial de objetos no terreno); (g) sombras (áreas obscurecidas na imagem); (h) altura e profundidade (elevação, volume, declividade e aspecto); e (i) situação e associação (ordem, orientação e fenômenos relacionados).

De acordo com Gülch (2000) os métodos de automação do processo fotogramétrico para a extração de objetos em imagens podem ser divididos em quatro níveis distintos: (a) **métodos interativos**: totalmente manuais ou sem qualquer tipo de automatização; (b) **métodos semi-automáticos**: módulos automáticos incorporados ao processo com maior ou menor interação humana; (c) **métodos automáticos**: as principais tarefas realizadas automaticamente, sendo a interação humana restrita a definição e aplicação de especificações, bem como, a avaliação e edição de resultados; (d) **métodos autônomos**: totalmente automáticos, calcula automaticamente todos os parâmetros necessários ao processamento autônomo.

Uma abordagem alternativa para a atualização das malhas viárias em bases cartográficas de áreas urbanas é a semiautomação da extração do cruzamento de vias a partir de ortoimagem de alta resolução. As ortoimagens são obtidas através do processo fotogramétrico de ortorretificação de imagens que são adquiridas por sensores orbitais (satélites) ou aerotransportados (aeronaves). As imagens desses sensores são formadas por objetos antrópicos (feitos pelo homem) e naturais.

Atualmente os estudos sobre a extração do cruzamento de vias estão focados, principalmente, no uso de imagens de cenas de áreas rurais formadas por no máximo 20% de objetos antrópicos.

O delineamento do traçado da via e a extração do cruzamento de vias em cenas de áreas urbanas densas formadas por mais de 80% de objetos antrópicos, aliados a melhoria da resolução espacial dos sensores de captura de imagem, as características de largura e resposta espectral dos pixels que formam as vias em cenas de área urbana, e a necessidade da abordagem de modelos para a extração de cruzamentos de vias que minimizem a interação humana no processo de atualização de bases cartográficas, motivam a busca de uma estratégia semi-automática para a detecção e extração do cruzamento de vias com o uso de ortoimagens de alta resolução espacial.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma estratégia semi-automática para a detecção e extração do cruzamento de vias com o uso de ortoimagens de alta resolução espacial em cenas de áreas urbanas densas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- aplicar o pacote WEKA (em inglês, *Waikato Environment for Knowledge Analysis*) para obtenção do conhecimento explícito das classes de objetos que formam a imagem, na segmentação semi-automática de objetos antrópicos e naturais presentes em ortoimagens de alta resolução espacial;
- implementar técnicas de morfologia matemática para extração das bordas, dos eixos, e na solução dos casos de oclusões de objetos no interior e nas bordas das vias;
- detectar e extrair automaticamente os pontos sementes e o delineamento das bordas dos cruzamentos de vias em imagens digitais;
- realizar testes com dados reais, analisar e discutir os resultados obtidos.

1.3. JUSTIFICATIVA

A detecção e extração de cruzamentos de vias em imagens não é uma tarefa fácil de resolução devido a grande diversidade nas características de tamanho, forma, textura, padrão, tonalidade e cor dos objetos que a foram.

A substituição integral da operação humana nos processos fotogramétricos de detecção e extração de objetos em imagens é uma tarefa complexa que demanda a criação de algoritmos eficientes e robustos que exigem a integração da Fotogrametria com as áreas de processamento digital de imagem, visão computacional e inteligência artificial.

Os cruzamentos de vias em cenas de áreas urbanas são pouco explorados na reconstrução da malha viária em função da grande quantidade de objetos antrópicos presentes nessas cenas.

A relevância de estudo do tema de pesquisa proposto nesse trabalho é dada por:

- relevância científica comprovada, dada ao assunto de automação e semiautomação de processos fotogramétricos, pela Comissão III da ISPRS (em inglês, *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*); que é uma organização não governamental dedicada ao desenvolvimento da cooperação internacional para o avanço da Fotogrametria e Sensoriamento Remoto e suas aplicações;
- escassez de métodos e estratégias baseados na extração e reconstrução de cruzamentos de vias com uso de imagens digitais de alta resolução, principalmente, em áreas urbanas;
- busca pela redução no tempo de atualização da malha viária em bases cartográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo encontra-se a descrição dos conteúdos diretamente relacionados com o trabalho desenvolvido. Os conteúdos apresentados estão divididos em cinco subseções, a saber:

- na subseção 2.1 são apresentados os trabalhos relacionados aos temas de extração de vias; eixos de via e cruzamento de via;
- na subseção 2.2 é apresentado o conceito de imagem digital e uma descrição do sensor aerotransportado ADS40, responsável pela captura da imagem que foi utilizada na geração da ortoimagem deste trabalho;
- na subseção 2.3 é apresentado o conceito de segmentação de imagem, software WEKA, aprendizagem de máquina, árvores de decisão e a extração do conhecimento das classes do conjunto de dados de treinamento das amostras;

- na subseção 2.4 é apresentada a modelagem, os princípios da extração da malha viária e do cruzamento de vias em áreas urbanas;
- na subseção 2.5 são apresentadas as técnicas de morfologia matemática com a descrição de operadores e algoritmos morfológicos básicos;
- na subseção 2.6 é apresentado o algoritmo de Bresenham utilizado para minimizar o efeito “dente de serra” nos pixels que formam as bordas das vias.

2.1. TRABALHOS RELACIONADOS

Para a extração do cruzamento de vias faz-se necessário, a abordagem de aplicações de extração de objetos em três níveis, a saber: (a) **extração de vias ou rodovias**; (b) **extração do eixo das vias ou rodovias**; e finalmente (c) **extração do cruzamento das vias**.

Na **extração de vias ou rodovias**, diversos métodos foram propostos; citam-se os trabalhos de: Baumgartner *et al.* (1996, 1997, 1999a, 1999b); Baumgartner (1998); Dal Poz e Agouris (2000a, 2000b, 2001); Dal Poz *et al.* (2000c, 2000d, 2003, 2005, 2007, 2009, 2010); Dal Poz (2002); Gwinner *et al.* (1999); Hinz *et al.* (1999); Hinz e Baumgartner (2000); Hinz (2008); Ishibashi (2008); Kumar *et al.* (2006); Maktav (2009); Mayunga *et al.* (2007); Mena (2003); Mirnalinee *et al.* (2009); Pateraki e Baltasvias (2002 e 2003); Santos *et al.* (2006); Sarabandi *et al.* (2004); Steger (1996, 2000); Steger *et al.* (1997); Shukla *et al.* (2002); Wiedemann (2002); Zhou *et al.* (2005); dentre outros.

Dentre os trabalhos citados na extração de vias ou rodovias, Steger *et al.* (1997) propõem um “método automático aplicado em cena de área rural” para extrair malhas viárias a partir da extração de pontos como borda do cruzamento de vias ou finais de longos segmentos de rodovias gerando as hipóteses de conexão entre os vértices e, portanto, a extração da malha viária. As hipóteses analisadas levam em consideração pontos na imagem que apresentem menor distância entre si e que pertençam a uma borda. Para avaliar a conexão entre os segmentos e a probabilidade de pertencer ao objeto rodovia o método proposto utiliza a teoria dos conjuntos Fuzzy.

Zhou *et al.* (2005) propõem um “método semi-automático aplicado em cena de área urbana” onde a extração de vias é baseada em um ponto de referência obtido na imagem por um operador humano. O método é composto por três módulos: (a) módulo de pré-processamento onde é aplicado um filtro Gaussiano para suavização da imagem; (b) módulo de estimação da largura da via baseado no perfil de gradiente gerado a partir do ponto de referência inicialmente inserido pelo operador; (c) módulo de referência inicial e extração de perfil, onde o operador captura dois pontos do eixo da via permitindo ao sistema (com o uso de retas paralelas e análise do gradiente das bordas) fazer uma varredura do início ao final do eixo traçado, determinando um perfil médio de referência, de largura e de características da via. A extração é realizada através da aplicação da estimativa recursiva do perfil médio de referência ao longo dos pixels da via. Quando há falha no perfil de referência o operador insere um novo ponto de referência e a aplicação inicia o traçado do eixo de onde parou. Esta intervenção faz com que a extração possa ser realizada mesmo com obstruções de veículos, sombras, pontes e mudança de superfícies das vias.

Ishibashi (2008) propõe um “método automático aplicado em cena de área rural” para a extração de segmentos de rodovias onde, o realce da rodovia é realizado através da redução da resolução da imagem com aplicação do espaço-escala, e a extração de segmentos de rodovias através da aplicação de detector de linhas baseados em bordas paralelas, apresentado por Steger (2000). Também são apresentados métodos para a seleção automática dos limiares de histerese e dos fatores de escalas utilizados no detector de linhas.

Na **extração do eixo das vias ou rodovias**, diversos métodos foram propostos; citam-se os trabalhos de: Ameri (2008); Baumgartner *et al.* (2002); Heipke *et al.* (1997); Hinz e Baumgartner (2002); Ishikawa (2008); Vale (2003, 2004); Vosselman e Knecht (1995); Zhou (2006); dentre outros.

Dentre os trabalhos citados na extração do eixo das vias ou rodovias, Vosselman e Knecht (1995) e Baumgartner *et al.* (2002) propõem um “método semi-automático aplicado em cena de área urbana” para a extração dos eixos das vias através da análise do grau de similaridade (em inglês, *matching*) do valor de intensidade do tom de cinza. O método utiliza os filtros de Kalman para a predição

do traçado da via “em cenas de área urbana”, enquanto que o de Baumgartner *et al.* (2002) aplica o método dos mínimos quadrados “em cenas de área rural”.

Vale (2003) propõe um “método semi-automático aplicado em cena de área rural” para a extração do eixo da rodovia utilizando programação dinâmica modificada. A metodologia baseou-se no algoritmo de programação dinâmica, apresentado por Dal Poz e Agouris (2000b), acrescentando ao modelo proposto de rodovia (função objetivo) informações de borda antiparalelas propostas por Nevatia e Babu (1980). Estas informações levam em consideração aspectos peculiares às bordas das vias que são: (a) antiparalelismo: dois vetores gradientes, de pixels situados em margens opostas e pertencentes ao mesmo corte transversal da rodovia possuem mesma direção e sentidos opostos; (b) perpendicularismo: vetores gradientes de pixels de bordas da rodovia são aproximadamente perpendiculares ao eixo da rodovia; (c) a magnitude dos pixels de borda, mostram que as bordas devem ser consideradas como um máximo local. A modificação proposta permitiu o uso do algoritmo em imagens de média e alta resolução espacial.

Ishikawa (2008) propõe um “método automático aplicado em cenas de áreas rurais” para a extração dos eixos das rodovias a partir de imagens digitais pancromáticas de alta resolução espacial, onde são aplicados operadores morfológicos que reconstróem os trechos das rodovias degradados pela presença de árvores, sombras e automóveis. Para análise da completeza, precisão e qualidade da rodovia detectada, foi utilizado o software L-CAT, com testes de *buffers* de 1 e 2 pixel, que compara a localização dos pixels do eixo da rodovia detectada com eixos traçados via digitalização de cartas ou rastreamento dinâmico com GPS.

Na **extração do cruzamento das vias**, citam-se os trabalhos de: Barsi *et al.* (2002); Gautama *et al.* (2004); Gerke (2006); Hinz *et al.* (1999); Hosomura (2008); Lin *et al.* (2008); Mayer *et al.* (1998); Ravanbakhsh *et al.* (2007); Silva e Dal Poz (2003); Teoh e Sowmya (2000); Wiedemann (2002); Zanin (2004); Zhang (2003); dentre outros.

Dentre os trabalhos citados na extração do eixo de vias ou rodovias, Teoh e Sowmya (2000) propõem um “método automático aplicado em cena de área rural” para a extração de cruzamentos baseado em aprendizado de máquina com o algoritmo C4.5, proposto por Quinlan (1993), aplicado sobre um conjunto de regras de decisão com o reconhecimento em quatro níveis, detecção dos segmentos de

vias, junção dos segmentos de vias, detecção e junção dos cruzamentos de vias. As regras são baseadas em atributos da via como largura máxima e mínima entre bordas, a direção paralelas das bordas, gradiente das bordas, média de tons de cinza dentro e fora das vias. Os atributos são combinados para detectar e extrair os cruzamentos de vias com dois ramos de vias em forma de “L”; três ramos “Y” e “T”; quatro ramos “X” e “+”, e cinco ramos.

Barsi *et al.* (2002) propõem um “método automático aplicado em cena de área rural” para a extração dos cruzamentos de vias em ortoimagens de alta resolução espacial utilizando redes neurais artificiais *feed-forward*. O algoritmo trabalha com duas estratégias: a detecção de bordas com o algoritmo de Canny (1986) que é aplicado em toda a imagem, e a obtenção do diâmetro do círculo (utilizado para definir os cruzamentos das vias) que será aplicado em uma janela de varredura sobre a imagem com o objeto de encontrar os cruzamentos e não cruzamento. O primeiro passo do algoritmo é definir um conjunto de treinamento básico obtendo cruzamentos e não cruzamentos aproximados; o segundo passo é aplicar o conhecimento adquirido no primeiro passo com o objetivo de refinar o conjunto de treinamento básico eliminando as janelas que não pertencem à classe cruzamento, obtendo-se assim o conjunto de treinamento final. A partir da janela de varredura o algoritmo calcula o diâmetro do círculo usando os métodos de análise discriminante, componente principal e fator de análise de variância, escolhendo dentre estes métodos aquele que apresenta melhor separação do conjunto de dados inicial em cruzamento e não cruzamento. Este processo é repetido até a obtenção de um conjunto refinado que contenha somente cruzamentos.

Zanin (2004) propõe um “método automático aplicado em cena de área rural” para a extração dos cruzamentos de rodovias no qual a imagem original de média resolução é reamostrada em baixa resolução espacial onde as rodovias são modeladas como linhas (DAL POZ, 2002). O eixo da rodovia é extraído com o algoritmo de Canny modificado (DAL POZ e AGOURIS, 2000a). Sobre este eixo extraído são geradas sequências de segmentos conectados de retas nos quais se aplicam um limiar de proximidade que permite calcular a largura da rodovia e encontrar o ponto de referência do cruzamento. O ponto de referência é utilizado para extrair os fragmentos do cruzamento das rodovias presente na imagem.

Ravanbakhsh *et al.* (2007) propõem um “método automático aplicado em cena de área rural” que utiliza o cruzamento dos vetores dos eixos de vias existente em bases cartográficas como ponto de referência para localizar e extrair na imagem digital o delineamento do cruzamento das vias. A abordagem é dividida em três etapas gerais: (a) pré-análise dos dados geoespaciais: analisa as características técnicas dos mapas e das imagens aéreas disponíveis; (b) extração dos segmentos de rodovia: a partir da localização da rodovia no mapa são geradas as hipóteses de rodovia e a extração dos segmentos; e (c) junção e reconstrução das rodovias: realiza a junção dos segmentos e a reconstrução através da análise geométrica e radiométrica da rodovia.

2.2. IMAGEM DIGITAL

A análise de imagens por meio de técnicas de processamento de imagens digitais tem sofrido constantes melhorias. As mudanças na forma de aquisição, processamento, manuseio e geração de produtos a partir de imagens digitais vêm proporcionando uma redução no tempo, no custo da produção e uma melhor interpretação das feições representadas nas imagens digitais.

Uma imagem digital pode ser definida como uma função bidimensional, $f(x, y)$ onde x e y são coordenadas planas espaciais, e f a amplitude de qualquer par de coordenadas (x, y) , conhecida como intensidade ou tom de cinza da imagem neste ponto. Para a obtenção de uma imagem digital são necessários dois elementos: (a) um dispositivo físico denominado sensor, que seja sensível a uma banda do espectro de energia eletromagnética (raios X, ultravioleta, visível, ou banda infravermelho) e que produza um sinal elétrico de saída, proporcional a um nível de energia percebida; e (b) um dispositivo digitalizador para converter o sinal elétrico do dispositivo físico para o formato digital (GONZALEZ e WOODS, 2008).

Os sensores para aquisição de imagem da superfície terrestre são divididos em: **aerotransportados**, com altitude de voo entre 450 m e 12.000 m, e **orbitais** com altitude de voo superior a 12.000 m (FRICKER, 2005b).

De acordo com Petrie e Walker (2006) com base no tamanho do formato da imagem os sensores aerotransportados de aquisição de imagens são divididos em: (a) **pequeno formato**: que geram imagens de até 16 megapixels; (b) **médio**

formato: que geram imagens entre 16 e 50 megapixels; e (c) **grande formato:** que geram imagens acima de 50 megapixels.

Dentre os sensores classificados como de grande formato, citam-se os modelos que operam com: (a) **sensor matricial:** (ITT: Geospatial System; DIMAC: Dimac Systems; DMC Z/I: Intergraph; Ultracam-D e Ultracam-X: Vexcel; STARIMAGER-TLS: Starlabo); (b) **sensor monocromático com linha simples:** (THALES OPTONICS 8010 e 8042: Vinten; GLOBAL SCAN: France); (c) **sensor colorido com linha simples** (VOS 60 e VOS-80: Zeiss; VERIMARC: Verimarc Plus Inc.); (d) **sensores hiperspectral com linha simples:** (ITRES RESEARCH: Canadá; SPECIM: Finlândia, INTEGRATED SPECTRONS: Austrália); (e) **sensor panorâmico com linha simples:** (Goodrich Paranoramic Line Scanner); e (f) **sensor com três linhas** (HRSC-AX e HRSC-AXW: DLR; JAS 150: Jena Optronik, ADS40 e a 2ª geração ADS80: Leica, 3-DAS-1 e 3-OC: Wehril Associates-USA e Geosystems-Ukraine).

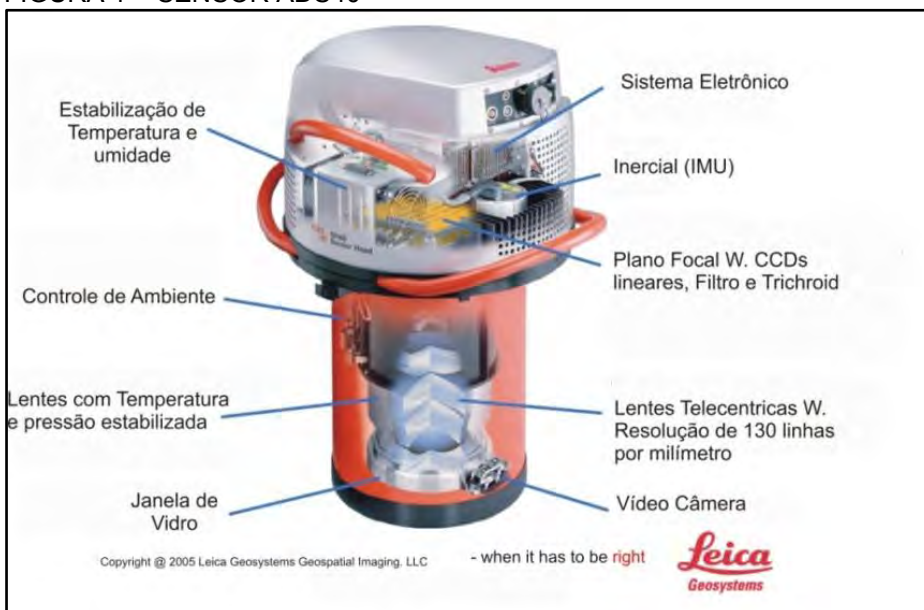
A imagem gerada por estes sensores são classificadas, de acordo com Hinz *et al.* (1999) como: de baixa resolução espacial quando o GSD (em inglês, *Ground Sample Distance*) do pixel é menor do que 1,0 m; de média resolução com GSD no intervalo entre 0,50 m e 1,0m; de alta resolução com GSD menor do que 0,50 m.

A ortoimagem de alta resolução utilizada neste trabalho foi gerada a partir de imagens digitais adquiridas com o sensor aerotransportado ADS 40, cujos detalhes são apresentados a seguir.

2.2.1. Sensor digital aerotransportado - ADS40

Atualmente em sua versão ADS80, o sensor digital aerotransportado ADS40, desenvolvido pela LH Systems em conjunto com o *Deutsche Zentrum für Luft - und Raumfahrt* (Centro Aeroespacial Alemão – DLR) em Berlin (SANDAU *et al.*, 2000), foi lançado no XIX Congresso ISPRS de Amsterdã realizado em Julho de 2000, sendo o primeiro dispositivo imageador digital aerotransportado com capacidade e desempenho, em termos de resolução e cobertura, nas medidas similares as estabelecidas pelas câmaras aéreas analógicas de filmes com formato 23 x 23 centímetros e resolução maior do que 100 linhas por milímetro (FRICKER e ZUBERBÜHLER, 2000). A figura 1 apresenta a composição do sistema ADS40.

FIGURA 1 – SENSOR ADS40



FONTE: FRICKER e GALLO (2005a) – traduzido para o português pelo autor

O ADS40 é composto por: (a) *uma unidade de medida inercial (IMU)*: capaz de determinar continuamente o deslocamento espacial do sensor de forma autônoma, apresentando precisão suficiente para o georreferenciamento direto de imagens digitais (MCMILLAN *et al.*, 1994; CRAMER *et al.*, 2001; CRAMER, 2003), possibilitando a realização de mapeamento com maior flexibilidade e rapidez (RUY, e TOMMASELLI 2004); (b) *um plano focal com quatro conjuntos lineares de CCD*: separados por uma distância de $3,5\mu\text{m}$, formados por dois conjuntos externos com duas linhas de 12.000 pixels operando a banda pancromática e dois conjuntos internos, divididos em um conjunto contendo três linhas de 12.000 pixels que operam as bandas RGB e o outro conjunto também com três linhas de 12.000 pixels que operam duas linhas a banda pancromática e uma linha a banda do infravermelho próximo (em inglês, *Near InfraRed - NIR*), (SANDAU *et al.*, 2000); (c) *um sistema óptico digital*: com uma lente telecêntrica de distância focal de 62,5 mm, tamanho de pixel na imagem de $6,5\ \mu\text{m}$, abertura de visualização no solo com campo de visão FOV (em inglês, *Field of View*) com ângulo de cobertura de 64° , diafragma com abertura f:4, ângulos estéreos de 16° (visada vertical para anterior), 26° (visada posterior para vertical) e 42° (visada anterior para posterior), faixa espectral entre 428 e 887 nanômetro (nm) sendo que a banda do vermelho está no intervalo 608nm e 662nm; a banda verde entre 533nm e 587nm; a banda azul entre

428nm e 492nm; a banda infravermelho 1 entre 703nm e 757nm e a banda infravermelho 2 entre 833nm e 887nm, resolução de 130 linhas por mm, precisão geométrica de 1 μ m, medida dinâmica de 12-bit, resolução radiométrica de 8-bit, vermelho com frequência de 200-800 HZ, capacidade de armazenamento de 200-500 GB, estabilização térmica e barométrica na faixa de alta precisão de +10° até +30°, filtros de bandas e de interferência metálica e filtros para bandas RGB que mantêm a qualidade do campo visual do sensor (SANDAU *et al.*, 2000 e FRICKER e GALLO, 2005a).

As imagens geradas pelo ADS40 podem ser utilizadas na geração de mapeamento topográfico, construção civil, infraestrutura, telecomunicações, energia, agricultura, floresta, seguro, desastres e defesa nacional (HEIER, 1999).

Pesquisas envolvendo o sensor ADS40 demonstram a vantagem e o desempenho do sistema de imagem e navegação (FRICKER *et al.*, 2001; SANDAU *et al.*, 2000); a construção, a geometria e a resolução (SANDAU *et al.*, 2000; ECKARDT *et al.*, 2000; ZHU *et al.*, 2004; CRAMER, 2006), a acurácia e a precisão no uso da imagem na Fotogrametria e no Sensoriamento Remoto (FRICKER *et al.*, 2001; GREEN e LOPEZ, 2007; WASER *et al.*, 2007; DAI *et al.*, 2008; ABDULLAH, 2009), o processamento, a análise da qualidade radiométrica da imagem, a extração de feições por correlação de pixels e a geração de modelos digitais de superfície (GWINNER *et al.*, 1999; NEUKUM, 1999; SCHOLTEN, 2000; PATERAKI e BALTSAVIAS, 2003b; HONKAVAARA e MARKELIN, 2007), a obtenção da aerotriangulação usando os parâmetros determinados pelo sistema de navegação inercial GPS/IMU (HINSKEN *et al.*, 2002), a investigação da acurácia de mapeamentos topográficos (YOTSUMATA *et al.*, 2002) e a comparação radiométrica entre o sensor ADS40 e outros sensores (HONKAVAARA e MARKELIN; 2007).

Para o estudo dos demais sensores aerotransportados citam-se os trabalhos de (FRITSCH, 1997; HAALA *et al.*, 2000; HOFFMANN *et al.*, 2000; LEBERL *et al.*, 2003; TIANEN *et al.*, 2003; WEWEL *et al.*, 1998; PATERAKI e BALTSAVIAS, 2003a).

Neste trabalho sobre a imagem obtida pelo sensor ADS40 foi aplicado o processo de ortorretificação de imagem digital dando a ortoimagem utilizada na segmentação de imagem descrita a seguir.

2.3. SEGMENTAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL

A segmentação de imagem é o processo que consiste na divisão ou separação da imagem em regiões ou objetos com atributos similares ou de mesmas características (IEEE, 1990).

As características dos objetos presentes na imagem podem tomar por base princípios de continuidade, agrupando pixels da imagem de acordo com o grau de uniformidade dos seus tons de cinza ou textura destas regiões, ou de suavidade e continuidade dos limites dos contornos. Pode-se ainda, utilizar como princípio o conhecimento *a priori* de forma, textura ou composição dos objetos que formam a imagem (BORENSTEIN *et al.*, 2004).

O nível de detalhamento da segmentação da imagem é definido de acordo com o problema que se quer resolver, isto é, a segmentação deve parar quando o objeto ou a região de interesse tiver sido detectado (GONZALEZ e WOODS, 2008).

Neste trabalho, a segmentação da imagem é realizada pelo software WEKA, com a aplicação do algoritmo J48, com a técnica de aprendizagem de máquina por indução, que extrai as regras com o conhecimento para a separação dos pixels da imagem nas classes definidas no conjunto de dados de treinamento (amostras).

2.3.1. WEKA

O pacote WEKA é um *software* de domínio público, desenvolvido em linguagem JAVA, disponível na *internet* e distribuído sobre a condição GNU (em inglês, *General Public License*), e tem como principal característica ser portátil e funcional em sistemas operacionais Linux, Unix, Macintosh e Windows (WEKA, 2009).

As pesquisas envolvendo o WEKA demonstram a sua utilização na bioinformática na anotação automatizada de proteínas (KRETSCHMANN *et al.*, 2001; BAZZAN *et al.*, 2002), no diagnóstico de câncer (JINYAN LI *et al.*, 2003), na identificação automática de espécie (MAYO, 2006), e na segmentação de imagens baseadas em regras de conhecimento (LUZ *et al.*, 2009).

O WEKA possui algoritmos para pré-processamento, agrupamento, classificação, regressão, visualização e seleção de características que partem do

pressuposto de que um conjunto de dados de amostra está disponível como um arquivo único, onde cada dado é descrito por um número fixo de atributos (WITTEN e FRANK, 2005).

De acordo com Fayyad e Uthurusamy (2002), uma forma de se executar pesquisa em um conjunto de dados de amostra é através da aplicação de sistemas de aprendizagem de máquina no processo de extração de conhecimento a respeito de um determinado domínio em função de uma base de dados de treinamento em estado bruto.

A aprendizagem de máquina é realizada através da aplicação de algoritmos e técnicas que permitem ao computador aperfeiçoar seu desempenho na execução de tarefas como, por exemplo, a busca de padrões em um conjunto de dados de treinamento.

Basicamente o WEKA possui quatro sistemas de aprendizagem de máquina: (a) **aprendizagem supervisionada (classificação)**: onde a aprendizagem é realizada a partir de um conjunto de dados de amostras, denominado conjunto de dados de treinamento podendo ser aplicada em novos conjuntos de dados; (b) **aprendizagem por associação**: qualquer associação entre as características de um conjunto de dados de amostra são procuradas em outro conjunto de dados; (c) **agrupamentos** (em inglês, *cluster*): grupos de exemplos são procurados em conjunto; e (d) **precisão numérica**: o resultado a ser previsto não é uma classe discreta, mas uma quantidade numérica.

No sistema de aprendizagem supervisionada, utilizado neste trabalho, as classes são previamente definidas por um especialista através da coleta manual de um conjunto de dados de amostra onde estão caracterizados os valores de tons de cinza dos pixels das classes na imagem.

Os algoritmos que trabalham com a aprendizagem supervisionada são preditivos e suas pesquisas, no conjunto de dados de amostra, desempenham inferências nos dados com o intuito de fornecer previsões ou tendências, obtendo informações não disponíveis a partir dos dados disponíveis. A forma mais comum de representação destes algoritmos são as regras de indução por árvores de decisão (SILVA, 2004).

No WEKA o algoritmo J48, proposto por Quinlan (1993), é considerado o algoritmo que apresenta o melhor resultado na montagem de árvores de decisão a

partir de um conjunto de dados de treinamento. Para a montagem da árvore o algoritmo J48 utiliza a abordagem de *dividir-para-conquistar* onde um problema complexo é decomposto em subproblemas mais simples aplicando recursivamente a mesma estratégia a cada subproblema dividindo o espaço definido pelos atributos em subespaços, associando-se a eles uma classe (WITTEN E FRANK, 2005).

A abordagem *dividir-para-conquistar* começa com um conjunto de dados de treinamento (exemplos) e cria uma estrutura em forma de árvore contendo as regras com os atributos que definem as classes. Se os atributos são suficientes, é sempre possível construir uma árvore de decisão que classifica corretamente cada objeto do conjunto de treinamento e estas regras podem ser aplicadas na classificação de novos conjuntos de dados (WITTEN E FRANK, 2005).

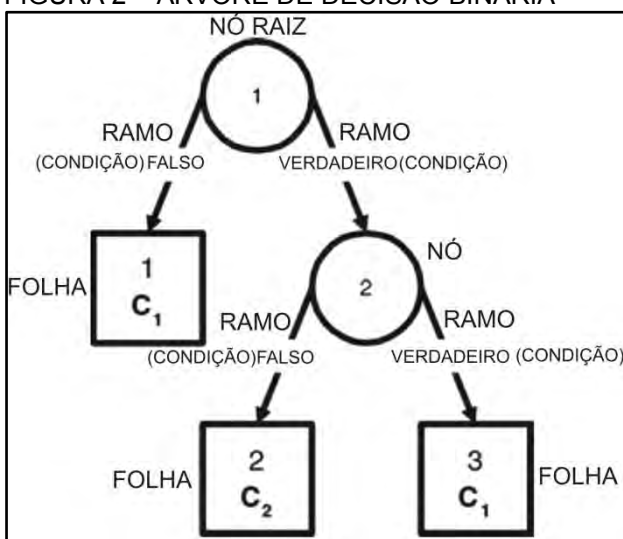
A estrutura desta árvore de decisão é organizada de tal forma que: (a) cada nó (não folha) é rotulado com o nome de um dos atributos previsores; (b) os ramos saindo de um nó são rotulados com valores do atributo daquele nó; (c) cada folha (nó terminal) é rotulada com uma classe prevista para exemplos que pertençam àquele nó folha. O processo de classificação de um exemplo ocorre através de seu caminhamento pela árvore, a partir do nó raiz, procurando percorrer os ramos que unem os nós de acordo com as condições que este ramo representa. Ao atingir um nó folha, a classe que o rotula é atribuída ao exemplo (CARVALHO, 2005).

Cada nó representa um simples teste ou decisão, cada ramo é uma questão de classificação e cada folha é uma partição do conjunto de dados de treinamento com sua classificação (PAULA, 2002).

Em uma árvore binária, por exemplo, a decisão pode ser verdadeiro ou falso. O nó inicial é comumente referido como nó raiz. Dependendo do resultado do teste, a árvore poderá se ramificar à esquerda ou à direita em direção a outro nó. Por fim, o nó folha é alcançado e uma decisão é realizada sendo a classe designada (PAULA, 2002).

A figura 2 apresenta um exemplo de uma árvore de decisão binária.

FIGURA 2 – ÁRVORE DE DECISÃO BINÁRIA



FONTE: WEISS e KULIKOWSKI (1990)

Na figura 2, o círculo com o número 1 (um) representa o nó raiz e o círculo com o número 2 (dois) o único nó não-folha. Os nós representados por um quadrado são as folhas ou nós terminais. Quando um novo caso é apresentado a árvore, os testes representados no nó 1 (um) são considerados por primeiro.

Todos os caminhos numa árvore de decisão são mutuamente exclusivos. Para cada novo caso, um e somente um caminho na árvore deverá ser satisfeito (PAULA, 2002).

O processo de aprendizagem e montagem da estrutura de uma árvore de decisão é conhecido como indução de árvores de decisão (WEISS e KULIKOWSKI, 1990).

A indução busca padrões em informações disponíveis com o propósito de inferir conclusões racionais sobre a informação. A tarefa da indução é desenvolver regras de classificação que podem determinar a classe de um objeto através de seus atributos. Os objetos são descritos em termos de uma coleção de atributos. Cada atributo mede alguma característica importante do objeto formando um conjunto (geralmente pequeno) de valores exclusivos ou valores preditivos onde a classe deste objeto é conhecida (QUINLAN, 1986).

Uma árvore pode ser induzida pela sucessiva seleção e subdivisão dos atributos. O modo de seleção de um atributo é determinado pelo exame de cada atributo, avaliando-se a qualidade ou representatividade do mesmo, de forma a aumentar o desempenho de decisão da árvore. A escolha de atributos

representativos é realizada através de funções de avaliação. O conceito básico da avaliação no processo de divisão é selecionar um atributo que produza a melhor árvore. Porém, a função de avaliação prediz somente um único nó. Deste modo, a função de avaliação precisa descobrir o caminho na árvore, que realiza boas decisões mesmo com informações incompletas. A função de avaliação mais utilizada para a escolha do atributo trabalha pela redução do grau de incerteza no nó corrente (PAULA, 2002).

O algoritmo J48 utiliza como função de avaliação o conceito de entropia da informação, que de acordo com Shannon e Weaver (1949) é a medida da incerteza e do seu complemento associada a uma variável aleatória.

2.3.1.1. O algoritmo J48 na geração de árvore de decisão no WEKA

No WEKA, o algoritmo J48 produz uma árvore de decisão a partir de atributos numéricos e dados incompletos, gerando regras de decisão. Ele trabalha com a produção de um conjunto de regras denominado de “lista de decisão” que é usada na formação de árvores de decisão. O algoritmo programa a sequência mínima de otimização (SMO) utilizada na aprendizagem de máquina para extrair a máxima quantidade de informação de um conjunto de exemplos dada à condição de que somente um atributo será utilizado para realização do teste (WITTEN *et. al.*, 1999).

O conjunto de dados de treinamento “ D ” é formado por amostras (d_1, d_2, \dots, d_k) já classificadas. Cada amostra “ d ” é um vetor (v_1, v_2, \dots, v_k) de valores de atributos ou características da amostra. Alguns testes de limiares “ T ” com resultados mutuamente exclusivos (t_1, t_2, \dots, t_k) são usados para particionar o conjunto de dados de treinamento “ D ” em subconjuntos (C_1, C_2, \dots, C_k) que representam a classe que pertence a amostra. Estes testes são aplicados recursivamente até a montagem final da árvore de decisão (QUINLAN, 1996).

Desde que não haja casos de valores de atributos idênticos que pertençam a diferentes classes, qualquer teste “ T ” que produza uma partição não-trivial de “ D ” conduzirá a um único subconjunto de classes. No entanto, na expectativa de que as árvores menores são preferíveis, uma família de testes possíveis é examinada e um é escolhido para maximizar o valor dos critérios de divisão. Os testes padrões

considerados pelo algoritmo são: (a) $A = \text{desconhecido}$, para um atributo distinto de A , com um resultado para cada valor de A ; e (b) $A \leq \text{limiar } "t"$, para um atributo contínuo de A , com dois resultados, verdadeiro ou falso. Para encontrar o limiar " t " que maximiza o critério de divisão do conjunto de dados, os valores de atributos em " D " são classificados em ordem distintas (v_1, v_2, \dots, v_k). Cada par de valores adjacentes sugerem um potencial limiar (QUINLAN, 1996):

$$t = \frac{(v_k + v_{k+1})}{2} \quad (1)$$

resultando em uma partição correspondente de " D ". O limiar que produz o melhor valor de critério de divisão é selecionado.

O critério de divisão padrão utilizado pelo algoritmo é a relação de ganho, que representa a diferença entre a quantidade de informação necessária para uma predição correta e as correspondentes quantidades acumuladas dos segmentos resultantes após a introdução de um novo teste para o valor de determinado atributo. Para a avaliação do quanto é oportuno a introdução de um novo teste, são considerados dois momentos: o primeiro antes da inserção de novos valores dos atributos, e o segundo depois da sua inserção. Se a quantidade de informação requerida é menor depois que a ramificação é introduzida, isso indica que a inclusão deste teste reduz a entropia (desordem) do segmento original. A construção de uma árvore de decisão é guiada pelo objetivo de diminuir a entropia visando a criação de árvores menores e mais eficazes na classificação (CARVALHO, 2005).

Denota-se por " C " o número de classes e por $p(D, j)$ a proporção de casos em " D " que pertence a " j " classes. A incerteza (entropia) do resultado sobre a classe que pertence o caso " D " é dada por (QUINLAN, 1996):

$$Info(D) = - \sum_{j=1}^C p(D, j) * \log_2(p(D, j)) \quad (2)$$

e as informações correspondentes de ganho para o teste " T " com " k " resultados é dada por (QUINLAN, 1996):

$$Gain(D, T) = Info(D) - \sum_{i=1}^k \frac{|D_i|}{|D|} * Info(D_i) \quad (3)$$

O ganho mede a redução de incerteza causada pela partição dos dados de treinamento de acordo com o valor do atributo. As informações de ganho obtidas com o teste são fortemente afetadas pelo número de resultados e é máxima quando há um caso em cada subconjunto “ D_i ”. Por outro lado, a informação do potencial obtido no particionamento de um conjunto é baseada no conhecimento dos casos de falhas do subconjunto “ D_i ” que particiona a informação (QUINLAN, 1996):

$$Split(D, T) = - \sum_{i=1}^k \frac{|D_i|}{|D|} * \log_2 \left(\frac{|D_i|}{|D|} \right) \quad (4)$$

e tendem aumentar com o número de resultados dos testes.

O critério taxa de ganho é dada pela divisão entre o valor do ganho ($Gain(D, T)$) e o valor da partição ($Split(D, T)$) e expressa a proporção de informação gerada pela ramificação que é utilizada no processo de classificação.

Se a ramificação for trivial (no sentido que cada ramo é associado com apenas um exemplo), o valor da partição será muito pequeno e a taxa de ganho será instável. Para evitar esta situação, o critério taxa de ganho seleciona um teste que maximize o seu próprio valor, sujeito à restrição que o teste escolhido tenha um ganho de informação pelo menos maior que a média do ganho de informação sobre todos os testes avaliados. O algoritmo examina todos os atributos previsores candidatos e escolhe o atributo que maximiza a taxa de ganho e rotula o nó atual da árvore. Este processo é repetido de forma recursiva para dar continuação à construção da árvore de decisão nos subconjuntos residuais (C_1, C_2, \dots, C_k). Porém a árvore assim construída pode estar ajustada demais ao conjunto de dados de treinamento (QUINLAN, 1996).

Uma árvore de decisão (a) está ajustada demais ao conjunto de dados de treinamento se existir uma árvore (a') tal que (a) tenha menor erro que (a') no conjunto de treinamento, porém (a') tem menor erro do conjunto de teste. Para corrigir o fato de uma árvore estar ajustada demais deve-se executar um procedimento de poda da árvore. Existem duas possibilidades de realização de poda

em árvores de decisão: parar o crescimento da árvore mais cedo (pós-poda) ou crescer uma árvore completa e podar a árvore (pós-poda) depois (CARVALHO, 2005).

Segundo Quinlan (1987) a “pós-poda” é mais lenta, porém mais confiável que a “pré-poda”.

O mecanismo de poda, adotado pelo algoritmo J48, é baseado na comparação das taxas de estimativa de erro de cada subárvore e do nó folha. São processados sucessivos testes a partir do nó raiz da árvore, de forma que, se a estimativa de erro indicar que a árvore será mais precisa se os nós descendentes (filhos) de um determinado nós n forem eliminados, então estes nós descendentes serão eliminados e o nó n passará a ser o novo nó folha (CARVALHO, 2005).

Na coleta de dados de aplicação prática, muitas vezes, existem valores perdidos ou que são registrados com inconsistências e isto torna complexa a construção da árvore. Por este motivo os dados exigem a aplicação de critérios capazes de executar a remoção dos erros para facilitar a montagem da árvore de decisão (QUINLAN, 1996).

2.3.1.1.1. Principais conceitos usados na construção de árvore de decisão

A idéia básica para construção de uma árvore de decisão é: (a) escolher atributos significativos que representem o conjunto de dados de treinamento; (b) estender a árvore adicionando um ramo para cada valor de atributo encontrado determinando o conjunto de condições (regras); (c) passar os exemplos para as folhas tendo em conta o valor do atributo escolhido; e (d) para cada folha verificar: (d.1) se todos os exemplos são da mesma classe, associar essa classe à folha; (d.2) senão repetir o processo até encontrar a classe associada à folha (MITCHELL, 1997).

A regra básica de indução que permite a construção de árvores de decisão consiste em uma expressão condicional do tipo: **se**<condição>**então**<consequência. A figura 3 apresenta o algoritmo para a construção de árvore de decisão com aplicação de regras básicas de indução.

FIGURA 3 – ALGORITMO PARA A CONSTRUÇÃO DE ÁRVORE DE DECISÃO

```

/* Conj_Exemplos representa o conjunto de treinamento */
/* Atributo_Meta é o atributo a ser predito pela árvore */
/* Lista_Atributos representa a lista dos outros atributos a serem testados*/

INICIO1 (Conj_Exemplos , Atributo_Meta , Lista_Atributos)
Selecionar o melhor atributo para o nó raiz da árvore, de acordo com função de avaliação
SE todos os exemplos em Conj_Exemplos são de uma única classe
  ENTÃO
    Retornar um único nó com valor da classe
  CASOCONTRÁRIO
    SE Lista_Atributos =  $\varnothing$ 
      ENTÃO
        Retornar um único nó com o valor de Atributo_Meta mais frequente em Conj_Exemplos
      CASOCONTRÁRIO
        INICIO2
          A  $\leftarrow$  o atributo de Lista_Atributos que melhor classifica Conj_Exemplos
          PARA cada valor ( $v_i$ ) possível de A
            Adicionar uma nova ramificação,  $A = v_i$ 
            Criar o subconjunto  $\text{Conj\_Exemplos}_{v_i}$  contendo os exemplos de Conj_Exemplos que
            satisfazem o teste  $A = v_i$ 
            SE  $\text{Conj\_Exemplos}_{v_i} = \varnothing$ 
              ENTÃO
                Criar uma ramificação subordinada ao novo nó com o valor de Atributo_Meta mais
                frequente.
              CASOCONTRÁRIO
                INICIO1( $\text{Conj\_Exemplos}_{v_i}$ , Atributo_Meta, Lista_Atributos - {A})
            FIMSE
          FIMPARA
        FIMINICIO2
      FIMSE
    FIMSE
  Retornar raiz
FIMINICIO1

```

FONTE: MITCHELL (1997)

A partir da montagem da árvore de decisão torna-se possível a extração de conhecimento das classes que compõem o conjunto de dados de treinamento.

2.3.1.2. A extração do conhecimento com WEKA

O processo de extração do conhecimento envolve os seguintes processos:

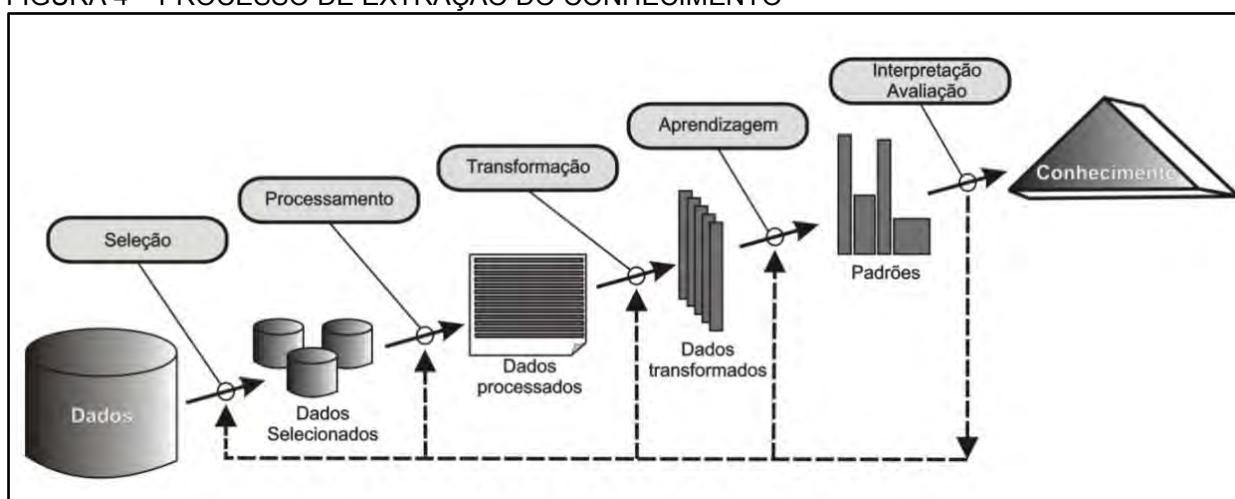
(a) **seleção**: selecionar apenas atributos relevantes do conjunto de dados de treinamento definindo os subconjuntos de dados disponíveis para o algoritmo; (b) **processamento**: onde é realizado a avaliação e a determinação da correção das inconsistências encontradas no conjunto de dados de treinamento removendo registros duplicados e tratando os valores ausentes; (c) **transformação**: onde os dados internos e externos são integrados de maneira eficiente promovendo a:

(c.1) *normalização*: transformação dos seus intervalos originais dos dados para um intervalo específico; (c.2) *discretização de atributos quantitativos*: transformação de

um atributo quantitativo em um atributo qualitativo com faixas de valores; ou (c.3) *transformação de atributos qualitativos em quantitativos*: transformação de um atributo qualitativo em um atributo quantitativo, ou seja, um atributo qualitativo com “*p*” valores diferentes deve ser desmembrado e “*p*” atributos binários; (d) *aprendizagem*: criação de modelos apropriados de representação dos padrões e relações identificadas a partir do conjunto de dados de treinamento, que são empregados para prever os valores de atributos definidos de novos conjuntos de dados; e (e) **interpretação e avaliação**: análise dos resultados obtidos para aplicação dos dados na tomada de decisão para aquisição do conhecimento (PAULA, 2002).

A figura 4 apresenta um desenho esquemático do processo de extração de conhecimento.

FIGURA 4 – PROCESSO DE EXTRAÇÃO DO CONHECIMENTO



FONTE: FAYYAD *et al.* (1996) – traduzido para o português pelo autor

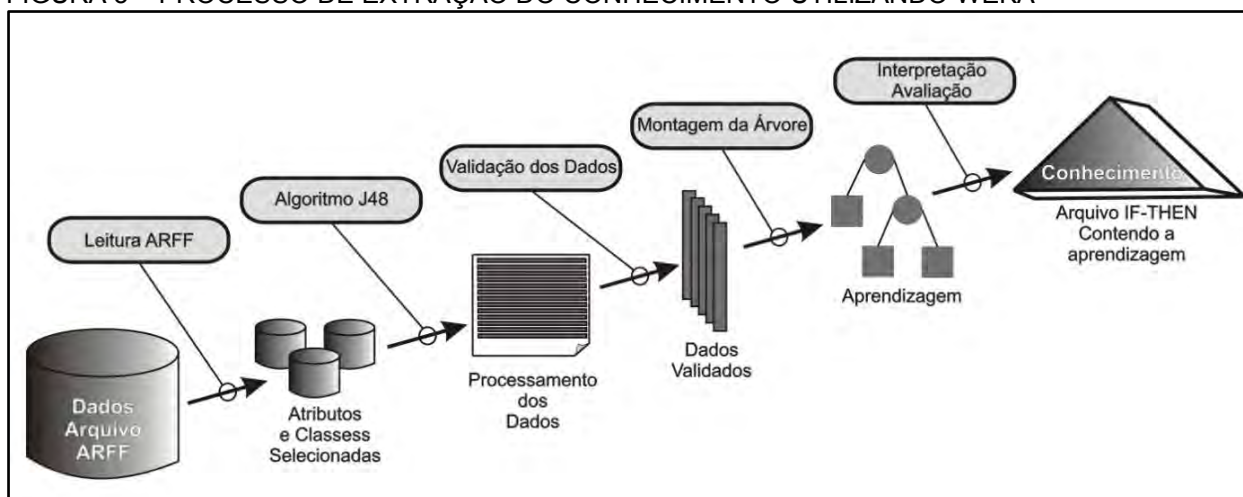
No WEKA a extração do conhecimento, obtido através da aprendizagem da árvore de decisão gerada a partir do conjunto de dados de treinamento com a finalidade específica de classificar objetos utilizando o algoritmo J48, segue os seguintes passos: (a) leitura do arquivo ARFF, com apresentação quantitativa e estatística dos atributos e classes existentes no conjunto de dados de treinamento; (b) escolha do método de classificação, caso deste trabalho, a árvore de decisão; (c) validação dos dados com apresentação do número total de instâncias (exemplos), percentual de instâncias classificadas corretamente e incorretamente, valor do kappa estatístico, erro médio absoluto, erro médio quadrático, percentual relativo do erro absoluto, detalhes da precisão por classe, o peso médio encontrado e a matriz

de confusão das classes; (d) montagem da árvore de decisão; e (e) obtenção do conhecimento através da exportação do arquivo texto, denominado IF-THEN, que contém as regras de decisão da aprendizagem da classificação do WEKA.

O arquivo IF-THEN com a aprendizagem e o conhecimento de como extrair as classes existentes no conjunto de dados de treinamento, é compatível com a linguagem de programação do software MATLAB, e permite a segmentação da ortoimagem.

A figura 5 apresenta o processo de extração do conhecimento utilizando WEKA.

FIGURA 5 – PROCESSO DE EXTRAÇÃO DO CONHECIMENTO UTILIZANDO WEKA



FONTE: FAYYAD *et al.* (1996) – adaptado pelo autor

2.4. EXTRAÇÃO DA MALHA VIÁRIA EM ÁREAS URBANAS

2.4.1. Malha viária em área urbana

A figura 6 apresenta uma porção de uma cena de área urbana formada por uma grande diversidade de objetos antrópicos e naturais podendo-se observar no objeto via – que formam a malha viária – a existência de oclusões provocadas por veículos, árvores e sombras que não permitem a visualização clara da pista ou das bordas que as definem.

FIGURA 6 – EXEMPLO DE MALHA VIÁRIA EM ÁREA URBANA



A extração da malha viária em imagens deste tipo implica na exploração de maiores características do objeto vias e a sua relação com os objetos de fundo (HINZ e BAUMGARTNER, 2000).

Deste modo, na extração da malha viária, é importante considerar dois fatores, a saber: (a) as propriedades e características das vias do mundo real e em imagens aéreas, representando um modelo global de extração de vias derivados dessas propriedades e características; e (b) os diferentes tipos de contextos locais que devem ser atribuídos ao contexto global para a extração das vias (BAUMGARTNER *et al.*, 1999b).

2.4.1.1. Vias no mundo real

As vias são organizadas como uma rede de malha viária que conectam zonas habitadas e exploradas pelos seres humanos. Quanto mais densa a área habitada, maior a intensidade de uso da malha viária. De acordo com a sua importância, os componentes das malhas viárias são classificados em hierarquia de diferentes categorias e atributos. As vias de grande importância possuem raios de maior curvatura e encostas mais suaves sendo construídas com longos aterros, pontes ou túneis.

Alguns atributos importantes para a malha viária são o tipo e o estado do material da superfície da via; a existência de faixas, calçadas, ciclovias, e placas com indicação das regras de trânsito (BAUMGARTNER *et al.*, 1999b).

2.4.1.2. Vias em imagens aéreas

O registro de vias em imagens aéreas depende da resolução espacial do sensor que capturada a imagem. Por exemplo, em imagens de baixa resolução espacial as vias aparecem como linhas que formam uma rede de malha viária mais ou menos densa, já em imagens de alta resolução espacial as vias são projetadas como regiões homogêneas alongadas com largura quase constante (BAUMGARTNER *et al.*, 1999b).

2.4.1.3. Modelagem da malha viária

A malha viária pode ser modelada através de dois modelos complementares, o modelo intrínseco e o contextual. O modelo intrínseco descreve os conhecimentos ligados apenas à malha viária, dando origem a três modelos intermediários: (a) **modelo geométrico**: agrupa os elementos geométricos da rodovia, tais como a largura, o antiparalelismo dos lados e a curvatura; (b) **modelo radiométrico**: descreve a característica de reflectância de rodovia; e o (c) **modelo topológico**: descreve a estrutura da malha viária como arcos que representam as vias e nós que representam as interseções das vias (DAL POZ, 2000a).

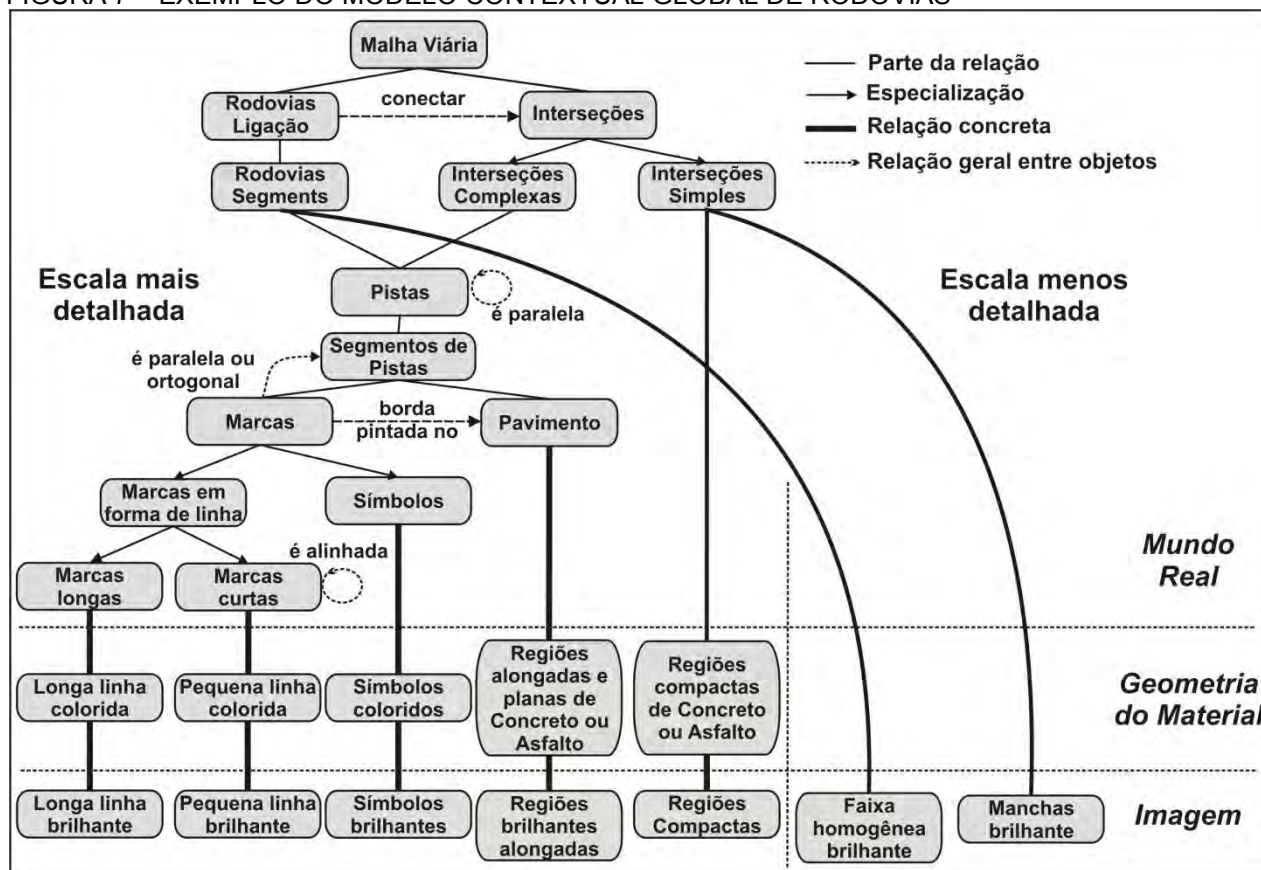
As informações sobre a imagem e suas condições podem ser exploradas através de hipóteses que sejam satisfeitas, e isto pode ser feito, através de modelos de regiões de interesse. O contexto é restrito ao conhecimento sobre as relações do objeto de interesse e os objetos de fundo, dividindo-os em contexto local e global. No modelo contextual global são usados os atributos específicos da rodovia agrupado-as em regiões mais ou menos homogêneas (BAUMGARTNER *et al.*, 1997; DAL POZ, 2000a).

Hinz e Baumgartner (2002) aperfeiçoou o modelo contextual global de rodovias proposto por Baumgartner *et al.* (1997), apresentando alterações nos atributos da imagem e na geometria do material que compõe a via, além de,

acrescentar o trabalho com segmentos de vias, interseções simples e complexas de cruzamentos de vias.

A figura 7 apresenta o modelo contextual global de malha viária proposto por Hinz e Baumgartner (2002).

FIGURA 7 – EXEMPLO DO MODELO CONTEXTUAL GLOBAL DE RODOVIAS

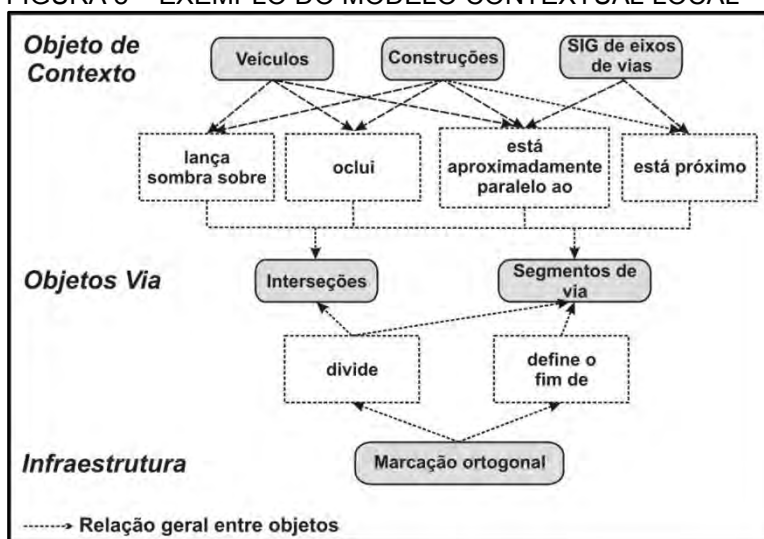


FONTE: HINZ e BAUMGARTNER (2002) – traduzido para o português pelo autor

No modelo contextual local da figura 8 pode-se verificar, as relações entre as vias e os objetos de fundo (árvores, edifícios e veículos) com capacidade de obstruir parcialmente a rodovia, provocando perturbações no modelo, tais como: o não paralelismo entre bordas e a diferença de homogeneidade na rodovia (BAUMGARTNER *et al.*, 1999b).

A figura 8 apresenta o modelo contextual local de malha viária proposto por Hinz e Baumgartner (2002).

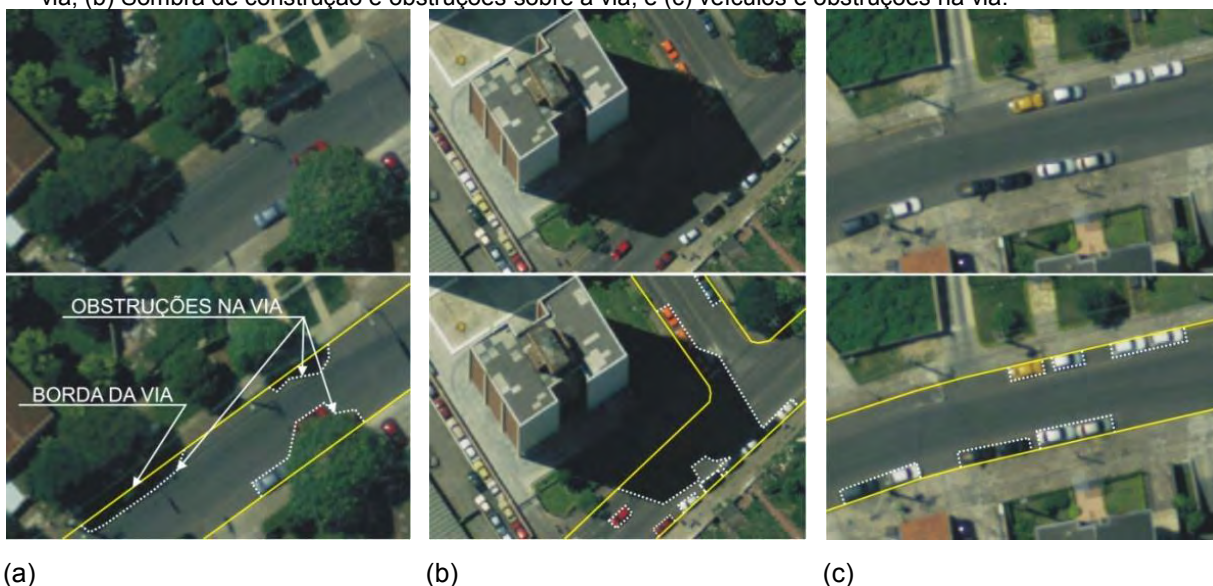
FIGURA 8 – EXEMPLO DO MODELO CONTEXTUAL LOCAL



FONTE: HINZ e BAUMGARTNER (2002) – traduzido para o português pelo autor

A figura 9 apresenta exemplos um modelo contextual local e as perturbações do modelo ocasionada por obstruções de objetos como árvores, projeções de sombras e veículos.

FIGURA 9 – EXEMPLO DO MODELO CONTEXTUAL LOCAL. (a) copas das árvores, sombras e obstruções na via; (b) Sombra de construção e obstruções sobre a via; e (c) veículos e obstruções na via.



A necessidade de incorporar objetos em contextos locais mais amplos, ao invés de tratá-los como entidades independentes, deve-se às seguintes considerações: (a) o aparecimento na imagem de objetos variáveis, não só devido à variabilidade de forma intrínseca, mas também devido às condições de visualização (como por exemplo, a resolução, a oclusão e a iluminação); e (b) alguns objetos

(como diferentes vegetações) não podem ser definidos facilmente (STRAT e FISCHER, 1991).

2.4.2. Princípios da extração da malha viária

De uma forma geral, os métodos de extração de malha viária são divididos em quatro etapas: (a) **extração de fragmentos de rodovia**: considera as características locais da rodovia (por exemplo, as bordas) com solução apresentada em duas etapas: (1) detecção de pontos sementes; e (2) extração dos fragmentos de rodovia; (b) **conexão dos fragmentos de rodovia**: conectar os fragmentos extraídos para construir segmentos de rodovias ligando regiões de intersecção; (c) **geração da malha viária**: detecção de pontos onde dois ou mais segmentos de rodovia se conectem promovendo a conexão; (d) **complementação da malha viária**: verificação da malha viária com complementação e correção das possíveis falhas (DAL POZ, 2000a).

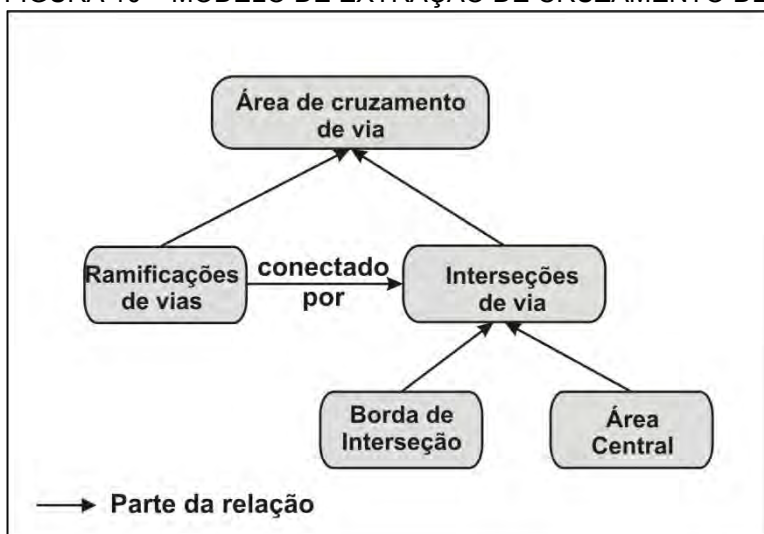
2.4.3. Cruzamento (intersecção) de vias em malha viária

2.4.3.1. Modelagem de Ravanbakhsh *et al.* (2007) para intersecção de via

No modelo conceitual proposto por Ravanbakhsh *et al.* (2007), ver figura 10, o cruzamento da via é composta de duas partes: ramificação e intersecção. A ramificação é o ramo – pista de rolamento – que forma a via e a intersecção o local onde os ramos de vias estão conectados, sendo composto pela borda da intersecção e pela área central do cruzamento. Um ramo de via é definido em termos de: (a) **geometria**: onde se considera o ramo como um objeto retilíneo representado com largura constante e duas bordas paralelas; e (b) **radiometria**: onde se considera um ramo como uma região homogênea, com alto contraste em seu em torno. O brilho depende do material da superfície da via. Os distúrbios causados por oclusões e sombras não estão incluídos no modelo.

A figura 10 apresenta o modelo de extração de cruzamento de via proposto por Ravanbakhsh *et al.* (2007).

FIGURA 10 – MODELO DE EXTRAÇÃO DE CRUZAMENTO DE VIA



FONTE: RAVANBAKHS et al. (2007)

No modelo proposto da figura 10, de baixo para cima, a estratégia para extração da área do cruzamento de via consiste de três passos: (a) identificação de dados topográficos relativos às vias existentes em bases geoespaciais são analisados sendo extraídos parâmetros de borda e de área central de cruzamentos de vias; (b) ramos de rodovias e interseções de vias são extraídos de ortoimagem de alta resolução utilizando as informações a priori, obtidas no passo anterior; (c) finalmente a área do cruzamento de vias é reconstruída usando um método baseado em “snakes”. O resultado final é o cruzamento de via contendo todas as bordas e ramos das vias que estão conectados.

Na estratégia semi-automática de extração de cruzamentos de vias deste trabalho, uma modificação será proposta neste modelo.

2.4.3.2. Definição de interseção de vias

Define-se interseção de vias ou cruzamentos de vias como sendo a área em que duas ou mais vias se unem ou se cruzam, abrangendo todo o espaço destinado a facilitar os movimentos dos veículos que por ela circulam. As interseções constituem elementos de descontinuidade em qualquer malha viária e representam situações críticas que devem ser tratadas de forma especial (BRASIL, 2005).

De acordo com Dal Poz (2002) no processo de extração da malha viária, a etapa de detecção e extração dos cruzamentos de vias é essencial para a geração da malha viária.

Embora importantes, os cruzamentos de vias, são raramente abordados em metodologias de extração de rodovias (BARSÍ *et al.*, 2002; RAVANBAKHSÍ *et al.*, 2007).

Diferentes tipos de interseções de vias são projetados possuindo diferentes propriedades e especificações de construção (RAVANBAKHSÍ *et al.*, 2007).

2.4.3.3. Tipos de interseções de vias

De acordo com BRASIL (2005) basicamente, as interseções são classificadas em duas categorias gerais, conforme os planos em que se realizam os movimentos de cruzamento: (a) **interseções em nível**; e (b) **interseções em níveis diferentes (interconexões)**.

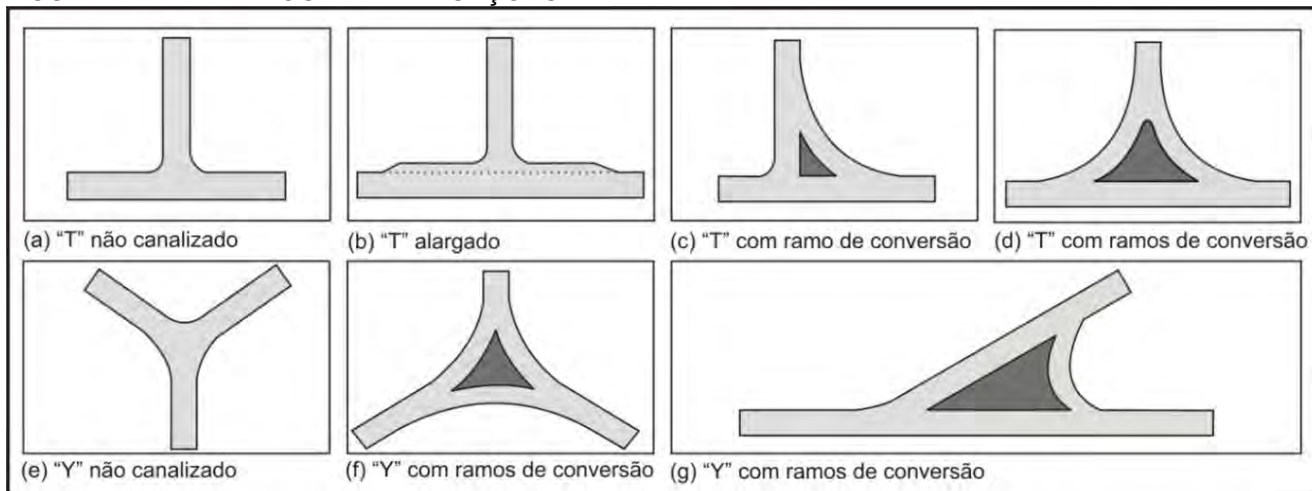
2.4.3.3.1. Interseções em nível

Como o nome indica, são interseções em que as correntes de tráfego devem convergir, divergir ou cruzar sem o auxílio de obras de arte, ou seja, devem utilizar a mesma área (SENÇO, 1980).

As interseções em nível podem ser definidas: (a) **em função do número de ramos** (pistas que conectam vias que se interceptam ou as ligam a outras vias ou ramos): (a.1) interseção de três ramos “T” ou “Y”; (a.2) interseção de quatro ramos “+”; e (a.3) interseção de ramos múltiplos; (b) **em função das soluções adotadas**: (b.1) mínima – sem nenhum controle especial; gota – adota uma ilha direcional; (b.2) canalizada – movimento do tráfego com trajetórias definidas pela sinalização horizontal; (b.3) rótula (rotatória) – tráfego se move no sentido anti-horário ao redor da ilha central; e (b.4) rótula vazada – correntes diretas de tráfego da via principal atravessam uma ilha central, em torno da qual as demais correntes circulam no sentido anti-horário; (c) **em função do controle de sinalização**: (c.1) sem sinalização semafórica – típica de zonas rurais; e (c.2) com sinalização semafórica –

típica de zonas urbanas (BRASIL, 2005). A figura 11 apresenta exemplos interseções do tipo “Y” e “T”.

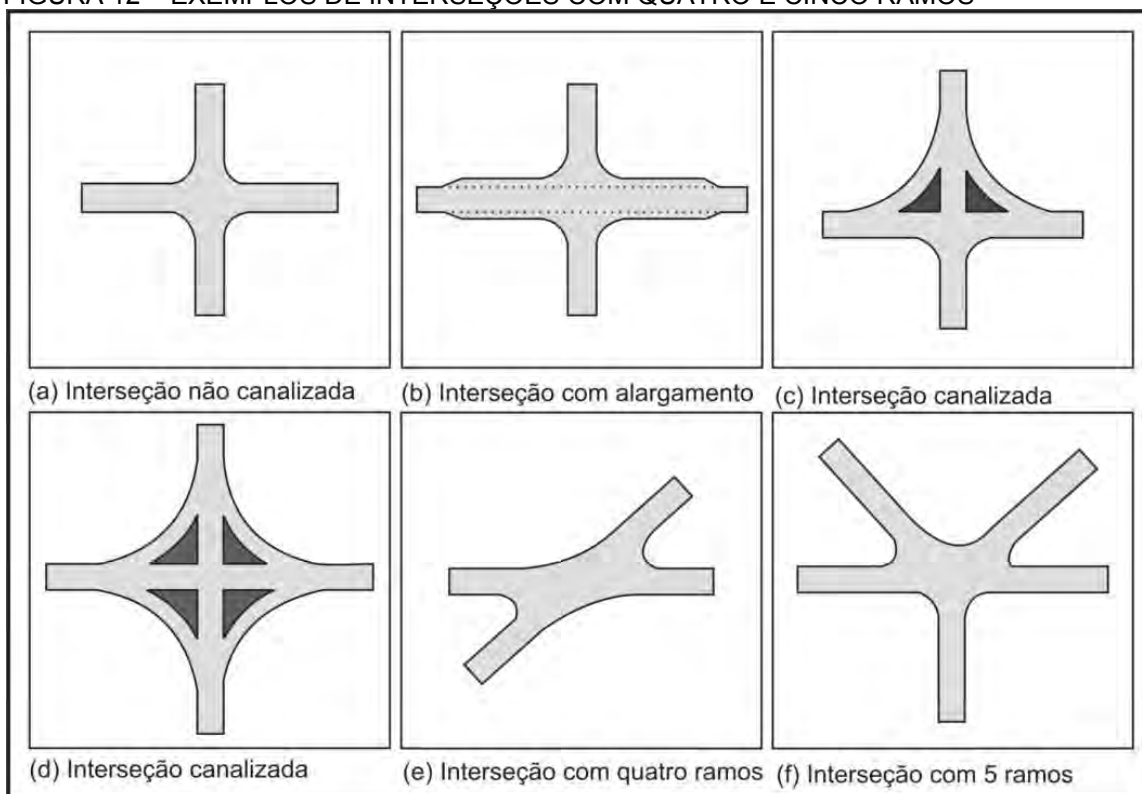
FIGURA 11 – EXEMPLOS DE INTERSEÇÕES “Y” E “T”



FONTE: SENÇO (1980)

A figura 12 apresenta exemplos de interseções do tipo quatro ramos e ramos múltiplos.

FIGURA 12 – EXEMPLOS DE INTERSEÇÕES COM QUATRO E CINCO RAMOS



FONTE: SENÇO (1980)

2.4.3.3.2. Interseções em níveis diferentes (interconexões)

Interseções em níveis diferentes podem ser definidas como um sistema de intercomunicação de vias, com um ou mais cruzamentos em níveis diferentes, assegurando a interligação das correntes de tráfego provindos de duas ou mais vias em níveis diferentes. Uma interconexão difere de um cruzamento simples em desnível, por promover pelo menos uma conexão entre as vias que se cruzam. Os conflitos de cruzamento são eliminados pela separação de nível e os conflitos de conversão são minimizados, dependendo do tipo de conexão (SENÇO, 1980).

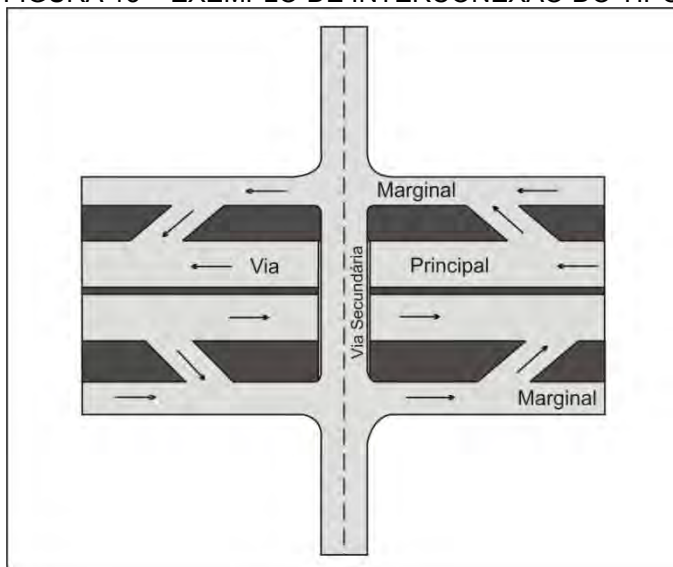
As interseções em níveis diferentes podem ser de dois tipos:

- **cruzamentos em níveis diferentes sem ramos:** quando não há trocas de fluxos de tráfego entre as rodovias que se interceptam, ou seja, o cruzamento em desnível não tem ramos de conexão. As vias se cruzam em níveis diferentes por meio de estruturas de separação dos greides (perfil do eixo de uma via). Esses cruzamentos são designados por: (a.1) passagem superior – quando a rodovia principal passar sobre a via secundária; e (a.2) passagem inferior – quando a rodovia principal passar sob a via secundária (BRASIL, 2005);
- **interconexão:** quando, além do cruzamento em desnível, a interseção possui ramos que conduzem os veículos de uma via à outra. Normalmente as interconexões são classificadas em sete tipos básicos: (b.1) interconexão em “T” ou “Y” – interconexão com três ramos; (b.2) diamante: interconexão em que a via principal apresenta, para cada sentido, uma saída à direita antes do cruzamento e uma entrada à direita após o mesmo. As conexões na via secundária são interseções em nível; (b.3) trevo completo: interconexão em que, nos quatro quadrantes, os movimentos de conversão à esquerda são feitos por laços (em inglês, *loops*) e à direita por conexões externas aos laços; (b.4) trevo parcial: interconexão formada pela eliminação de um ou mais ramos de um trevo completo, apresentando pelo menos um ramo em laço; (b.5) direcional: interconexão que utiliza ramos direcionais para os principais movimentos de conversão à esquerda; (b.6) semidirecional: interconexão que utiliza ramos

semidirecionais para os principais movimentos de conversão à esquerda; (b.7) giratório: interconexão que utiliza uma interseção rotatória (rótula) na via secundária (BRASIL, 2005)

A figura 13 apresenta um exemplo de interseção com interconexão do tipo diamante.

FIGURA 13 – EXEMPLO DE INTERCONEXÃO DO TIPO DIAMANTE



FONTE: SENÇO (1980)

Nas imagens dos experimentos deste trabalho, são extraídas vias com interseção de três ramos “T” ou “Y” e interseção de quatro ramos “+” (em formato de cruz), em função de serem estes os tipos de interseções encontradas nas imagens.

2.5. MORFOLOGIA MATEMÁTICA

A Morfologia Matemática (MM) surgiu por volta do ano de 1964, com George Matheron e Jean Serra que decidiram experimentar uma abordagem singular para extrair informação de imagens a partir de transformações de formas realizadas através de dois operadores ou transformações elementares denominados dilatação e erosão. A palavra morfologia vem do grego e significa estudo (i.e. *logia*) das formas (i.e. *morphos*). As dilatações e erosões são elementos fundamentais para construir uma ampla classe de operadores conhecidos por subconjuntos, que quando aplicados têm certas características semelhantes aos operadores lineares:

(a) a cada dilatação ou erosão podemos associar um único subconjunto, denominado de elemento estruturante, e a cada subconjunto podemos associar uma única dilatação ou erosão; e (b) o transformado de um subconjunto por uma dilatação ou erosão é a multiplicação deste subconjunto pelo elemento estruturante de dilatação ou erosão (BANON e BARREIRA, 1994).

A linguagem matemática da morfologia está baseada na teoria dos conjuntos e pode ser aplicada no processamento de imagens digital para, realce, filtragem, restauração, segmentação e esqueletização, ou ainda, nos arranjos e inter-relacionamentos existentes entre as partes de um objeto detectado na imagem. Ela consiste em extrair as informações relativas à geometria e a topologia de um conjunto desconhecido, por exemplo, uma imagem digital, através do uso de um elemento estruturante, gerando uma nova imagem (GONZALEZ e WOODS, 2008).

2.5.1. Operadores morfológicos

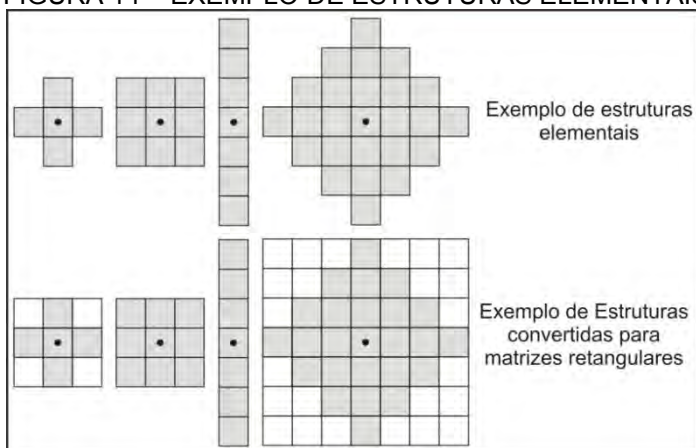
2.5.1.1. Elemento estruturante

De acordo com Facon (1996), o elemento estruturante é um conjunto complemento definido e conhecido (forma, tamanho), o qual é comparado, a partir de uma transformação, ao conjunto desconhecido da imagem. Essa ferramenta também dispõe de algumas vantagens como a simplicidade de implementação.

Para o trabalho com imagens digitais é necessário que o elemento estruturante seja uma matriz retangular. Isto é conseguido acrescentando-se, em estruturas elementais, o menor número possível de elementos de fundo necessário para formar a matriz retangular.

Na figura 14 a primeira linha apresenta exemplos de estruturas elementais e a segunda linha a transformação desses elementos para a forma de matrizes retangulares transformando-os em elementos estruturantes.

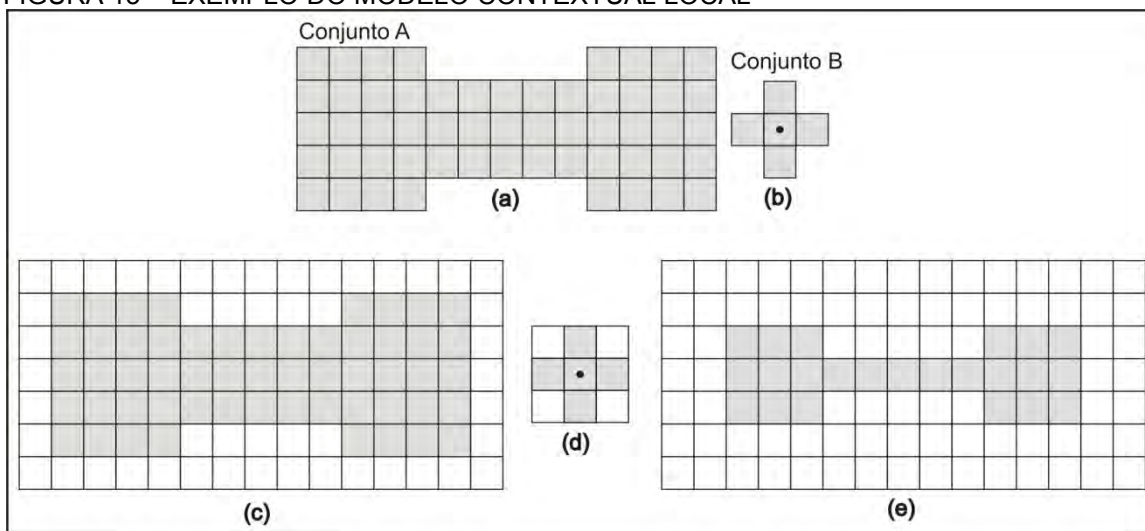
FIGURA 14 – EXEMPLO DE ESTRUTURAS ELEMENTAIS E ELEMENTOS ESTRUTURANTES



FONTE: GONZALEZ e WOODS (2008)

Para uma introdução de como os elementos estruturantes são usados na morfologia: a figura 15 (a) e (b) apresenta dois exemplos de estruturas elementais simples; como mencionado anteriormente uma implementação requer que os conjuntos “A” e “B” sejam convertidos para matrizes retangulares adicionando-se elementos de fundo nas estruturas elementais. Esta adição pode ser vista na figura 15 (c) e (d). A matriz retangular, figura 15 (d), de dimensão 3 x 3 pixels com origem definida em seu centro é definida como elemento estruturante.

FIGURA 15 – EXEMPLO DO MODELO CONTEXTUAL LOCAL



FONTE: GONZALEZ e WOODS (2008)

Supondo que seja executada uma operação de convolução onde, sobre a matriz “A”, figura 15 (c), é aplicado o elemento estruturante “B”, figura 15 (d), pode-se gerar uma nova matriz retangular (novo conjunto) após atingir todos os elementos

de "A". A cada deslocamento da origem de "B" sobre "A", se "B" está contido completamente em "A", os elementos mais escuros de "B" serão marcados como membros do novo conjunto. O resultado desta operação de convolução pode ser visto na matriz retangular apresentada na figura 15 (e). Este conceito forma a base para a compreensão da aplicação dos operadores morfológicos.

De acordo com Facon (1996) a discussão de morfologia passa pelo estudo de dois operadores morfológicos básicos: (a) **a erosão**: em que os pixels que não atendem a um dado padrão são eliminados da imagem; e (b) **a dilatação**: em que uma pequena área relacionada a um pixel é alterada para um dado padrão.

2.5.1.2. Operadores morfológicos básicos

Considerando que uma imagem digital é formada por uma grade representada pela função $f(x, y)$. Nesta função (x, y) são valores pertencentes ao conjunto de números inteiros "Z" e representam o par de coordenadas do centro de cada célula da grade de um produto Cartesiano " Z^2 " que forma o conjunto de todos os pares ordenados de elementos (z_i, z_j) pertencentes a "Z". A função f , atribui o valor de intensidade (que é um número pertencente ao conjunto dos números reais "R") de cada par de coordenadas distintas (x, y) . Se o valor da intensidade também for inteiro, "Z" substitui "R", e uma imagem digital então se torna uma função 2-D cujas coordenadas e o valor de amplitude são inteiros podendo assim ser aplicadas nas operações de morfologia matemática (GONZALEZ e WOODS, 2008).

Desta forma se "A" e "B" são conjuntos em " Z^2 ", representando respectivamente, a matriz da imagem original e a matriz do elemento estruturante, os operadores morfológicos básicos de erosão e dilatação são descritos.

2.5.1.2.1. Erosão

De acordo com Gonzalez e Woods (2008), a erosão basicamente encolhe uma imagem e pode ser vista como uma transformação morfológica que combina dois conjuntos usando vetores de subtração. A erosão de "A" pelo elemento estrutural "B", denotada por $A \ominus B$, é definida como:

$$A \ominus B = \{z \mid (B)_z \subseteq A\} \quad (5)$$

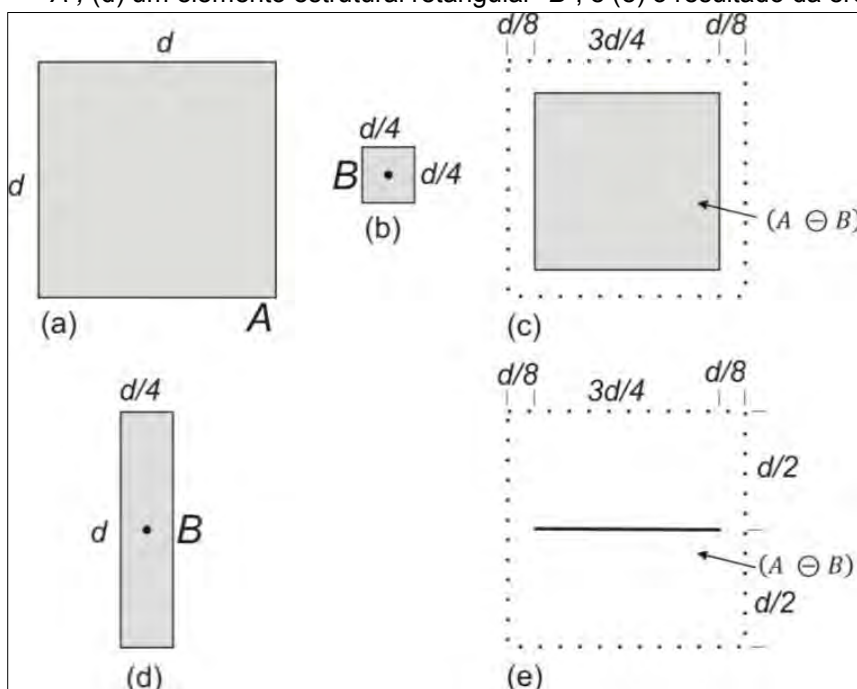
Onde o símbolo “ \ominus ” representa a operação de erosão.

Em outras palavras, a equação (5) indica que, a erosão de “A” por “B”, é o conjunto de todos os pontos “z” tal que “B”, transladado por “z”, está contido em “A”. O conjunto “B” é assumido com um elemento estruturante. A equação (5) é a formulação matemática do exemplo apresentado na figura 15 (e). A afirmação de que “B” tem que estar contido em “A” é equivalente a dizer que “B” não partilham qualquer elemento comum com o fundo, desta forma, podemos expressar a erosão na seguinte forma:

$$A \ominus B = \{z \mid (B)_z \cap A^c = \emptyset\} \quad (6)$$

Onde, A^c é o complemento de “A” e \emptyset é o conjunto vazio. A figura 16 mostra um exemplo da aplicação do operador morfológico de erosão.

FIGURA 16 – OPERADOR MORFOLÓGICO DE EROSIÃO. (a) representa o conjunto “A”; (b) o elemento estrutural quadrado “B”; (c) o resultado da erosão de “A” por “B”, sendo, o espaço aparente entre a linha pontilhada e a linha sólida do conjunto “A” o local onde a origem do elemento estruturante “B” está contida no conjunto “A”, e por este motivo, foi apagado no conjunto “A”; (d) um elemento estrutural retangular “B”; e (e) o resultado da erosão de “A” por “B”.



FONTE: GONZALEZ e WOODS (2008).

2.5.1.2.2. Dilatação

De acordo com Gonzalez e Woods (2008), a dilatação é uma transformação morfológica que combina dois conjuntos usando adição vetorial. A dilatação de “A” pelo elemento estrutural “B”, denotada por $A \oplus B$, é definida como:

$$A \oplus B = \{z \mid (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (7)$$

Onde o símbolo “ \oplus ” representa a operação de dilatação.

Esta expressão é baseada na reflexão de “B” sobre a sua origem, transferindo essa reflexão por “z”. A dilatação de “A” por “B” então é o conjunto de todos os deslocamentos, tal que \hat{B} e “A” sobreponham pelo menos um elemento. Baseado nesta interpretação a expressão (7) pode ser escrita como equivalente a:

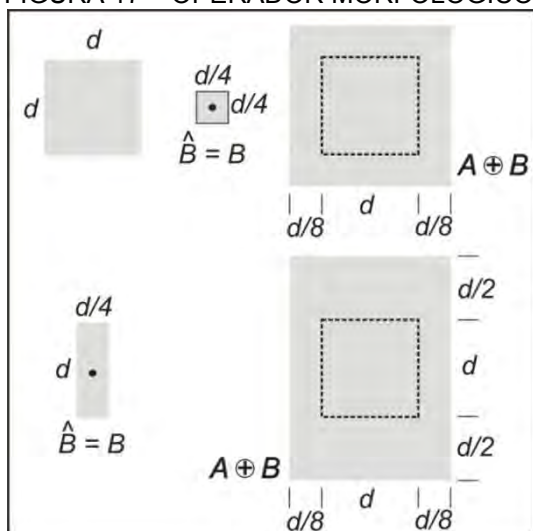
$$A \oplus B = \{z \mid [(\hat{B})_z \cap A] \neq \emptyset\} \quad (8)$$

Como antes, assume-se que “B” é um elemento estruturante e “A” é um conjunto (imagem objeto) a ser dilatado. O processo básico de rotacionar “B” sobre sua origem e sucessivamente deslocá-lo para que deslize sobre o conjunto “A” é análogo a uma convolução espacial. A dilatação é baseada em operações de conjunto e, portanto uma operação não-linear, enquanto a convolução é uma operação linear. Ao contrário da erosão que é uma operação de diminuição e afinamento, a dilatação aumenta e engrossa objetos em uma imagem binária. A forma específica e extensão desse aumento do objeto são controladas pela forma do elemento estrutural utilizado.

A figura 17 mostra um exemplo da aplicação do operador morfológico de dilatação com os seguintes itens: (a) representa o conjunto A; (b) o elemento estrutural quadrado B (neste caso $\hat{B} = B$ porque o elemento estruturante tem o mesmo centro como origem); (c) a linha pontilhada mostra o conjunto original de referência e o limite além do qual qualquer deslocamento da origem de \hat{B} por z pode causar na intercessão de \hat{B} sobre A se este estiver vazio; (d) um elemento estrutural

retangular B destinado a alcançar maior dilatação vertical do que horizontal; e (e) o resultado da dilatação de A por \hat{B} .

FIGURA 17 – OPERADOR MORFOLÓGICO DE DILATAÇÃO



FONTE: GONZALEZ e WOODS (2008).

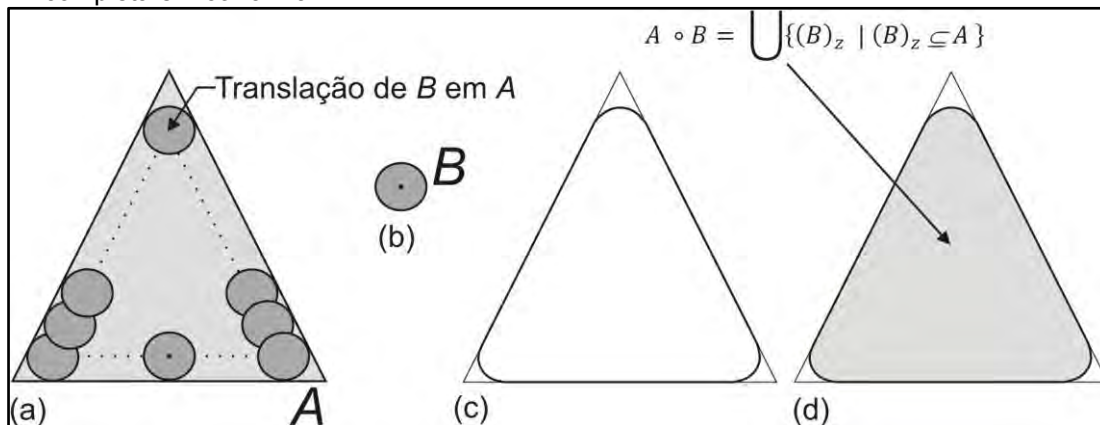
2.5.1.2.3. Abertura

De acordo com Gonzalez e Woods (2008), a abertura em geral suaviza o contorno dos objetos, quebra istmos estreitos, e elimina saliências finas. A abertura de “ A ” pelo elemento estrutural “ B ”, denotada por $A \circ B$, é definida como:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (9)$$

Onde o símbolo “ \circ ” representa a operação de abertura de “ A ” por “ B ” que é a erosão de “ A ” por “ B ”, seguida de uma dilatação resultada por “ B ”. A operação de abertura é uma simples interpretação geométrica da figura 18. Para explicar-se melhor o conceito de abertura; supondo que vemos o elemento estruturante “ B ” como uma “bola plana rolante”. Os limites de $A \circ B$ são estabelecidos nos pontos em que “ B ” alcança os limites de “ A ” com “ B ” rolando em torno de “ A ”.

FIGURA 18 – OPERADOR MORFOLÓGICO DE ABERTURA. (a) Elemento estruturado “B” transladando ao longo da borda interna de “A” (os pontos indicam a origem de “B”); (b) Elemento estruturado “B”; (c) A linha mais forte é a parte externa da fronteira de abertura; e (d) Abertura completa em cor cinza.



FONTE: GONZALEZ e WOODS (2008).

Esta propriedade geométrica própria do operador de abertura leva a formulação teórica, que afirma que a abertura de “A” por “B” é obtida tomando a união de todas as translações de “B”, que se encaixam em “A”. Isto é, a abertura pode ser expressa de tal forma que:

$$A \circ B = \bigcup \{(B)_z \mid (B)_z \subseteq A\} \quad (10)$$

Onde $\bigcup \{\bullet\}$ denota a união de todos os conjuntos no interior da chave. Em outras palavras, abertura de “A” por “B” é a união de qualquer translação $(B)_z$ tal que “B”, transladado por $(B)_z$ está contido em “A”.

2.5.1.2.4. Fechamento

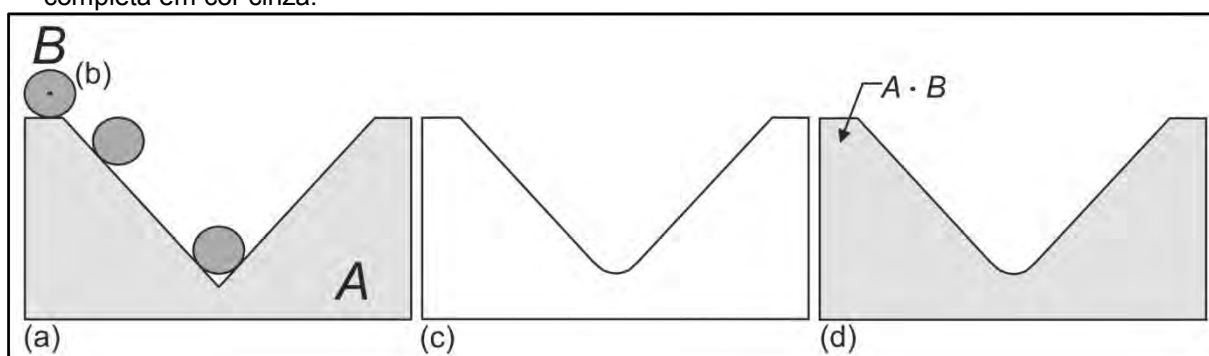
De acordo com Gonzalez e Woods (2008) o fechamento funde pequenas seções de contorno, mas diferente da abertura, ela geralmente funde linhas e pequenas aberturas eliminando-as, preenchendo as interrupções nos contornos. O fechamento de “A” pelo elemento estrutural “B”, denotada por $A \bullet B$, é definida como:

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \quad (11)$$

Onde o símbolo “•” representa a operação de fechamento de “A” por “B” que é a dilatação de “A” por “B”, seguida de uma erosão resultada por “B”. A operação de fechamento dado um ponto é um elemento de $A \bullet B$, se e somente se, $(B)_z \cap A$, for qualquer translação de $(B)_z$ que contiver o ponto.

A figura 19 mostra um exemplo da aplicação do operador morfológico de fechamento.

FIGURA 19 – OPERADOR MORFOLÓGICO DE FECHAMENTO. (a) Elemento estruturado “B” transladando ao longo da borda externa de “A” (o ponto indicam a origem de “B”); (b) Elemento estruturado “B”; (c) A linha indica a borda externa da fronteira de fechamento; e (d) Fechamento completa em cor cinza.



FONTE: GONZALEZ e WOODS (2008).

2.5.2. Algoritmos morfológicos básicos

2.5.2.1. Esqueletização (Afinamento)

A esqueletização pode ser vista como uma erosão condicional onde um objeto é erodido até atingir o menor tamanho possível ou a condição imposta para a esqueletização (JONKER, 2002).

Um método básico para esqueletização (em inglês, *skeletons*) é o afinamento (em inglês, *thinning*) que consiste em remover todos os pixels do contorno do objeto exceto aqueles ao longo do esqueleto. É processo de redução do objeto original para uma versão simplificada que ainda retém as características essenciais do mesmo. A versão afinada do objeto original é chama de esqueleto (GONZALEZ e WOODS, 2008).

O afinamento é uma operação de processamento de imagem na qual as regiões com valores binários são reduzidas às linhas que se aproximam do centro

dessas regiões. Estas linhas geradas são chamadas de esqueletos ou linhas centrais.

O afinamento requer formalidades assim declaradas: (a) as regiões de imagem conectadas devem afinar para estruturas de linhas conectadas; (b) o resultado do afinamento deve manter no mínimo o número de pixel que mantenha conexão com vizinhança 8 (oito); (c) a localização aproximada das linhas finais devem ser mantidas; e (d) os pequenos ramos causados pelo afinamento deve ser minimizados (JAIN *et al.*, 1995).

De acordo com Gonzalez e Woods (2008) o afinamento de um conjunto “A” pelo elemento estruturante “B”, denotado por $A \otimes B$, pode ser definido em termos da transformada de acerto ou erro (em inglês, *hit or miss*), demonstrada a seguir:

$$A \otimes B = A - (A \circledast B)$$

$$A \otimes B = A \cap (A \circledast B)^c \quad (12)$$

Onde o símbolo “ \otimes ” representa a operação de esqueletização e o símbolo “ \circledast ” representa a transformada “hit-or-miss” de “B” em “A”.

De acordo com Facon (1996) a transformada “acerto ou erro” consiste em testar um conjunto “A” de uma imagem a partir de um elemento estruturante e o conjunto complementar “A^c” a partir de outro elemento estruturante. Para isto são necessários dois elementos estruturantes “Bⁱ” e “B^e” que formam um elemento composto que, obrigatoriamente, possuem uma única origem e testa o interior e o exterior do objeto.

A partir do deslocamento do elemento estruturante composto, para toda a posição possível da imagem pode ser feita uma pergunta, para a realização da transformada “acerto ou erro”. “O primeiro elemento estruturante toca o objeto, enquanto, simultaneamente, o segundo elemento estruturante o perde (ou toca o fundo)?”. Se a resposta for positiva, o ponto definido com a origem do elemento estruturante composto é um ponto da imagem transformada (NEVES, 2003)

A expressão usada para o afinamento simétrico de “A” é baseada numa sequência de elementos estruturantes, a saber, (GONZALEZ e WOODS, 2008):

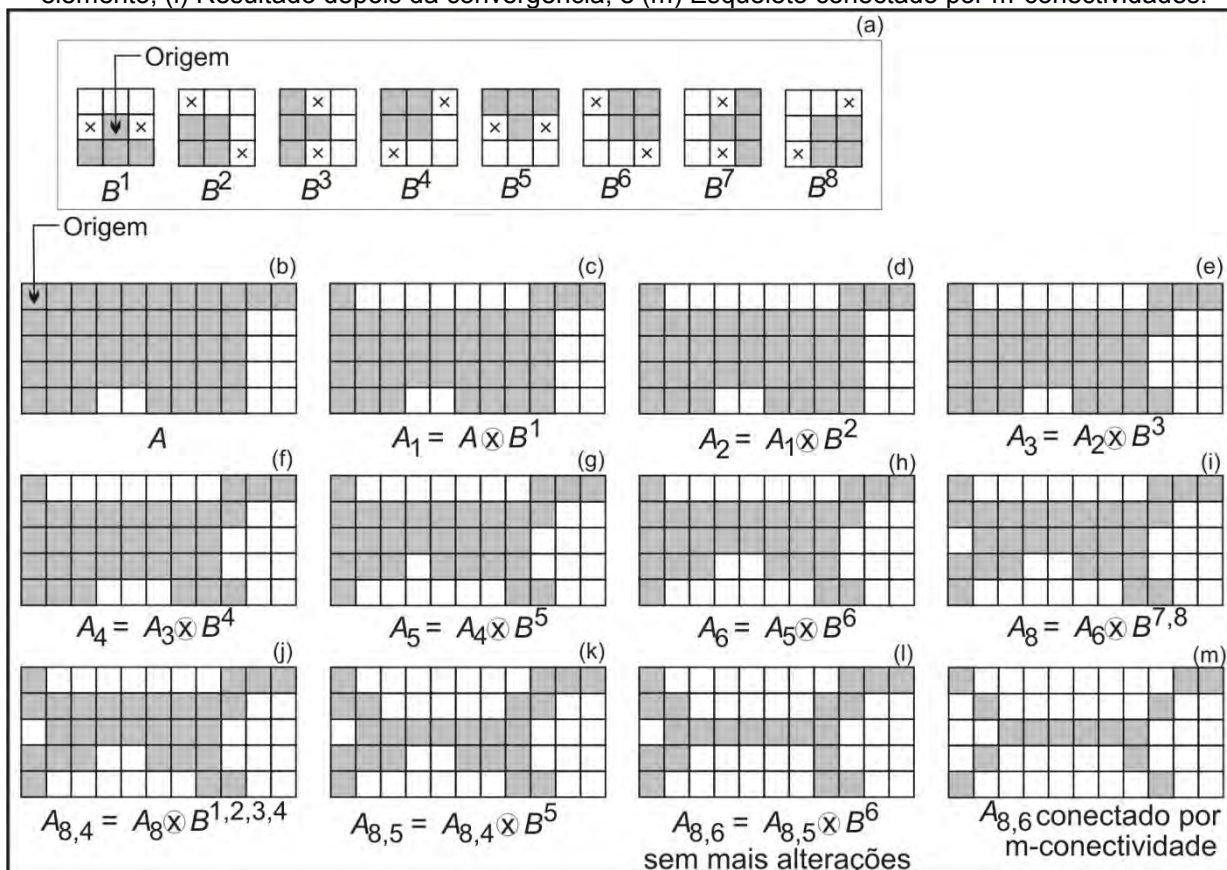
$$\{B\} = \{B^1, B^2, B^3, \dots, B^n\} \quad (13)$$

Onde B^i é a versão rotacionada de B^{i-1} . Usando este conceito, afinamento pode ser definido por uma sequência de elementos estruturais como segue:

$$A \otimes \{B\} = ((\dots (A \otimes B^1) \otimes B^2) \dots \otimes B^n) \quad (14)$$

O processo é afinar "A" pela passagem de B^1 , então afinar o resultado com uma passagem de B^2 , e assim por diante, até que "A" seja afinado com todas as passagens de B^n . Este processo é repetido até nenhuma outra alteração ocorrer. Cada afinamento individual é realizado utilizando a equação (12). A figura 20 apresenta um exemplo de esqueletização.

FIGURA 20 – EXEMPLO DE ALGORITMO DE ESQUELETIZAÇÃO. (a) Sequência de elementos estruturais "B" rotantes usados no afinamento; (b) Conjunto "A"; (c) Resultado do afinamento com o primeiro elemento; (d) até (i) resultado do afinamento com os próximos sete elementos; (j) Resultado usando os quatro primeiros elementos novamente; (k) Resultado usando o quinto elemento; (l) Resultado depois da convergência; e (m) Esqueleto conectado por m-conectividades.



FONTE: GONZALEZ e WOODS (2008).

2.5.2.2. Poda

De acordo com Gonzalez e Woods (2008) o método de poda (em inglês, *prunning*) é um complemento do afinamento e esqueletização, pois estes processos geram pequenos componentes ao longo do esqueleto, que podem ser eliminados com a utilização do processo de poda do esqueleto.

A solução deste problema está baseada na supressão dos pequenos componentes por sucessivas eliminações de pontos finais. É claro que isto também encurta (ou elimina) outros componentes do objeto.

A poda de um conjunto de entrada “A” com uma sequência de elementos estruturados designados para detectar somente pontos finais é realizada através da seguinte definição:

$$X_1 = A \setminus \{B\} \quad (15)$$

Onde $\{B\}$ denota o elemento estruturado mostrado na figura 21 (b) e (c).

A sequência dos elementos estruturados consiste em dois diferentes tipos de estrutura, cada qual rotacionado 90° para um total de oito elementos. O “x” na figura 21 (b) significa uma condição de deleção não importando se o pixel naquele local tem um valor (1). Esta condição pode, por exemplo, eliminar o ponto da oitava linha, quarta coluna do conjunto A figura 21 (a) bem como um ponto final, eliminando e quebrando a conectividade do componente.

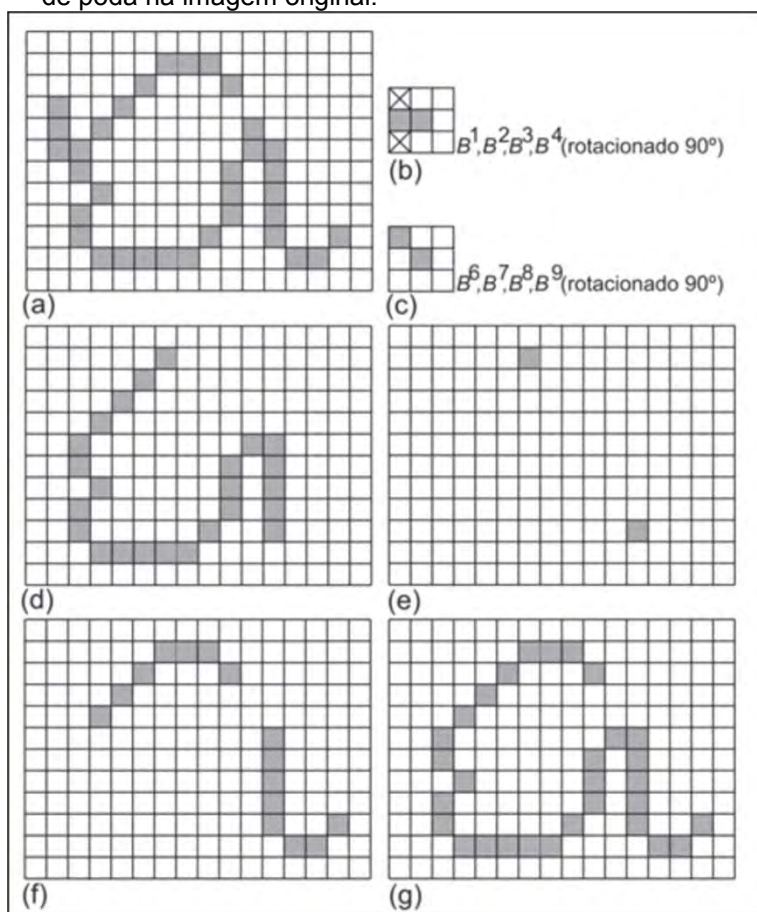
Aplicando a expressão (15) três vezes no conjunto “A” o conjunto X_1 resultante está representado na figura 21 (d). O próximo passo é restaurar o conjunto “A” com a forma original, mas como ele possui pequenos componentes, estes deverão ser removidos. Para fazer esta remoção há necessidade de se formar um conjunto X_2 que contém todos os pontos finais do conjunto X_1 , ver figura 21 (e).

A remoção é realizada através da seguinte definição:

$$X_2 = \bigcup_{k=1}^8 (X_1 \setminus B^k) \quad (16)$$

Onde B^k são os mesmos detectores de pontos finais (elementos estruturantes) mostrados na figura 21 (b) e (c).

FIGURA 21 – EXEMPLO DE ALGORITMO DE PODA. (a) Imagem original; (b) e (c) elementos estruturantes usado na eliminação de pontos finais; (d) Resultado de três ciclos de afinamento; (e) Pontos finais; (f) Dilatação e pontos finais condicionados; (g) Resultado da aplicação do algoritmo de poda na imagem original.



FONTE: GONZALEZ e WOODS (2008).

O próximo passo é a dilatação dos pontos finais, usando o conjunto “A” definido como um delimitador:

$$X_3 = (X_2 \oplus H) \cap A \quad (17)$$

Onde H é um elemento estrutural de dimensão 3 x 3 pixels com valores 1 e a interseção com “A” é aplicada depois de cada passo. Este tipo de dilatação condicional previne a criação de valores unitários em elementos fora da área de interesse, como é mostrado na figura 21 (f). Finalmente, a união de X_3 e X_1 , produz o resultado desejado com a equação apresentada a seguir:

$$X_4 = X_1 \cup X_3 \quad (18)$$

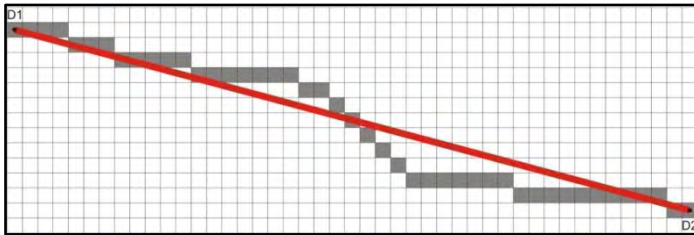
O resultado da aplicação da equação (18) é apresentado na figura 21 (g).

2.6. ALGORITMO DE BRESENHAM

O algoritmo de Bresenham (1965) é um algoritmo criado para o desenho de linhas, em dispositivos matriciais (como por exemplo, um monitor), que permite determinar quais os pontos numa matriz que devem ser desenhados para que se forme uma reta com o efeito “dente de serra” minimizado.

Para descrever o algoritmo se observa que a figura 22 representa (em vermelho) o segmento de reta que une os pontos $D1(x_1, y_1)$ e $D2(x_2, y_2)$, e (em cinza) os pixels, como por exemplo, da borda da via com o efeito “dente de serra”.

FIGURA 22 – BORDA DE UMA VIA COM O EFEITO “DENTE DE SERRA” NOS PIXELS.



A figura 23 representa (em vermelho) o segmento de reta que une os pontos $D_1(x_1, y_1)$ e $D_1(x_2, y_2)$, e (em cinza) os pixels de borda da via com o efeito “dente de serra” minimizado pelo algoritmo de Bresenham (1965).

FIGURA 23 – BORDA DE UMA VIA SEM O EFEITO “DENTE DE SERRA” NOS PIXELS.



O algoritmo de Bresenham (1965) foi inicialmente criado para o controle computacional de operações de desenhos, formados por um par de coordenadas

(x, y) , em dispositivos “plotter”. É um algoritmo incremental, clássico da computação gráfica, que utiliza apenas soma e subtração de inteiros para transformar linhas (segmentos de retas) na forma matricial. Ele reduz o esforço computacional para se desenhar uma reta, bem como, reduz os erros de arredondamento e as operações com pontos flutuantes, pois não realiza divisão entre números inteiros.

Para a discussão, baseado em Esperança (2000), considera-se um segmento de reta cujas coordenadas $D1(x_1, y_1)$ e $D2(x_2, y_2)$, são todas inteiras, pertencentes ao primeiro quadrante e dentro do espaço da imagem respeitando as seguintes relações:

$$0 < x_1 < x_2$$

$$0 < y_1 < y_2$$

$$y_2 - y_1 < x_2 - x_1$$

No algoritmo é avaliado se a linha formada pelo segmento de reta passa acima ou abaixo do ponto médio $(x + 1, y + \frac{1}{2})$.

Uma variável de decisão “ V ”, equação 19, é dada pela classificação do ponto médio com relação ao semi-espaço definido pela reta, como apresentado na figura 56.

$$(ax + by + c = V) \tag{19}$$

Onde

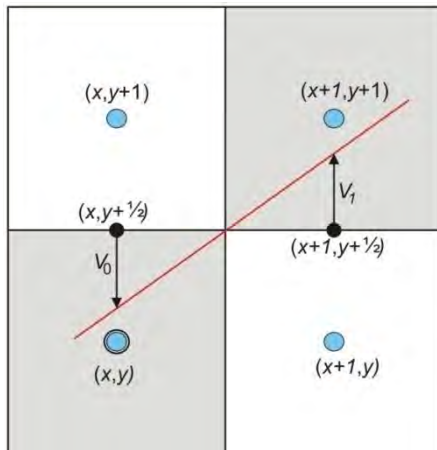
$$V = 0 \rightarrow (x, y) \text{ sobre a reta}$$

$$V < 0 \rightarrow (x, y) \text{ abaixo da reta}$$

$$V > 0 \rightarrow (x, y) \text{ acima da reta}$$

Caso 1 $\rightarrow (V < 0)$: o segmento de reta, representado na cor vermelha, passa abaixo do ponto médio localizado entre o centro do pixel (x, y) e o pixel $(x, y + 1)$, como indicado na figura 24.

FIGURA 24 – ALGORITMO DE BRESENHAM – CASO 1.



Onde teremos:

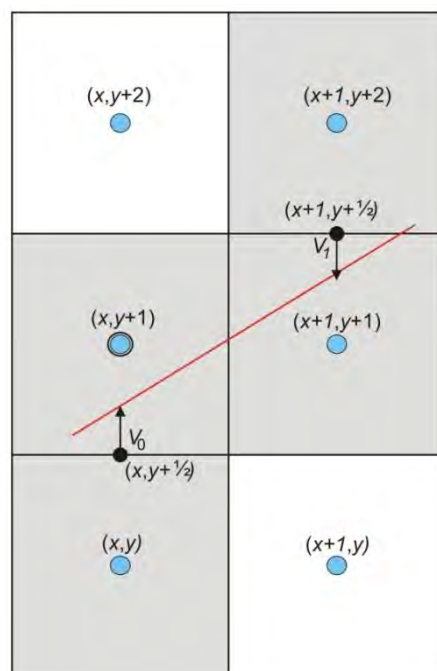
$$V_0 = ax + b(y + 1/2) + c \quad (20)$$

$$V_1 = a(x + 1) + b(y + 1/2) + c \quad (21)$$

$$\therefore V_1 = V_0 + a \quad (22)$$

Caso 2 $\rightarrow (V > 0)$: o segmento de reta, representado na cor vermelha, passa acima do ponto médio localizado entre o centro do pixel (x, y) e o pixel $(x, y + 1)$, como indicado na figura 25.

FIGURA 25 – ALGORITMO DE BRESENHAM – CASO 2.



Onde teremos:

$$V_0 = a(x + 1) + b(y + 1 + 1/2) + c \quad (23)$$

$$V_1 = ax + b(y + 1/2) + c \quad (24)$$

$$\therefore V_1 = V_0 + a + b \quad (25)$$

Em ambos os casos os coeficientes da reta são:

$$a = y_2 - y_1 \quad (26)$$

$$b = x_1 - x_2 \quad (27)$$

$$c = x_2 y_1 - x_1 y_2 \quad (28)$$

Para iniciar o algoritmo, o valor de “V” em $(x_1 + 1, y_1 + 1/2)$ será dado por:

$$V = a(x_1 + 1) + b(y_1 + 1/2) + c \quad (29)$$

$$V = ax_1 + by_1 + c + a + b/2 = \quad (30)$$

$$V = a + b/2, \text{ ou,} \quad (31)$$

$$V = 2 * a + b$$

De acordo com Esperança (2000) podemos resumir a aplicação do algoritmo de Bresenham da seguinte maneira:

$$a \quad y_2 - y_1$$

$$b \quad x_1 - x_2$$

$$V = 2 * a + b$$

$$x \quad x_1$$

$$y \quad y_1$$

Enquanto $x \leq x_2$

 Pintar pixel (x, y)

$$x \quad x + 1$$

 Se $V \leq 0$

$$\text{Então } V \quad V + 2 * a$$

$$\text{Se não } V \quad V + 2 * (a + b); y \quad y + 1$$

Para os demais quadrantes podemos resumir a aplicação do algoritmo de Bresenham da seguinte maneira:

- Se $x_2 < x_1$
Trocar o $D1$ com $D2$
- Se $y_2 < y_1$
 - $y_1 \leftarrow y_1$
 - $y_2 \leftarrow y_2$
 Pintar pixel (x, y)
- Se $|y_2 - y_1| > |x_2 - x_1|$
 - Repetir o algoritmo trocando “y” por “x”

3. MATERIAIS E MÉTODO

Neste capítulo serão apresentados os materiais e a estratégia proposta para a extração do cruzamento de vias em imagens de alta resolução em cenas de áreas urbanas densas.

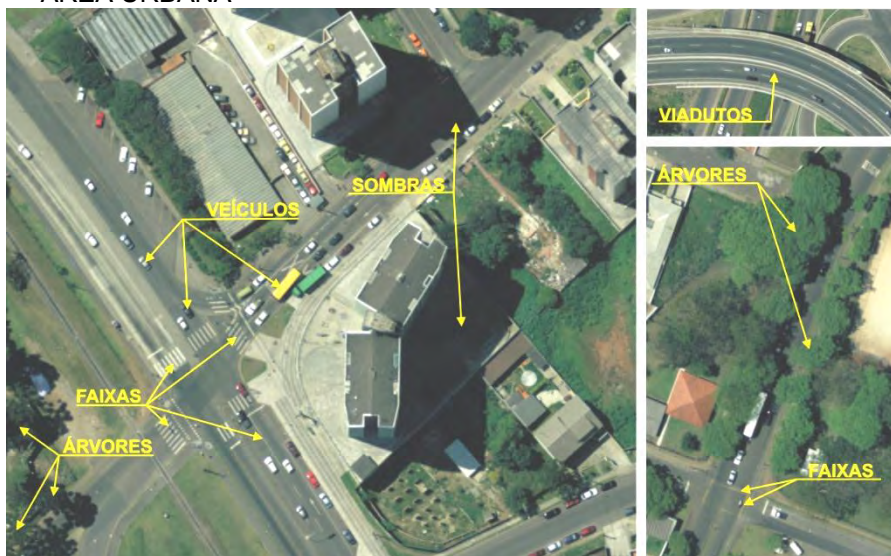
3.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O modelo do cruzamento de vias proposto por Ravanbakhsh *et al.* (2007) não leva em consideração os problemas de deformidades nas bordas e no interior das vias causados por oclusões e sombras que devem ser identificadas e tratadas para que o resultado da separação dos pixels das vias e de seus cruzamentos não sejam prejudicados.

Nas imagens de alta resolução espacial em cenas de áreas urbanas densas, os objetos antrópicos como casas, edifícios, viadutos, veículos, vias, faixas e os objetos naturais como áreas verdes e sombras apresentam uma grande diversidade de tonalidade, tamanho, forma, textura, padrão e localização que dificultam a sua interpretação e extração.

A figura 26 apresenta exemplos dos objetos antrópicos e naturais que podem ser encontrados em uma imagem de alta resolução espacial em cenas de áreas urbanas densas.

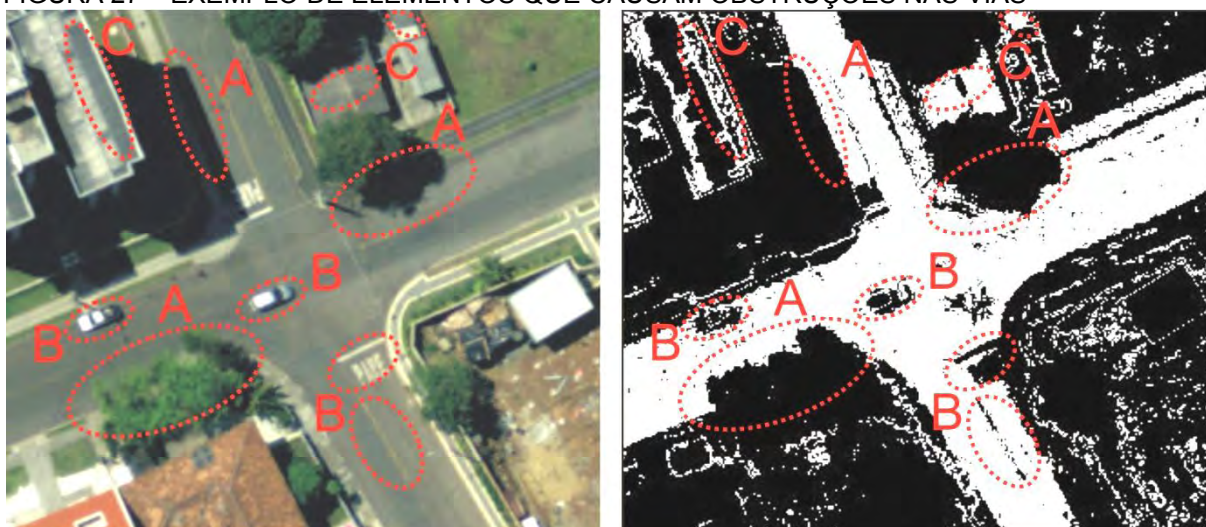
FIGURA 26 – OBJETOS PRESENTES EM UMA PORÇÃO DE IMAGEM DE ALTA RESOLUÇÃO EM ÁREA URBANA



Na figura 26 observa-se que as bordas das vias, na maioria dos casos, encontram-se obstruídas por copas de árvores e projeções de sombras que geram pixels com ausência de tonalidade provocando um estreitamento e a alteração na quantidade de pixels da classe vias. Da mesma forma se observa, no interior das vias, a presença de veículos e faixas que provocam vazios (*gaps*) nestas regiões da imagem. Outra particularidade observada é que os telhados, muitas vezes, possuem tonalidade e texturas similares ao tipo de pavimentação existente nas vias e isto pode classificar inadequada estes pixels como pertencentes à classe vias.

A figura 27 ilustra exemplos de vazios que podem ocorrer durante o processo de extração do objeto vias.

FIGURA 27 – EXEMPLO DE ELEMENTOS QUE CAUSAM OBSTRUÇÕES NAS VIAS



A figura 27 apresenta um cruzamento de via, em uma imagem de alta resolução em área urbana, cuja imagem da esquerda é a imagem original, e a imagem da direita sua representação na forma binária, apresentada pelos pixels resultantes da classificação do objeto vias. A letra “A”, na figura 27, representa o efeito da projeção de sombras de edifícios e copas de árvores sobre as bordas da via, a letra “B” o vazio causado por veículos e faixas sobre a pista de rolamento das vias e a letra “C” a classificação errônea de pixels da classe do objeto telhado (classificados como pertencentes à classe do objeto vias).

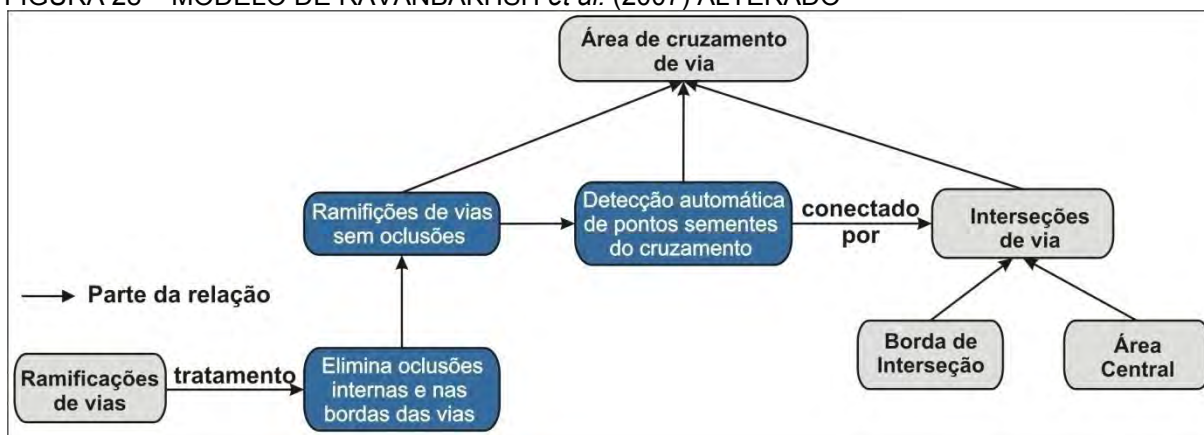
Desta forma, a metodologia descrita a seguir apresenta soluções que melhoram a eficiência da classificação dos pixels da classe vias, bem como a detecção, delineamento e a extração do cruzamento de vias em imagens de alta resolução espacial de cenas de áreas urbanas densas.

3.2. MODELO PROPOSTO PARA A EXTRAÇÃO DO CRUZAMENTO DE VIAS

A classificação inadequada e a alteração da quantidade de pixels alteram o formato das vias existentes na imagem e estes fatores devem ser levados em consideração para que haja maior eficiência e melhor separação dos pixels desta classe.

Para tanto, apresentamos na figura 28, em azul, a inserção de três novos processos no modelo de Ravanbakhsh *et al.* (2007).

FIGURA 28 – MODELO DE RAVANBAKHSH *et al.* (2007) ALTERADO



O primeiro processo, apresentado na figura 28, é o tratamento para eliminação das oclusões internas e nas bordas das vias; o segundo, a separação dos pixels da classe vias sem as oclusões e o terceiro a detecção automática de pontos sementes do cruzamento da via que auxilia na extração da área do cruzamento de via.

Os processos inseridos no modelo de Ravanbakhsh *et al.* (2007) fazem parte da estratégia semi-automática para extração do cruzamentos de vias em ortoimagem de alta resolução espacial em cenas de áreas urbanas densas, descritas como se segue.

3.3. ESTRATÉGIA PROPOSTA PARA EXTRAÇÃO DO CRUZAMENTO DE VIAS

De forma generalizada a estratégia semi-automática proposta para a extração do cruzamento de vias pode ser dividida nas seis etapas descritas a seguir:

Na **etapa 01** – seleção da ortoimagem existente nas proximidades do Campus do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná.

Na **etapa 02** – coleta manual, sobre a ortoimagem da etapa 01, de um conjunto de dados de amostra contendo pixels das classes existentes na imagem, gerando um arquivo de texto com o conjunto de dados, no padrão do ENVI.

Na **etapa 03** – o arquivo de texto com o conjunto de dados de amostra obtido na etapa 02 é transformado pelo aplicativo Módulo (1) ENVI/ARFF, desenvolvido em linguagem C++ BUILDER 6.0, em um arquivo de texto no padrão ARFF que é inserido no WEKA.

Na **etapa 04** – o arquivo de texto ARFF, obtido na etapa 03, é inserido no software WEKA que, baseado no algoritmo J48 (QUINLAN, 1986), gera um arquivo de texto denominado WEKA, que contém a árvore de decisão com as faixas de valores de tons de cinza das classes oriundas do conjunto de dados de amostras.

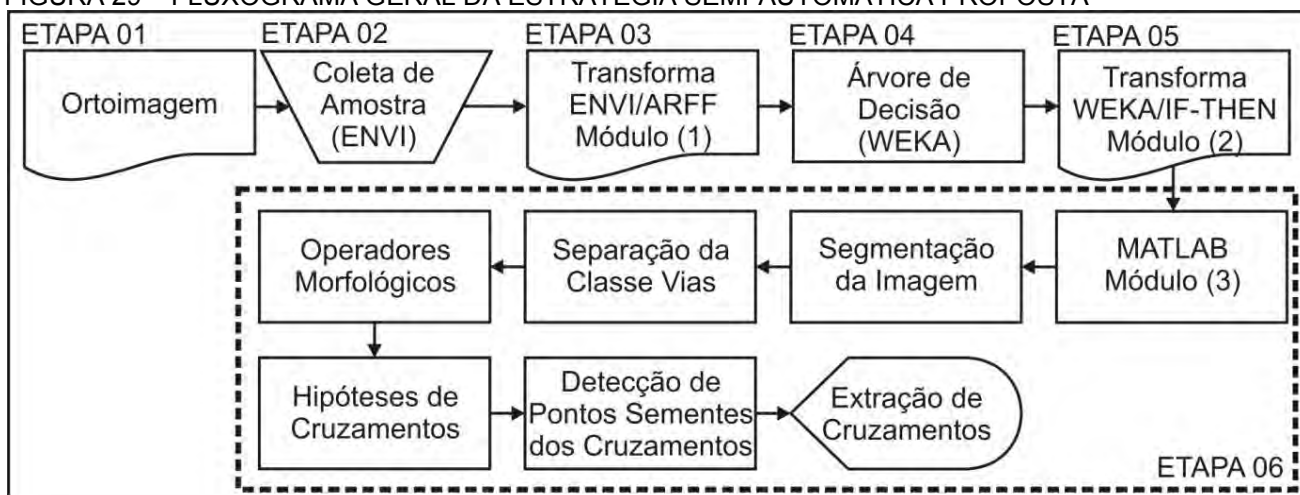
Na **etapa 05** – o arquivo de texto WEKA, obtido na etapa 04, é transformado pelo aplicativo denominado Módulo (2) WEKA/IF-THEN, também desenvolvido em linguagem C++ BUILDER 6.0, em um arquivo de textos no padrão IF-THEN que contém as regras de decisão da classificação dos pixels da imagem.

Na **etapa 06** – o arquivo de texto no padrão IF-THEN, obtido na etapa 05, é inserido no Módulo (3), desenvolvido em MATLAB, onde são realizadas mais doze

processos, a saber: (a) a segmentação da imagem; (b) a classificação dos pixels nas classes definidas no conjunto de dados de amostras; (c) a separação dos pixels pertencentes à classe de objeto vias; (d) a aplicação do filtro de mediana; (e) a utilização do primeiro operador morfológico em forma de disco; (f) a utilização de um segundo operador morfológico utilizado para definição das fronteiras do objeto vias; (g) a determinação dos polígonos da classe vias; (h) a separação e ordenamento dos polígonos da classe vias pelas quantidades totais de pontos que os definem; (i) o preenchimento dos vazios causados pelas obstruções de objetos sobre a pista e a deleção dos polígonos classificados como vias, mas que são pertencentes a outras classes; (j) a aplicação do terceiro operador morfológico para geração do esqueleto que define o eixo das vias; (k) a aplicação do quarto operador morfológico que executa a poda do esqueleto melhorando a qualidade do eixo das vias; (l) a detecção das hipóteses dos cruzamentos; e finalmente (m) a extração dos cruzamentos de vias.

A figura 29 apresenta o fluxograma geral da estratégia semi-automática proposta para a extração do cruzamentos de vias em imagens de alta resolução espacial de cenas em áreas urbanas densas.

FIGURA 29 – FLUXOGRAMA GERAL DA ESTRATÉGIA SEMI-AUTOMÁTICA PROPOSTA



A estratégia semi-automática proposta é apresentada a seguir.

3.4. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA (ETAPAS 01 A 06)

3.4.1. Ortoimagem (Etapa 01)

A ortoimagem nas bandas RGB utilizada nos experimentos deste trabalho, foi gerada a partir da ortorretificação de imagens de um sobrevoo realizado na data de 28/10/2006, a uma altura aproximada de 2.800 m, com o sensor aerotransportado ADS40 da Leica e apresenta em sua composição uma cena de área urbana densa, localizada nas proximidades do Campus do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em Curitiba - PR.

A ortoimagem tem resolução espacial de 0,20 m e foi gerada a partir, de uma nuvem de pontos de vetores de curvas de nível com equidistância de 1 em 1 m, dos dados de posicionamento GPS e navegação inercial, aplicados na fototriangulação das imagens aéreas adquiridas no sobrevôo (sentido Leste-Oeste).

As operações de sobrevôo e ortorretificação foram realizadas pela empresa Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A.

As coordenadas da ortoimagem estão referenciadas ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), cujo Datum planimétrico é o vértice Chuá, localizado em Minas Gerais e o Datum vertical é a referência de nível do marégrafo de Imbituba, Santa Catarina (a figura de representação da Terra é o elipsóide de referência IGGU 1967, compondo o chamado South American Datum 1969 ou SAD69).

As coordenadas UTM do canto esquerdo superior da imagem são E=676.334,55 m e N=7.185.561,86 m tendo como coordenadas geográficas a latitude 25° 26' 11,03" e a longitude 49° 14' 47,54" W; no canto direito inferior as coordenadas UTM são E=678.059,03 m e N=7.184.391,46 m tendo como coordenadas geográficas a latitude de 25° 26' 48,32" S e a longitude 49° 13' 45,27" W.

Esta ortoimagem cobriu uma área aproximada de 1,93 km² formando uma imagem com dimensão de 8889 x 6033 pixels composta por 80% de objetos antrópicos e 20% de objetos naturais, cujo ponto central é o Jardim Botânico de Curitiba. A figura 30 mostra a ortoimagem nas bandas RGB.

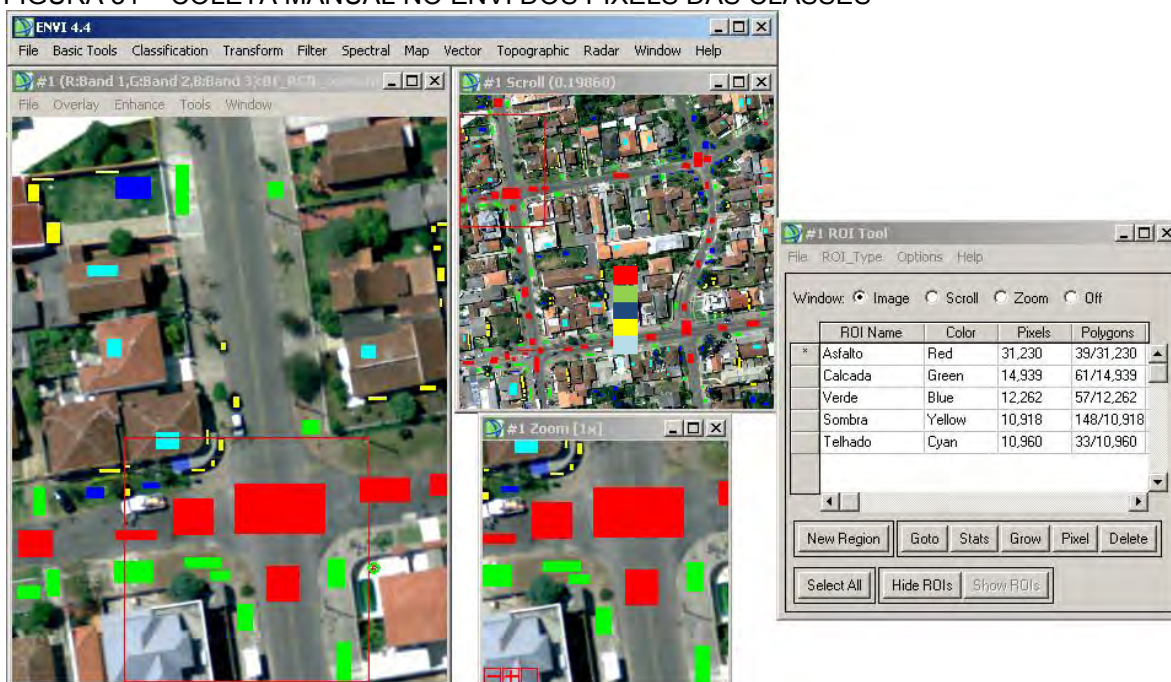
FIGURA 30 – ORTOIMAGEM NA BANDA RGB



3.4.2. Coleta de amostra (Etapa 02)

Na etapa 02 foram coletados manualmente em diferentes pontos da ortomagem os pixels das classes existentes na imagem. A coleta dos pixels foi realizada utilizando o comando “*Region of Interest*” da função “*Overlay*” do software ENVI. A figura 31 apresenta um exemplo da coleta manual realizada sobre a imagem RGB.

FIGURA 31 – COLETA MANUAL NO ENVI DOS PIXELS DAS CLASSES



Na figura 31 os polígonos coloridos contêm os pixels que identificam cada uma das classes do conjunto de dados de amostras, a saber: asfalto, calçada, área verde, sombra, telhado, paralelepípedo, faixas e solo.

A Tabela 1 apresenta os quantitativos de pixels obtidos em cada uma das classes da amostra.

TABELA 1 – CONJUNTO DE DADOS DE AMOSTRA DA ORTOIMAGEM

Dimensão da imagem:		8889 x 6033 pixels (53.627.337 pixels)						
Amostra	CLASSES							
	Asfalto	Calçada	ÁreaVerde	Sombra	Telhado	Paralelepípedo	Faixas	Solo
01	44.545	16.045	12.817	10.140	12.407	15.061	18.442	11.318

O conjunto de dados de amostra é exportado para um arquivo de texto que é utilizado na aplicação do Módulo (1) ENVI/ARFF.

A figura 32 ilustra as linhas iniciais do arquivo de texto do conjunto de dados da amostra.

FIGURA 32 – ARQUIVO DE TEXTO DO CONJUNTO DE DADOS DA AMOSTRA

```

; ENVI Output of ROIs (4.5) [Thu Feb 18 11:14:03 2010]
; Number of ROIs: 8
; File Dimension: 8889 x 6033
;
; ROI name: Asfalto
; ROI rgb value: {255, 0, 0}
; ROI npts: 44545
;
; ROI name: Paralelepípedo
; ROI rgb value: {0, 255, 0}
; ROI npts: 15061
;
; ROI name: Calçada
; ROI rgb value: {0, 0, 255}
; ROI npts: 16045
;
; ROI name: Áreaverde
; ROI rgb value: {255, 255, 0}
; ROI npts: 12817
;
; ROI name: Telhado
; ROI rgb value: {0, 255, 255}
; ROI npts: 12407
;
; ROI name: Faixa
; ROI rgb value: {176, 48, 96}
; ROI npts: 18442
;
; ROI name: Sombra
; ROI rgb value: {46, 139, 87}
; ROI npts: 10140
;
; ROI name: Solo
; ROI rgb value: {255, 0, 255}
; ROI npts: 11318
;
; ID B1 B2 B3
; 1 77 81 73
; . . . .

```

Na primeira linha da figura 32 é apresentado o nome do software ENVI com o tipo de arquivo, versão e data da coleta do conjunto de dados da amostra, na segunda linha o número de classes coletadas (*Number of ROIs: 8*), na terceira linha

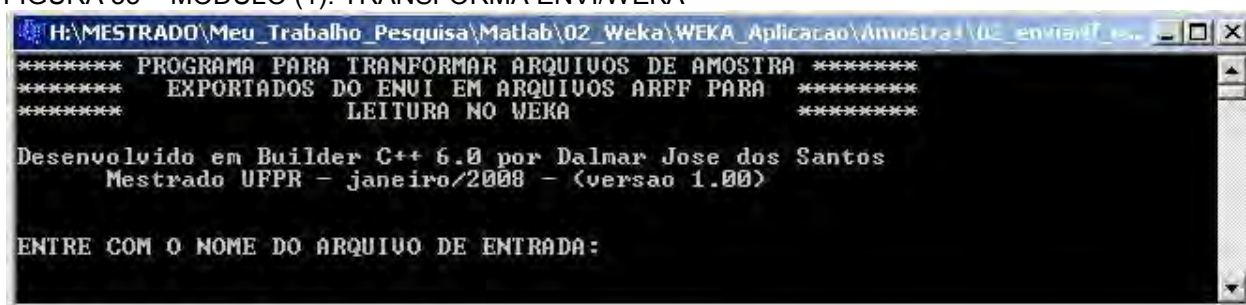
a dimensão da imagem onde foram coletadas as classes (*File Dimension: 8889x6033 pixels*), da quinta à trigésima quinta linha o nome das classes (*ROI name: classe*), a cor aparente da classe no monitor (*ROI rgb value:{255, 0, 0}*) e a quantidade de pixels coletados na amostra (*ROI npts:44545*), e a partir da trigésima sexta linha são apresentados os valores de intensidade de cinza da banda B1(vermelho), B2 (verde), B3(azul) relativos a cada um dos pixels das classes coletadas.

Este arquivo de texto no padrão do ENVI é inserido no Módulo (1) ENVI/ARFF descrito a seguir.

3.4.3. Módulo (1) – Transforma ENVI/ARFF (Etapa 03)

A etapa 03 é a leitura e transformação do arquivo de texto do padrão ENVI para um arquivo de texto no padrão ARFF do WEKA, realizada através do aplicativo denominado Módulo (1) ENVI/ARFF, desenvolvido em C++ BUILDER 6.0. A figura 33 mostra a tela de entrada do Módulo (1) ENVI/ARFF.

FIGURA 33 – MÓDULO (1): TRANSFORMA ENVI/WEKA



A figura 34 ilustra um exemplo de arquivo ARFF que traz da primeira à quinta linha o cabeçalho onde se inicia a declaração da relação que o arquivo representa (@RELATION), uma lista de atributos (@ATTRIBUTE), a relação das classes que os mesmos podem assumir ({...}), e os valores de tons de cinza de cada pixel do conjunto de dados de amostras que é inserido após @DATA. Os valores de tons de cinza dos pixels representam os valores das suas bandas (B1, B2, B3) separados por vírgula sendo identificada, a partir do último valor da banda, a classe a qual o pixel pertence.

FIGURA 34 – ARQUIVO TEXTO FORMATO ARFF - WEKA

```

@RELATION AMOSTRA
@ATTRIBUTE B1 NUMERIC
@ATTRIBUTE B2 NUMERIC
@ATTRIBUTE B3 NUMERIC
@ATTRIBUTE classes{ Asfalto,Bloco,Calcada,Verde,Vermelho,Faixa,Oclusao,Solo }
@DATA
77,81,73,Asfalto

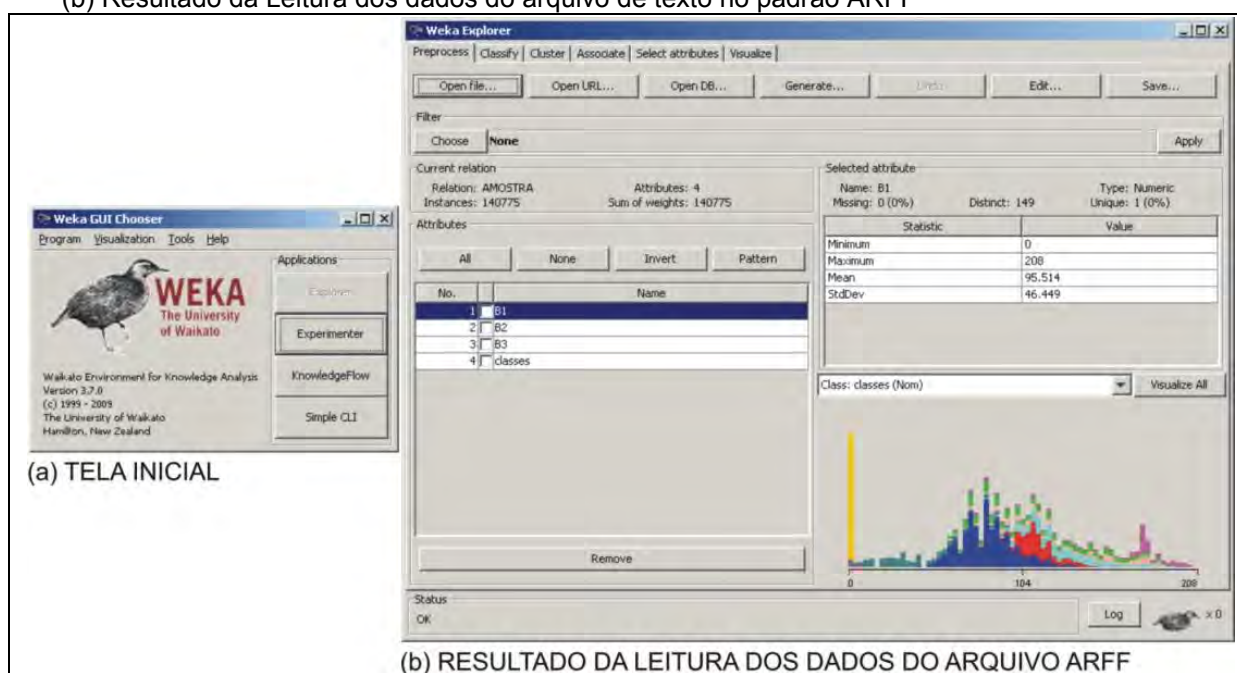
```

O arquivo de texto no padrão ARFF resultante é utilizado no software WEKA descrito a seguir.

3.4.4. WEKA: Geração da árvore de decisão (Etapa 04)

Na etapa 04 o arquivo de texto no padrão ARFF, resultante do Módulo (1) ENVI/ARFF, é inserido na aplicação “*Explorer*” do software WEKA. A figura 35 apresenta o WEKA e o resultado da leitura do arquivo de texto no padrão ARFF.

FIGURA 35 – TELA INICIAL DO WEKA E A LEITURA DO ARQUIVO ARFF: (a) Tela inicial do WEKA; (b) Resultado da Leitura dos dados do arquivo de texto no padrão ARFF



Os dados do arquivo ARFF são utilizados no módulo “*Classify*” onde se escolhe o algoritmo J48 para geração da árvore de decisão que contém as faixas de valores de tons de cinza das classes oriundas do conjunto de dados de amostras.

A qualidade e precisão da árvore de decisão podem ser avaliadas através do relatório final que emite dados sobre: (a) o número de níveis aplicados na árvore de decisão; (b) o tamanho da árvore com a quantidade de folhas encontradas; (c) o tempo decorrido para construção do modelo da árvore; (d) a classificação de instâncias corretas e incorretas; (e) o valor do kappa estatístico; (f) o erro médio absoluto; (g) o erro médio quadrático; (h) o erro relativo absoluto; (i) o erro quadrático relativo; (j) o número de instâncias; (k) a precisão detalhada por classe com sua média ponderada; e (l) a matriz de confusão de cada uma das classes.

O arquivo de texto com a árvore de decisão do WEKA é utilizado no Módulo (2) WEKA/IF-THEN.

3.4.5. Módulo (2): Transforma WEKA/IF-THEN (Etapa 05)

A etapa 05 é a leitura e transformação do arquivo de texto do padrão árvore de decisão do WEKA para um arquivo de texto no padrão denominado IF-THEN que contém as regras de decisão da classificação dos pixels da imagem. Este processo é realizado através do aplicativo denominado Módulo (2) WEKA/IF-THEN, desenvolvido no compilador C++ BUILDER 6.0. A figura 36 mostra a tela de entrada do Módulo (2) WEKA/IF-THEN.

FIGURA 36 – MÓDULO (2): TRANSFORMA WEKA/IF-THEN

```

H:\MESTRADO\Meu_Trabalho_Pesquisa\Matlab\02_Weka\WEKA_Aplicacao\Amostra1\03_classificac...
***** PROGRAMA PARA LER ARQUIVOS DE ÁRVORES DE *****
***** DECISAO GERADAS PELO WEKA E CLASSIFICAR *****
***** UMA IMAGEM A PARTIR DESTA ARVORE WEKA *****

Desenvolvido em Builder C++ 6.0 por Dalmar Jose dos Santos
Mestrado UFRP - janeiro/2008 - (versao 1.00)

ENTRE COM O NOME DO ARQUIVO DE ENTRADA:
  
```

A figura 37 apresenta o arquivo de texto no formato IF-THEN resultante da aplicação do Módulo (2) WEKA/IF-THEN.

FIGURA 37 – ARQUIVO DE TEXTO NO FORMATO IF-THEN

```

% -----
% Função para classificação de imagens utilizando Árvore de Decisão WEKA
% -----
for i=1:lin
for j=1:col
if(B1(i,j) <= 59)
if( B2(i,j) <= 26)
if( B2(i,j) <= 14)
classes(i,j)=1;
end
if( B2(i,j) > 14)
if( B3(i,j) <= 23)
if( B2(i,j) <= 20)
if( B3(i,j) <= 19)
if( B1(i,j) <= 3)
if( B2(i,j) <= 16)
classes(i,j)=1;
end
if( B2(i,j) > 16)
if( B3(i,j) <= 18)
classes(i,j)=2;
end %finaliza o j
end %finaliza o i

```

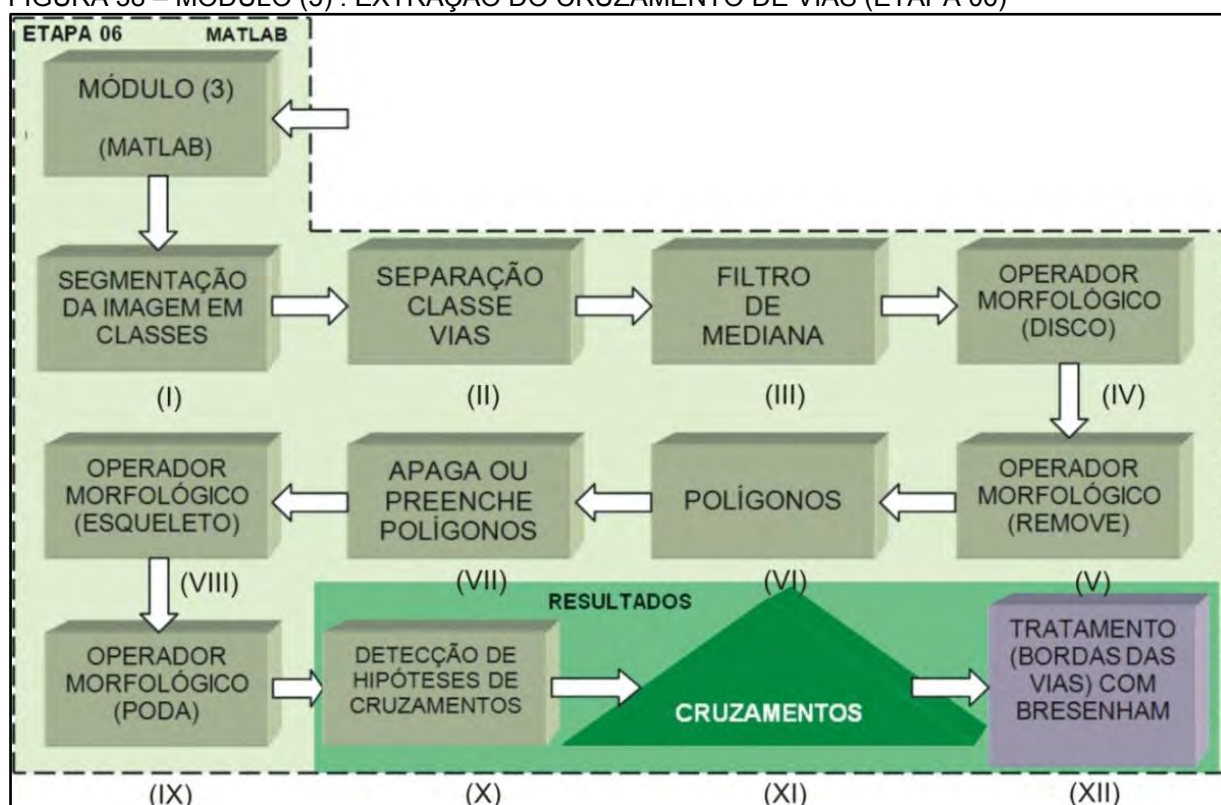
Observe na figura 37 que as três primeiras linhas apresentam um comentário do conteúdo do arquivo e as demais linhas apresentam a estruturação do “for” responsável pela varredura de todos os pixels de linhas e colunas existentes na imagem. Esta estrutura tem, internamente, a descrição de um comando “IF-THEN” e é responsável pela classificação dos pixels da imagem de acordo as faixas de valores de bandas estabelecidos pela árvore de decisão do WEKA. O arquivo de texto no formato IF-THEN é utilizado no aplicativo denominado Módulo (3).

3.4.6. Módulo (3): Extração dos cruzamentos de vias (Etapa 06)

A etapa 06 consiste aplicação do Módulo (3), desenvolvido em MATLAB, a partir da inserção do arquivo de texto no formato IF-THEN, que contém o conhecimento necessário para a separação dos pixels da imagem nas classes definidas no conjunto de dados de amostra.

A figura 38 apresenta os doze processos do Módulo (3) envolvidos na extração do cruzamento de vias.

FIGURA 38 – MÓDULO (3) : EXTRAÇÃO DO CRUZAMENTO DE VIAS (ETAPA 06)



Na abertura do Módulo (3), responsável pela extração do cruzamento de vias é solicitado o fornecimento das variáveis a seguir descritas:

- **Raio de Ação:** variável com dimensão em pixel que é responsável pela definição de limites máximos e mínimos da janela de busca dos pixels pertencentes ao cruzamento. O centro da janela é definido pelo ponto de referência determinado para o cruzamento;
- **Poda:** variável com dimensão em pixel que determina o limiar máximo permitido para os componentes gerados pelo processo de esqueletização;
- **Espaçamento entre pontos:** variável com dimensão em pixel que determina a distância máxima entre pontos do cruzamento. Utilizada no processo para dar maior eficiência aos contornos do cruzamento extraído;
- **Borda:** variável com dimensão em pixel que é responsável pela geração de uma borda de segurança na janela definida pelo Raio de Ação;

- Quantidade mínima de pontos: variável com dimensão em percentual que define o limiar mínimo que um polígono deve ter na determinação da classe o objeto vias. Esta variável produz maior eficiência na deleção eliminação de pixels classificados erroneamente na classe do objeto vias;
- Vizinhança disco morfológico: variável com dimensão em pixel que determina o tamanho elemento estrutural, em forma de disco, utilizado no fechamento de oclusões no interior das vias;

O detalhamento dos processos, bem como a aplicação das variáveis descritas acima e os resultados alcançados em cada um dos processos do Módulo (3) estão descritos na seção 4 a seguir.

4. EXPERIMENTOS REALIZADOS

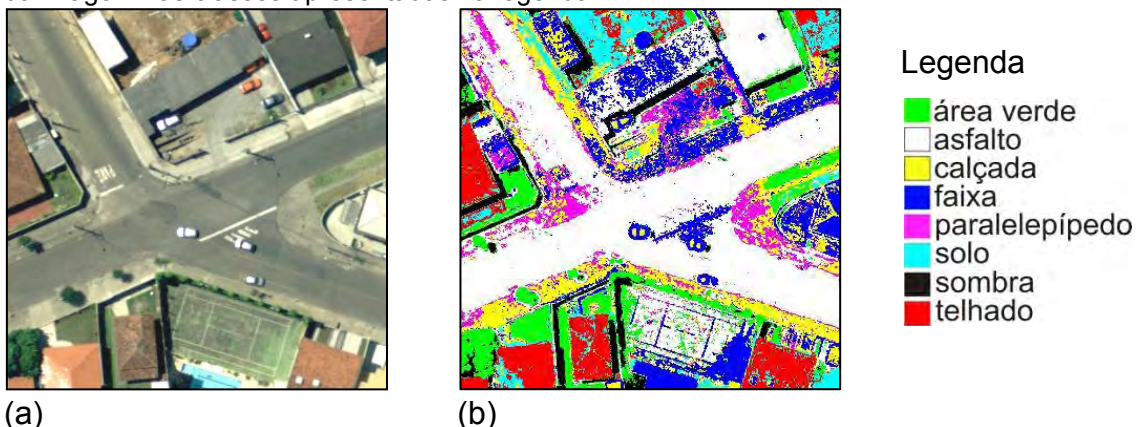
Para uma melhor compreensão do funcionamento dos processos envolvidos no Módulo (3), será apresentada uma descrição e uma imagem com o tipo de resultado obtido na aplicação.

4.1. Detalhamento dos processos do Módulo (3) para a extração do cruzamento de vias

4.1.1. Processo (I) – Segmentação da imagem em classes

Na estratégia semi-automática proposta, a segmentação da imagem é realizada através aplicação dos valores determinados pela árvore de decisão do WEKA. As classes existentes no conjunto de dados de entrada geram uma lista ordenada de classes com valores no intervalo de (1 a n). Isto permite a separação dos pixels em uma imagem de cores como a apresentada na figura 39 (b).

FIGURA 39 – ORTOIMAGEM RGB E SUA SEGMENTAÇÃO. (a) Imagem Original; (b) Segmentação da imagem nas classes apresentadas na legenda.



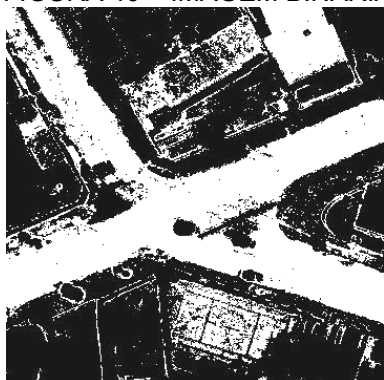
O passo seguinte é a separação dos pixels da classe vias.

4.1.2. Processo (II) – Separação da classe vias

O algoritmo do processo (II) varre a imagem colorida da figura 39 (b) e através de uma condição simples do pixel pertencer ou não a classe asfalto; representado na figura 39 (b) na cor branca; analisa a resposta e se for positiva insere o valor um em uma imagem binária nas mesmas coordenadas de linha e coluna do pixel encontrado. O processo é repetido até o final de linhas e colunas da imagem.

A figura 40 apresenta o resultado final da imagem binária que contém os pixels pertencentes à classe vias.

FIGURA 40 – IMAGEM BINÁRIA CONTENDO PIXELS DA CLASSE VIAS



Ao observar com os pixels da classe vias apresentados na figura 40 com os seguintes problemas são observados:

- (1) há uma quantidade excessiva de pixels classificados erroneamente fora da via e isto ocorre em função da semelhança existente entre a tonalidade dos pixels do objeto asfalto e tonalidade dos pixels de objetos como, calçadas e telhados;
- (2) há algumas falhas na classificação dos pixels do interior da via e isto ocorre em função de oclusões provocadas por objetos como: veículos e faixas existentes sobre a via.

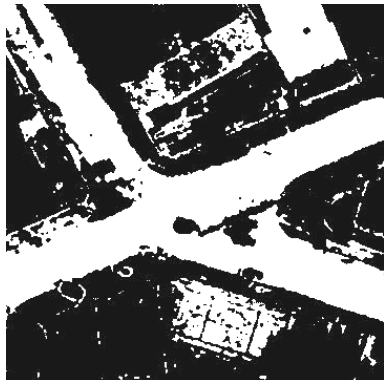
Com o objetivo de suavizar estes problemas é aplicado o processo (III) descrito a seguir.

4.1.3. Processo (III) – Filtro de mediana

No processo (III) o algoritmo do filtro de mediana varre os pixels da imagem binária da classe vias suavizando e mantendo os principais detalhes desta imagem.

O resultado da suavização da aplicação do filtro de mediana pode ser observado na figura 41.

FIGURA 41 – FILTRO DE MEDIANA APLICADO NOS PIXELS DA CLASSE VIAS



A suavização resultante mostrou-se insuficiente para na eliminação dos problemas apontados no processo anterior tornando-se necessária a realização do processo (IV) a seguir descrito.

4.1.4. Processo (IV) – Operador Morfológico de erosão em forma de disco

No processo (IV) um operador morfológico de erosão com um elemento estruturante em forma de disco (15 x 15 pixels), que permite uma análise de vizinhança oito entre os pixels, é aplicado na imagem binária do filtro de mediana para solucionar os problemas descritos anteriormente no processo (II).

A figura 42 apresenta o elemento estruturante em forma de disco utilizado nos experimentos.

FIGURA 42 – ELEMENTO ESTRUTURANTE EM FORMA DE DISCO

0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0

A figura 43 apresenta o resultado da aplicação do operador morfológico de erosão com o elemento estruturante em forma de disco.

FIGURA 43 – RESULTADO DO OPERADOR MORFOLÓGICO DE EROSIÃO EM FORMA DE DISCO



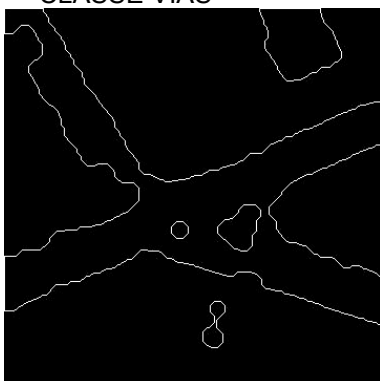
Quando comparados os resultados obtidos na figura 41 ao resultado obtido na figura 43, observa-se que a aplicação do operador morfológico em forma de disco reduz em 90% os pixels no exterior da via e complementa 70% dos pixels no seu interior.

Entretanto, a imagem binária ainda possui pixels da classe vias classificados inadequadamente e apresenta vazios no interior da pista da via e para solucionar estes problemas são apresentados os processos (V), (VI) e (VII).

4.1.5. Processo (V) – Operador Morfológico de erosão para a determinação de bordas

No processo (V) na imagem binária resultante do processo anterior é aplicado o operador morfológico, com um elemento estruturante (4 x 4 pixels) de valores unitários, que define com o valor zero os pixels que possuem quatro vizinhos conectados, obtendo-se uma imagem binária contendo os pixels que formam as bordas dos pixels da classe vias. A figura 44 apresenta os pixels da borda das vias.

FIGURA 44 –OPERADOR MORFOLÓGICO DE EROSIÃO PARA DETERMINAR AS BORDAS DA CLASSE VIAS



Na imagem binária formada os pixels pertencentes às bordas das vias permitem a geração de uma listagem ordenada contendo todas as coordenadas e a quantidade de pixels existente na classe vias e estas informações permitem a definição de polígonos da classe vias.

4.1.6. Processo (VI) – Definição dos polígonos da classe vias

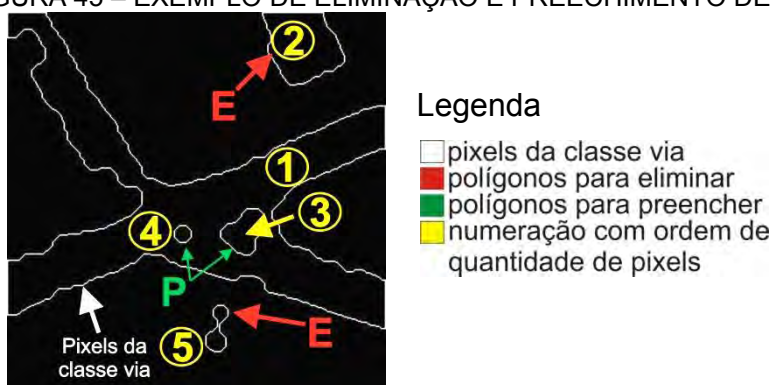
Da imagem binária, obtida no processo anterior, são separadas e ordenadas em uma matriz denominada (Polígonos), todas as coordenadas dos pixels pertencentes à borda da classe vias e também é identificado o polígono a que cada pixel pertence. Em seguida, são determinados na matriz (Resumo), a quantidade de

pixels e o *status* destes polígonos, indicando se estão ou não contidos no interior da via. A partir destas definições é executada a eliminação e ou preenchimento dos pixels da classe vias.

4.1.7. Processo (VII) – Eliminação e preenchimento dos polígonos

Para executar o processo de eliminação de polígonos é necessário considerar como via principal, o polígono com a maior quantidade de pontos. Na figura 45 este polígono está representado com o número 1 (um).

FIGURA 45 – EXEMPLO DE ELIMINAÇÃO E PREENCHIMENTO DE POLÍGONOS



Definido o maior polígono é estabelecido dois critérios para a eliminação de polígonos da classe vias:

- **Critério (1):** os polígonos que não estão contidos no maior polígono da imagem. Inserir *status* de deleção no polígono da matriz (Resumo) identificada no processo anterior;
- **Critério (2):** os polígonos que possuam a quantidade de pontos menor que o percentual definido na variável “Limiar”, inicializada na abertura do Módulo (3), multiplicado pela quantidade de pontos do maior polígono da imagem. Inserir *status* de deleção no polígono da matriz (Resumo) identificada no processo anterior.

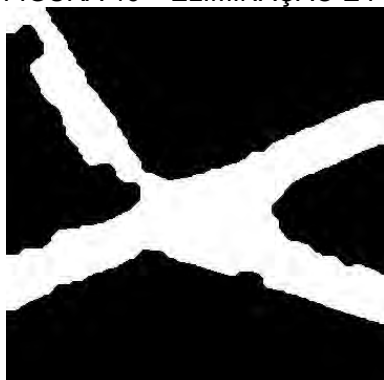
Aplicando-se estes critérios na figura 45, observa-se que os polígonos indicados com os números (2) e (5) atendem ao **critério (1)** e os polígono (3) e (4) o **critério (2)**.

Para que não haja a eliminação dos polígonos indicados com os números (3) e (4) são necessários mais dois critérios:

- **Critério (3):** verificar se o polígono que será eliminado está contido no interior do polígono da via e em caso afirmativo, separá-lo. Este é o caso dos polígonos (3) e (4);
- **Critério (4):** verificar se os pixels do interior dos polígonos, separado pelo **critério (3)**, possuem valor zero no seu interior, caso afirmativo, preenchê-los com pixels de valor (1) até o limite de sua borda. No final do preenchimento do polígono, retirar o *status* de deleção do polígono da matriz (Resumo) identificada no processo anterior.

A figura 46 apresenta a imagem binária dos pixels da classe vias, resultante da aplicação dos quatro critérios definidos acima.

FIGURA 46 – ELIMINAÇÃO E PREENCHIMENTO DE POLÍGONOS DA CLASSE VIAS



A imagem binária contendo os pixels da classe vias permite a aplicação de um operador morfológico de esqueletização.

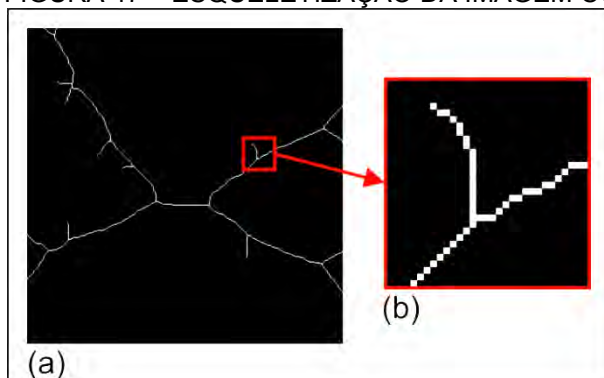
4.1.8. Processo (VIII) – Operador Morfológico de esqueletização

Na imagem binária, originada no processo (VII), é aplicado o operador morfológico de esqueletização que define a linha central dos pixels da classe via, determinando os eixos (esqueletos) ao longo da via.

A descontinuidade na espessura da via, causada por saliências e reentrâncias de suas bordas, faz com que apareçam anexados aos esqueletos das

vias pequenos segmentos que podem ser observados de forma geral na figura 47 (a) e mais detalhadamente na figura 47 (b).

FIGURA 47 – ESQUELETIZAÇÃO DA IMAGEM CONTENDO A CLASSE VIAS



Sendo assim podemos afirmar que no processo de esqueletização o esqueleto da classe vias originado possui as seguintes características: (a) espessura de um pixel, localizado geralmente, no centro dos pixels da classe via; e (b) pequenos segmentos, figura 49 (b), que são gerados ao longo do esqueleto.

As coordenadas dos pixels, que formam o esqueleto são armazenadas na matriz denominada (Esqueleto). O processo de poda dos pequenos segmentos do esqueleto é descrito a seguir.

4.1.9. Processo (IX) – Operador Morfológico de poda

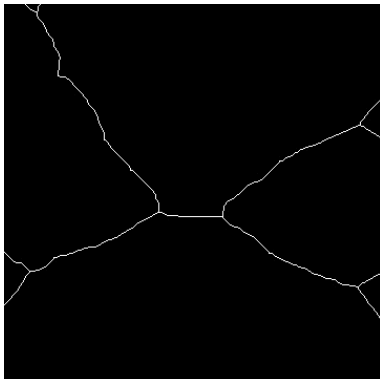
Na imagem binária, originada no processo (VIII), é aplicado um operador morfológico de poda que elimina os pequenos segmentos formados durante o processo de esqueletização.

A solução deste problema está baseada na supressão dos pequenos segmentos por sucessivas eliminações de pontos finais utilizando os elementos estruturantes, com dimensão de 3x3 pixels, apresentados nas figuras 21 (b) e (c).

As coordenadas dos pontos finais são separadas em uma matriz denominada (Poda) sendo determinada a quantidade de pixels formados no pequeno seguimento; seguido da eliminação daqueles que possuem a quantidade de pixels maior do que o valor estabelecido na variável “Poda”, inicializada na abertura do Módulo (3).

A figura 48 apresenta o resultado da aplicação do operador morfológico de poda.

FIGURA 48 –PODA DO ESQUELETO DA CLASSE VIAS (EIXOS DE VIAS)



Na figura 48 observa-se que a aplicação do operador morfológico de poda elimina os pequenos segmentos do esqueleto e gera os pixels da classe vias que definem o eixo da via com maior eficiência. Isto permite a execução do processo de detecção de hipóteses de cruzamentos.

4.1.10. Processo (X) – Detecção de hipóteses de cruzamentos

No processo (X) a imagem binária, originada no processo anterior, é varrida em linha e coluna, na busca dos pixels pertencentes ao esqueleto. Ao encontrar um pixel do esqueleto o algoritmo sobrepõe uma máscara, com tamanho 3 x 3 pixels, e captura todos os valores de pixels da imagem do esqueleto, aplicando em seguida um somatório destes valores.














Para que um pixel do esqueleto obtenha o *status* de pertencente à hipótese de cruzamentos, ele deve atender o seguinte critério:

- **Critério (5):** o somatório dos pixels, no interior da máscara, deve estar no intervalo entre (3 e 4);

Caso o **critério (5)** seja atendido a posição que os pixels, com valor unitário ocupam na máscara 3 x 3, determina o tipo de cruzamento existente.

A Tabela 2 apresenta os tipos de cruzamentos considerados nos experimentos.

TABELA 2 – TIPO DE CRUZAMENTOS

Tipo de Cruzamento	Modelo 01	Modelo 02	Modelo 03	Modelo 04
T				
Y				
Y com diversas direções				
Cruz				

Na Tabela 2 acima, a cor cinza indica a posição ocupada pelo pixel com valor 1 (um) na máscara 3 x 3.

Caso a distribuição dos pixels unitários da máscara 3 x 3 atenda a um dos tipos apresentados na Tabela 02, as coordenadas (linha, coluna) do pixel central da máscara são armazenadas na matriz denominada (Hipóteses de Cruzamentos).

A figura 49 apresenta o resultado da identificação das hipóteses de cruzamentos (na cor vermelha) e os quadrados (na cor azul) os falsos positivos das hipóteses.

FIGURA 49 – LOCALIZAÇÃO DAS HIPÓTESES DE CRUZAMENTOS



Legenda

- bordas da via
- eixo da via (esqueleto)
- hipótese de cruzamento
- falsos positivos (hipótese de cruzamento)

Desta forma torna-se necessário, a aplicação do algoritmo do processo a seguir para eliminação de falsos positivos e a extração final dos cruzamentos.

4.1.11. Processo (XI) – Extração dos cruzamentos das vias

Para a eliminação dos falsos positivos, a matriz (Hipóteses de Cruzamento), definida no processo anterior, é percorrida do primeiro ao último pixel seguindo os seguintes passos, a saber:

- a) identificam-se as coordenadas da hipótese de cruzamento utilizando-as como coordenadas do pixel central da janela de busca da aplicação;
- b) a partir do pixel central define-se a janela de busca calculando-se as coordenadas do canto superior esquerdo e canto inferior direito, utilizando como valor de referência, duas vezes o raio de ação (variável inicializada na abertura do Módulo (3));
- c) sobre os pixels da borda da janela de busca calculada são verificadas os seguintes critérios:
 - **Critério (6):** onde é analisada na matriz denominada (Polígonos), a existência do cruzamento de no mínimo 2 (dois) pixels pertencentes a borda do polígono de vias;
 - **Critério (7):** onde é analisada na matriz denominada (Esqueleto), a existência do cruzamento de pelo menos dois pixels pertencentes ao esqueleto da via.
- d) caso os critérios (6) e (7) sejam atendidos, o *status* do pixel da matriz (Hipótese de Cruzamento) passa para o *status* de ponto semente, dando origem a matriz denominada (Cruzamentos) que contém as coordenadas (linha, coluna) dos cruzamentos de vias finais.

Na figura 50 os círculos (em azul claro) representam as localizações dos pontos sementes dos cruzamentos das vias e o traço (em amarelo) as bordas da via.

FIGURA 50 – DEFINIÇÃO DOS PONTOS SEMENTES DOS CRUZAMENTOS DE VIAS



Legenda

- bordas da via
- ponto semente do cruzamento de vias

A matriz (Cruzamentos), contendo as coordenadas dos pontos sementes dos cruzamentos finais, é varrida do primeiro ao último pixel seguindo os seguintes passos, a saber:

- a) identificam-se as coordenadas do pixel do ponto semente do cruzamento utilizando-o como pixel central da janela de busca da aplicação;
- b) a partir do pixel central define-se a janela de busca calculando-se as coordenadas do canto superior esquerdo e canto inferior direito, utilizando como valor de referência o somatório do raio de ação e o valor da borda (variáveis inicializadas na abertura do Módulo (3));
- c) a matriz (Polígono), que contém os pontos de borda da via é varrida, sendo marcados com status cruzamentos os pixels do interior do quadrado determinado no item anterior.

Na figura 51 os círculos (em azul claro) representam à localização dos pontos sementes dos cruzamentos e o traço (em amarelo) os pixels que foram o cruzamento da via.

FIGURA 51 – EXTRAÇÃO DO CRUZAMENTO DA VIA



Legenda

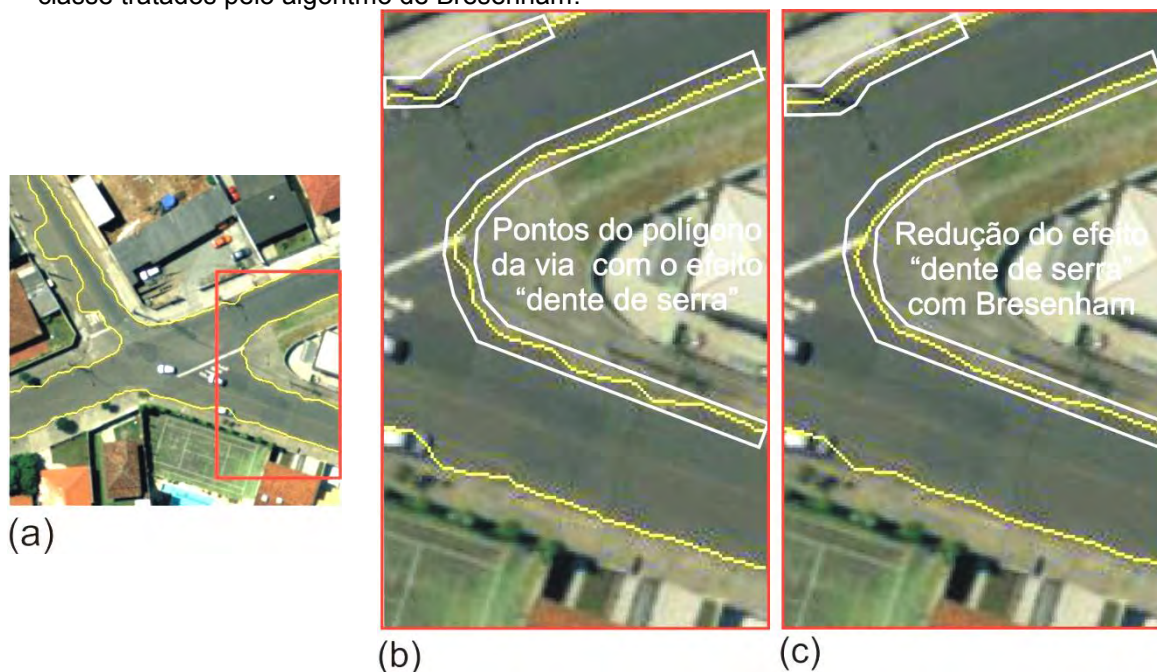
- bordas da via
- ponto semente do cruzamento de vias

Os pixels pertencentes à borda do cruzamento da via, muitas vezes, produzem um efeito de “dente de serra” na visualização do traçado do polígono e este efeito é atenuado aplicando-se o processo a seguir.

4.1.12. Processo (XII) – Aplicação do algoritmo de Bresenham

Com o objetivo de apresentar um traçado mais retilíneo dos pixels do cruzamento das vias, definido no processo anterior, é aplicado o algoritmo de Bresenham (1965) e o resultado pode ser observado figura 52 (c).

FIGURA 52 – EXTRAÇÃO DOS CRUZAMENTOS DE VIAS. (a) Ortoimagem contendo as bordas da classe via; (b) Ampliação dos pixels da borda da classe vias; (c) Ampliação dos pixels da borda da classe tratados pelo algoritmo de Bresenham.

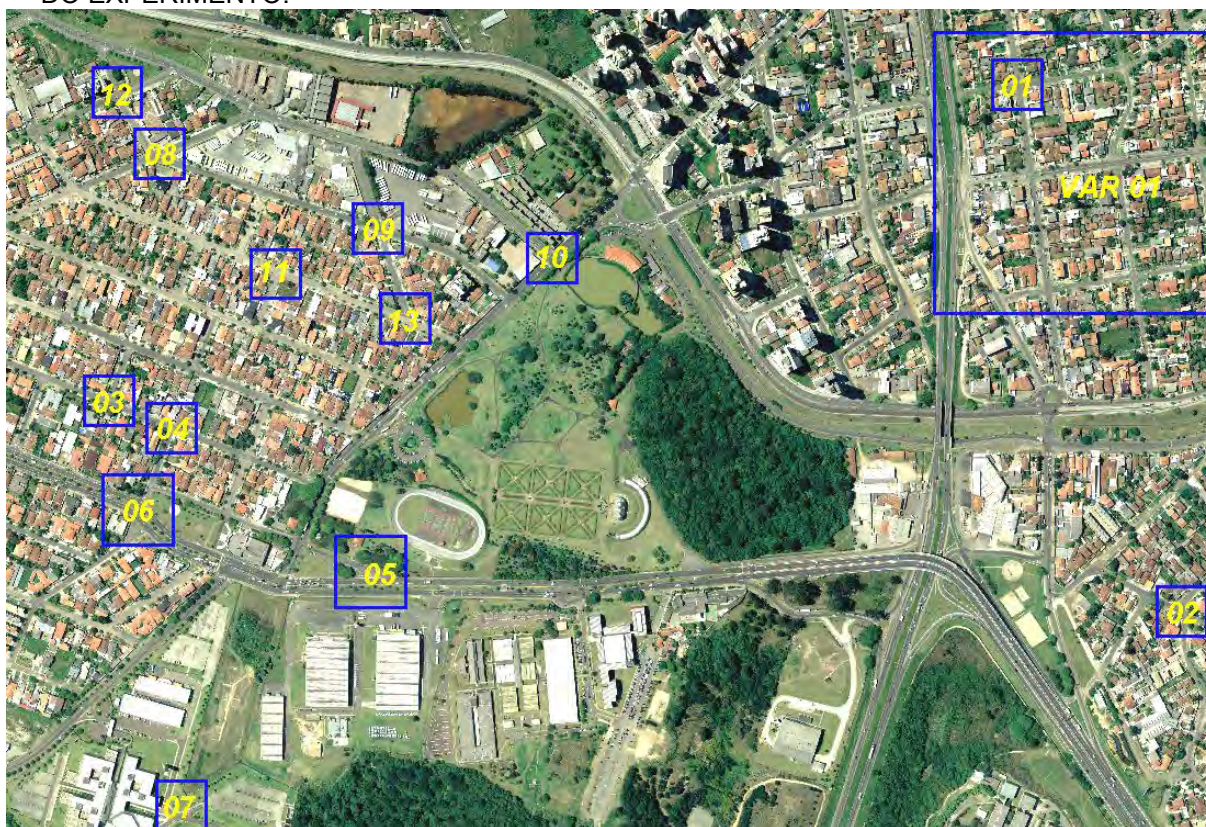


4.2. Descrição dos experimentos realizados

A avaliação da estratégia proposta foi realizada através da aplicação do Módulo (3) na ortoimagem utilizando na estratégia semi-automática proposta o conjunto de amostras com as classes “sombra, área verde, asfalto, telhado, calçada, solo, faixa e paralelepípedo”.

Dentre os cruzamentos presentes na ortoimagem foram selecionados um total de 14 (quatorze) localizações com cruzamentos de vias, os quais, para serem utilizados na análise dos resultados obtidos com a aplicação. Na figura 53 os locais dos cruzamentos escolhidos estão indicados na cor azul escuro e o número do experimento inçado na cor amarela.






FIGURA 53 – LOCALIZAÇÃO DOS CRUZAMENTOS DE VIAS SELECIONADOS PARA ANÁLISE DO EXPERIMENTO.



A tabela 3 (fora da escala original) apresenta os dados gerais dos cruzamentos selecionados sendo indicado na primeira coluna: o **número do experimento**; na segunda coluna: o **número de cruzamento** possíveis na via; na terceira coluna: o **tipo de pavimentação**; e na quarta: a imagem do cruzamento. Na terceira coluna da tabela 3, para identificar o tipo predominante de pavimentação da via é adotado as seguintes convenções: **(A)**sfalto, **(P)**aralelepípedo e **(M)**isto para pavimentação onde aparecem o tipo asfalto e paralelepípedo.

TABELA 3 - DADOS GERAIS DOS EXPERIMENTOS

Experimento	Número de Cruzamentos Possíveis	Tipo de Pavimento	Imagem do Cruzamento
01	01	A	
02	02	A	
03	01	A	
04	01	A	
05	01	A	
06	05	A	
07	03	M	
08	02	A	

Experimento	Número de Cruzamentos Possíveis	Tipo de Pavimento	Imagem do Cruzamento
09	02	A	
10	01	A	
11	01	P	
12	01	P	
13	01	M	
14 (VAR01)	10	A	Ver figura 67

A porção da imagem do experimento 14 não foi inserida na Tabela 03 em função da mesma não apresentar detalhes suficientes que pudessem demonstrar os cruzamentos existentes, contudo, esta imagem pode ser visualizada com maiores detalhes na figura 67. Foram executados 14 (quatorze) experimentos que apresentam, em suas imagens, um total de 32 (trinta e dois) cruzamentos a serem detectados pela estratégia semi-automática proposta. A seção 4.3 apresenta os resultados alcançados com a aplicação.

4.3. Apresentação dos resultados dos experimentos realizados

FIGURA 54 – EXPERIMENTO 01 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO)

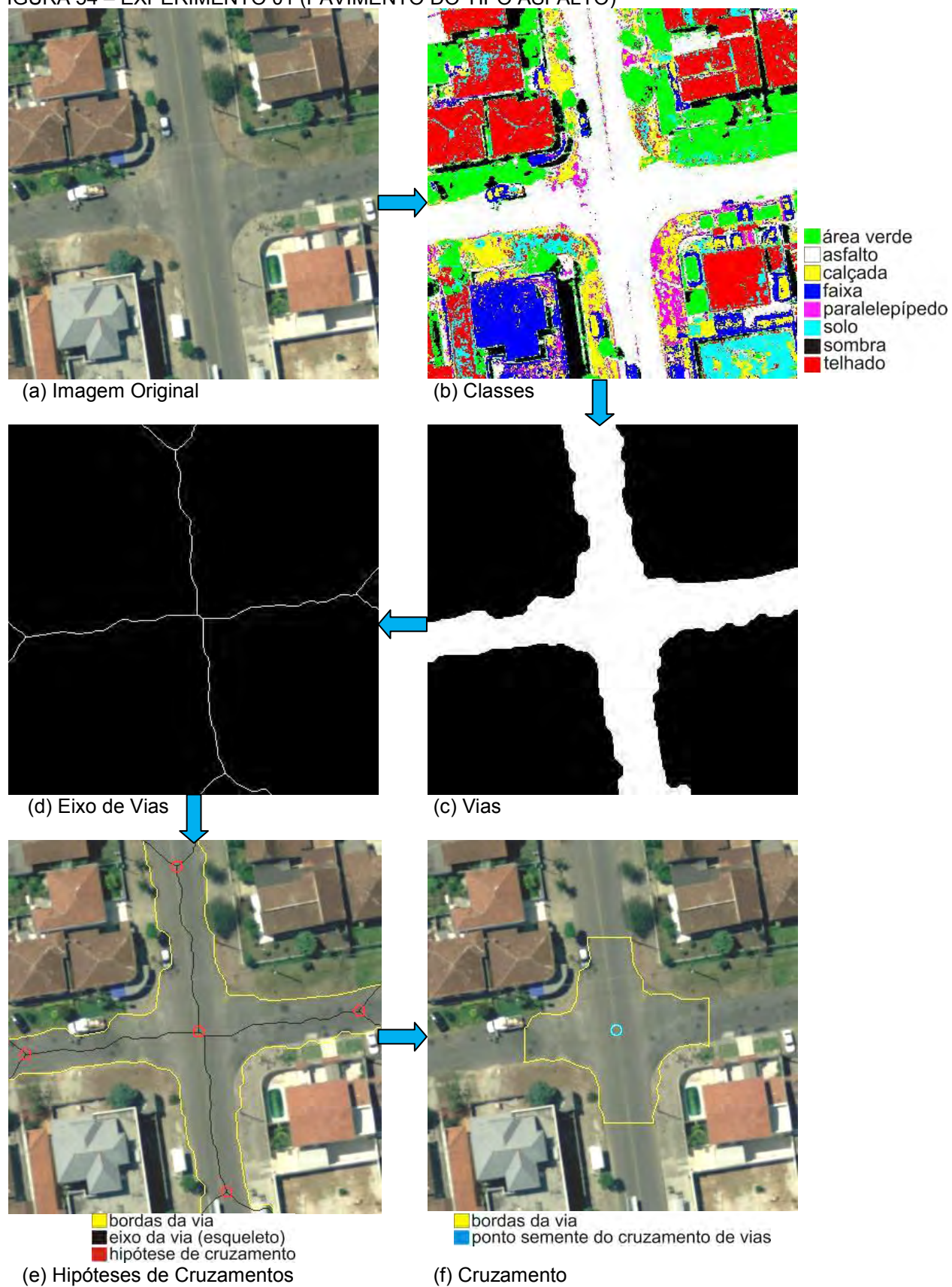


FIGURA 55 – EXPERIMENTO 02 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO)

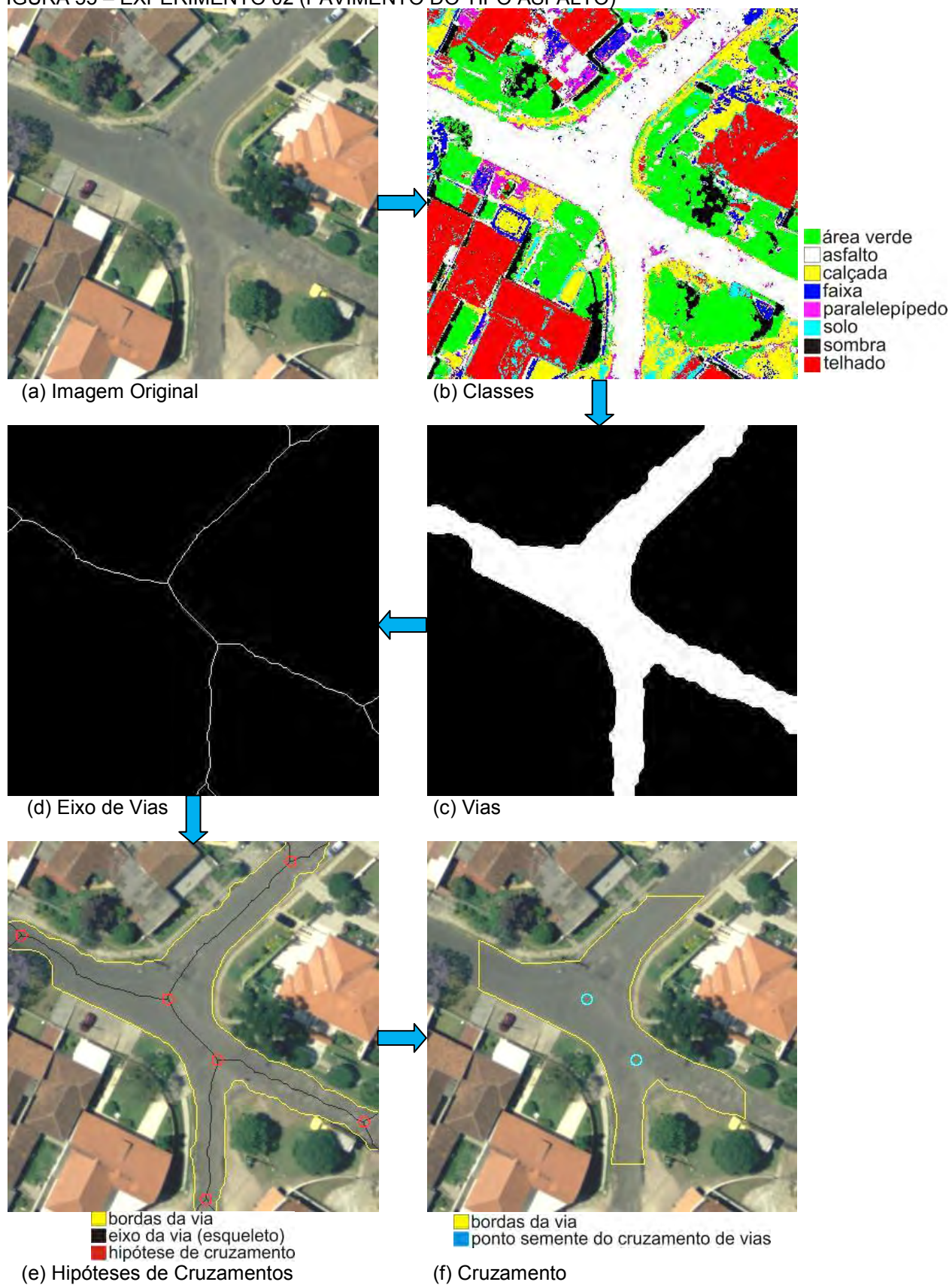


FIGURA 56 – EXPERIMENTO 03 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO)

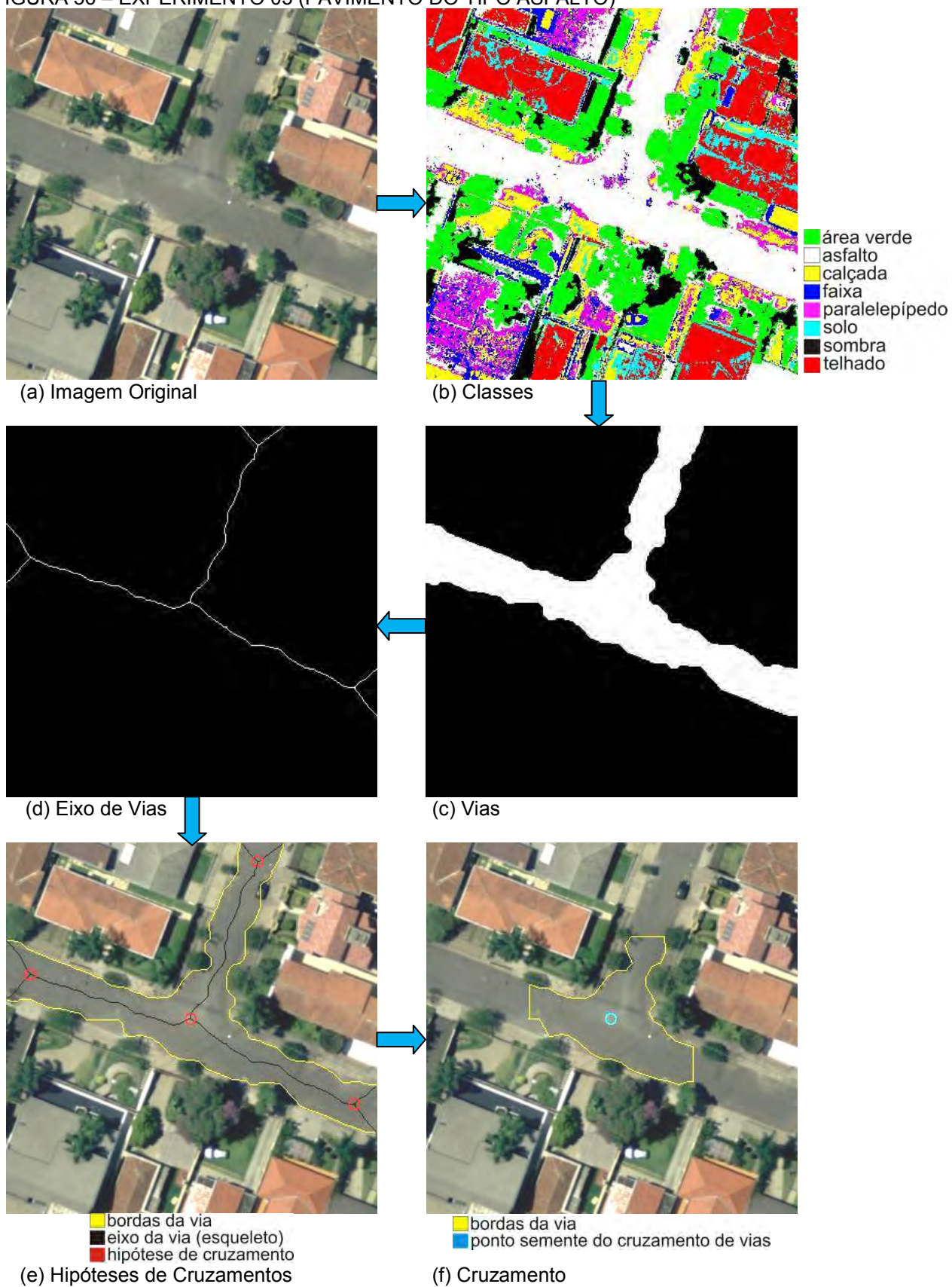


FIGURA 57 – EXPERIMENTO 04 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO)

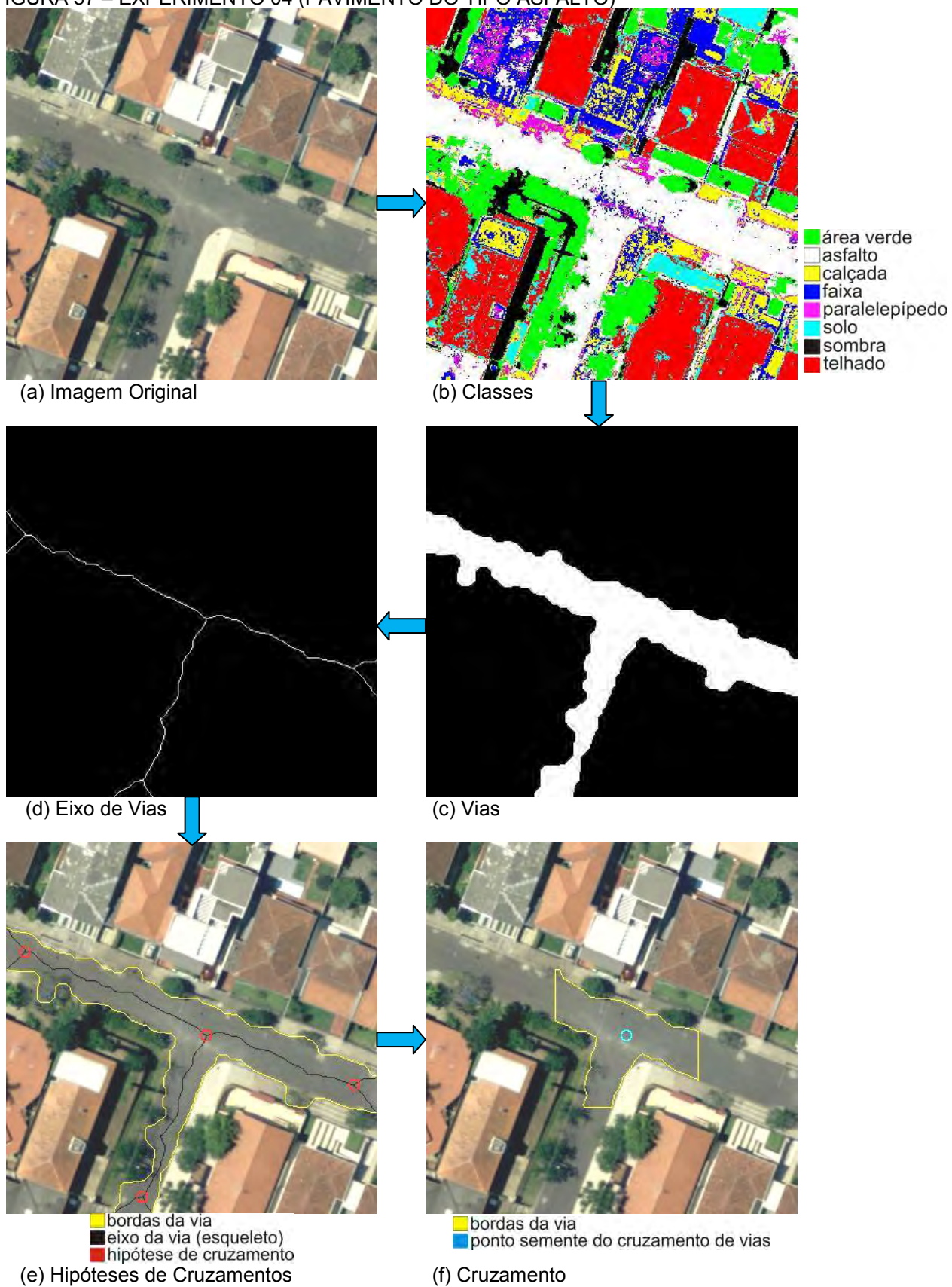


FIGURA 58 – EXPERIMENTO 05 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO COM FAIXAS)

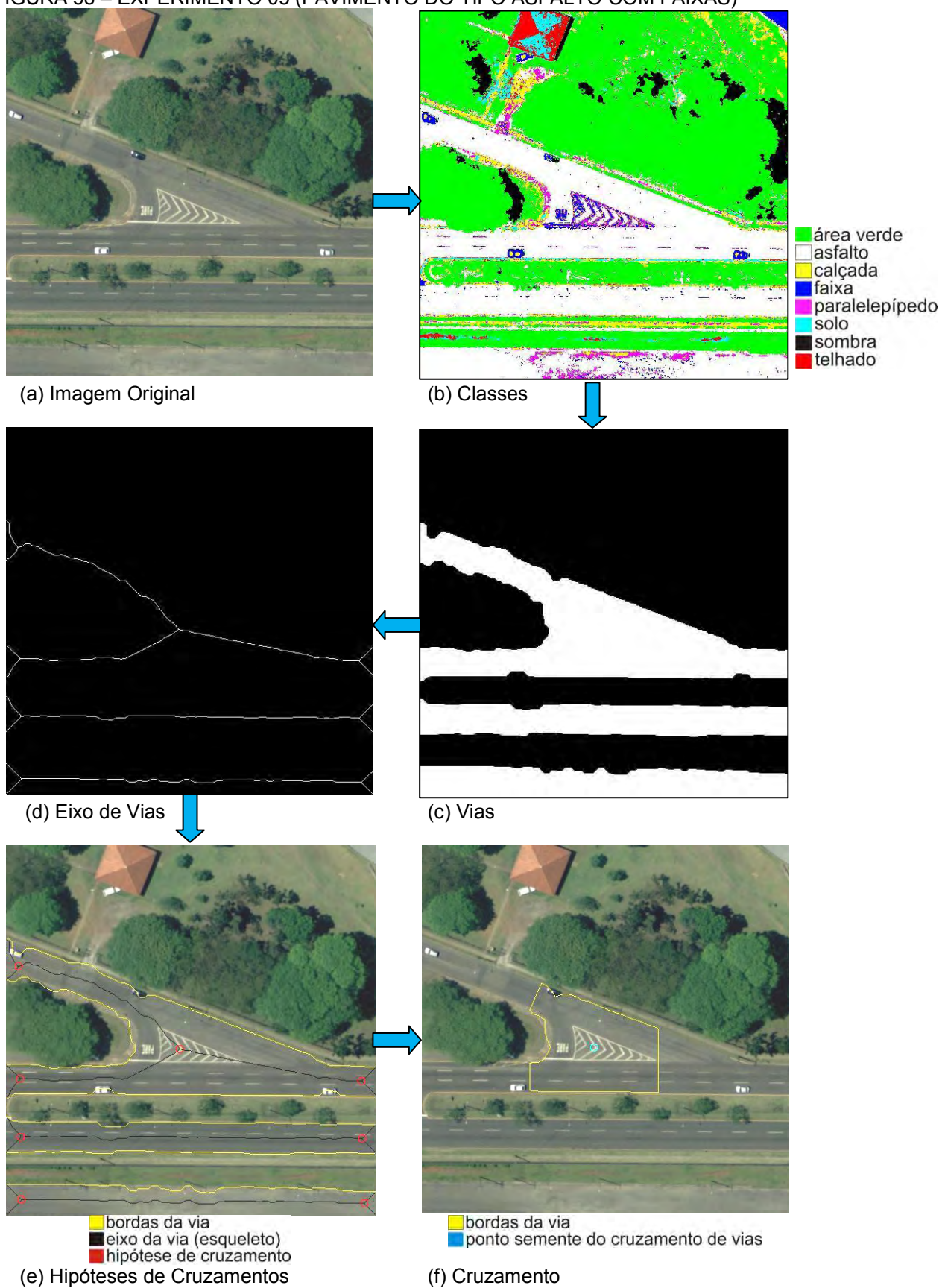


FIGURA 59 – EXPERIMENTO 06 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO COM FAIXAS)

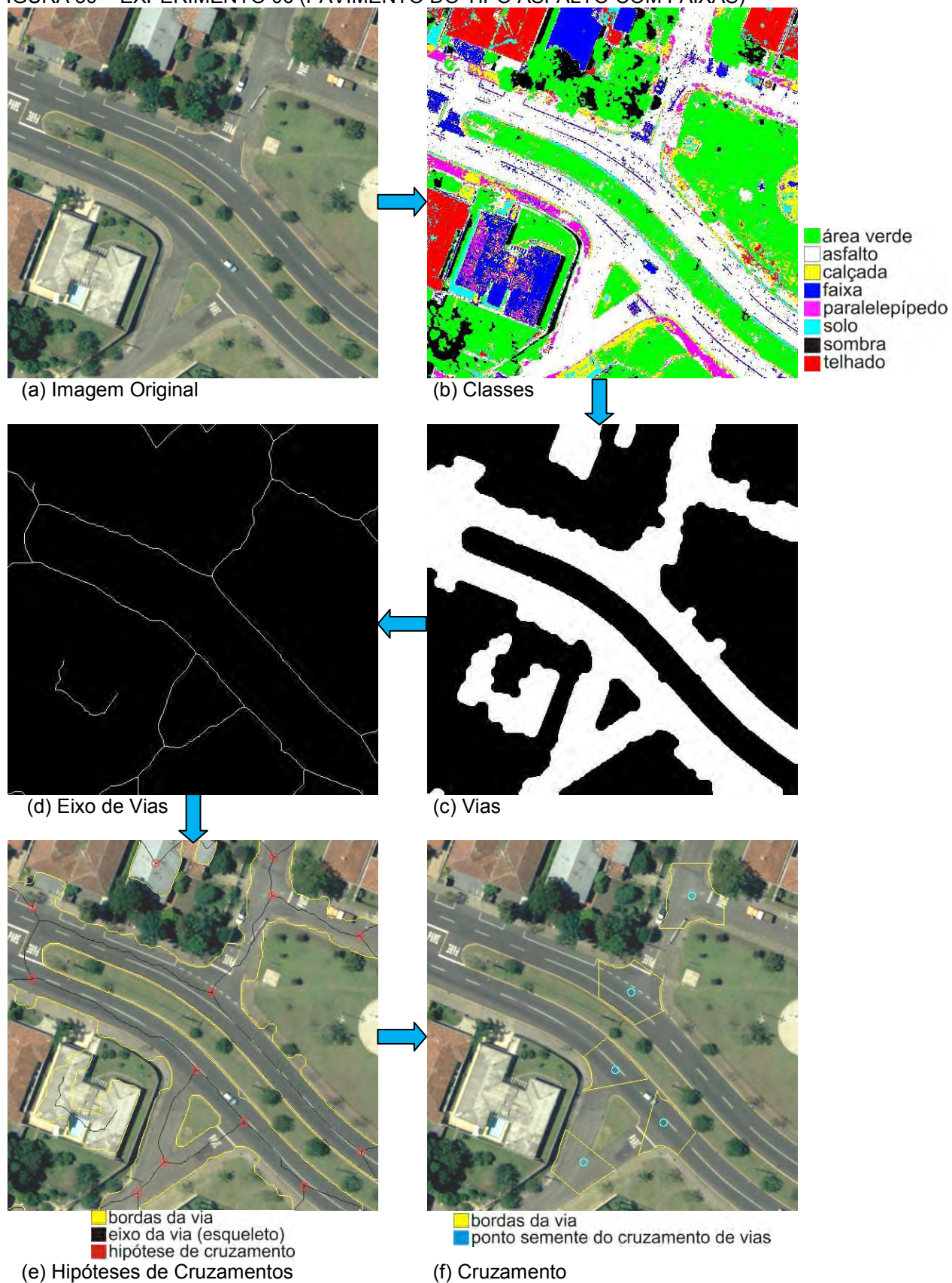


FIGURA 60 – EXPERIMENTO 07 (PAVIMENTO DO TIPO MISTO COM FAIXAS)

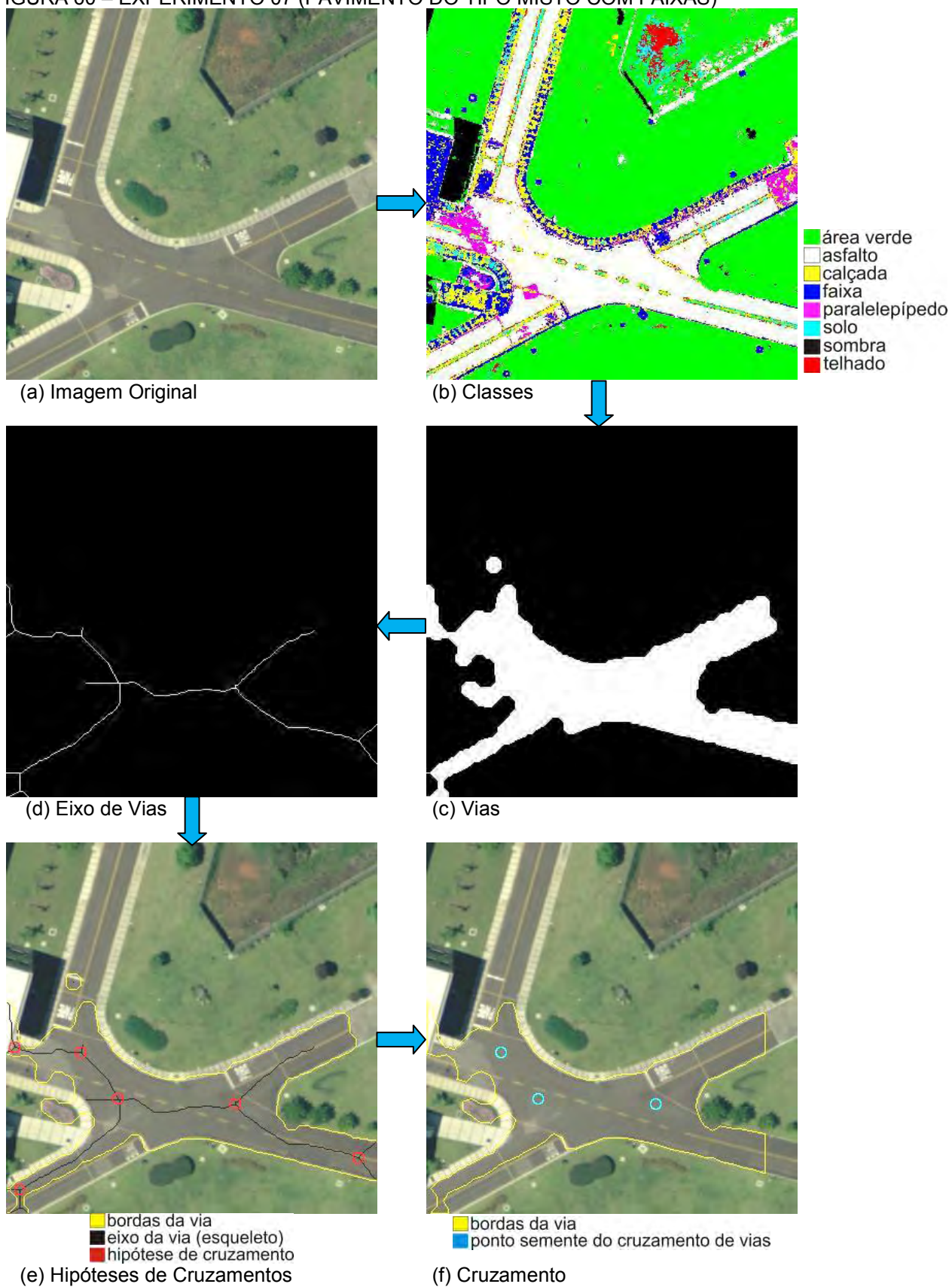


FIGURA 61 – EXPERIMENTO 08 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO COM FAIXA)

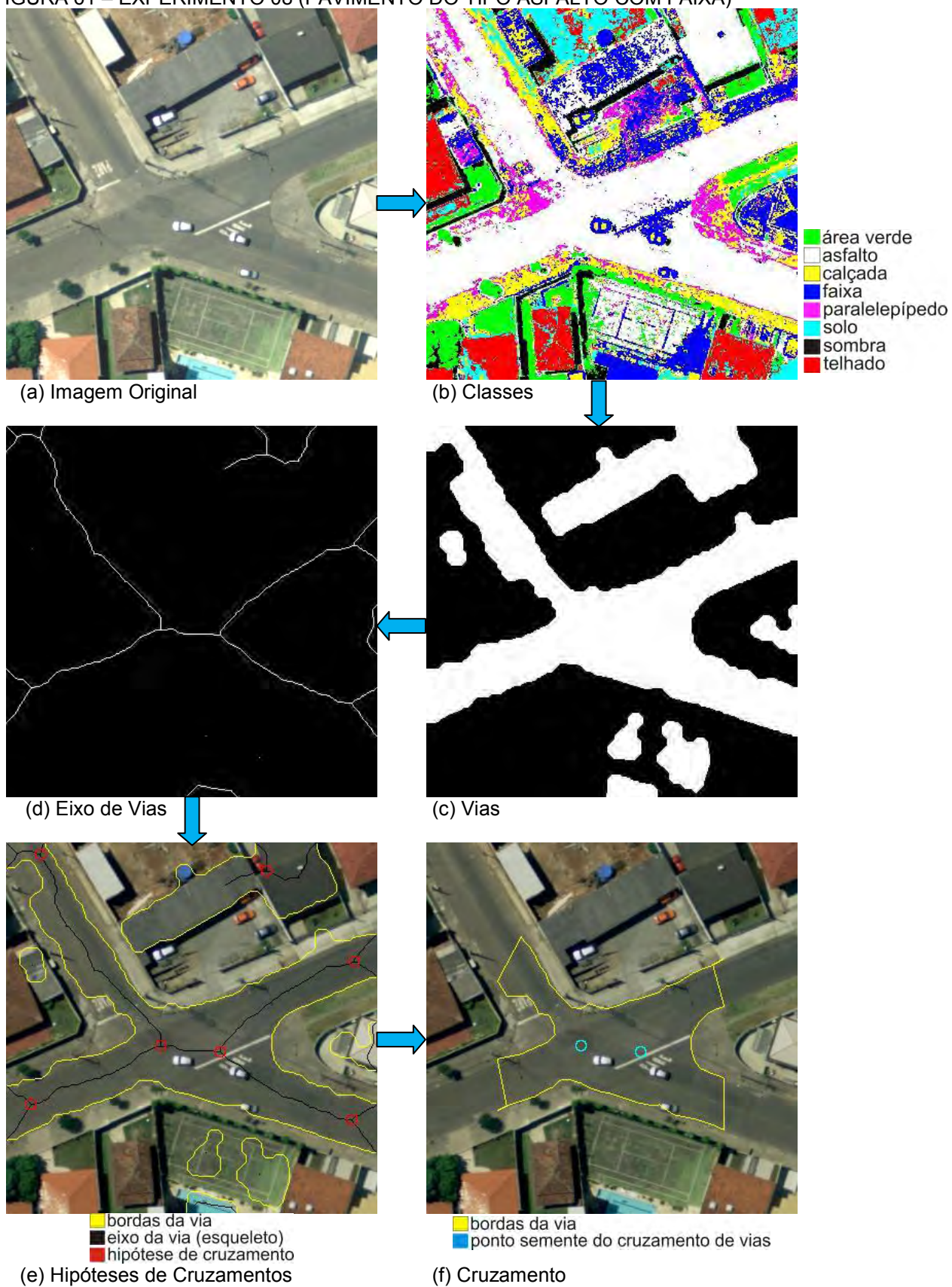


FIGURA 62 – EXPERIMENTO 09 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO COM FAIXA)

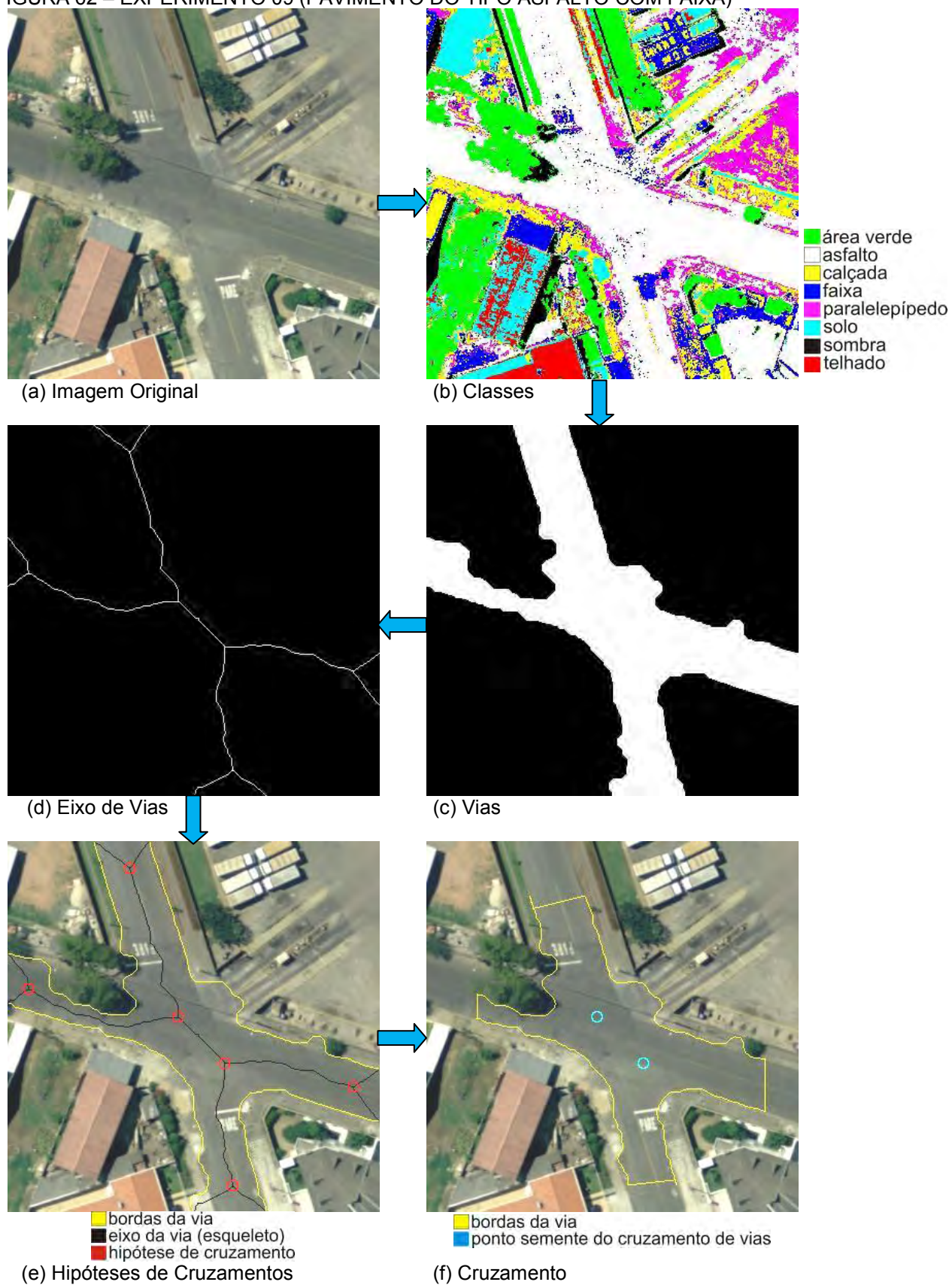


FIGURA 63 – EXPERIMENTO 10 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO COM FAIXA)

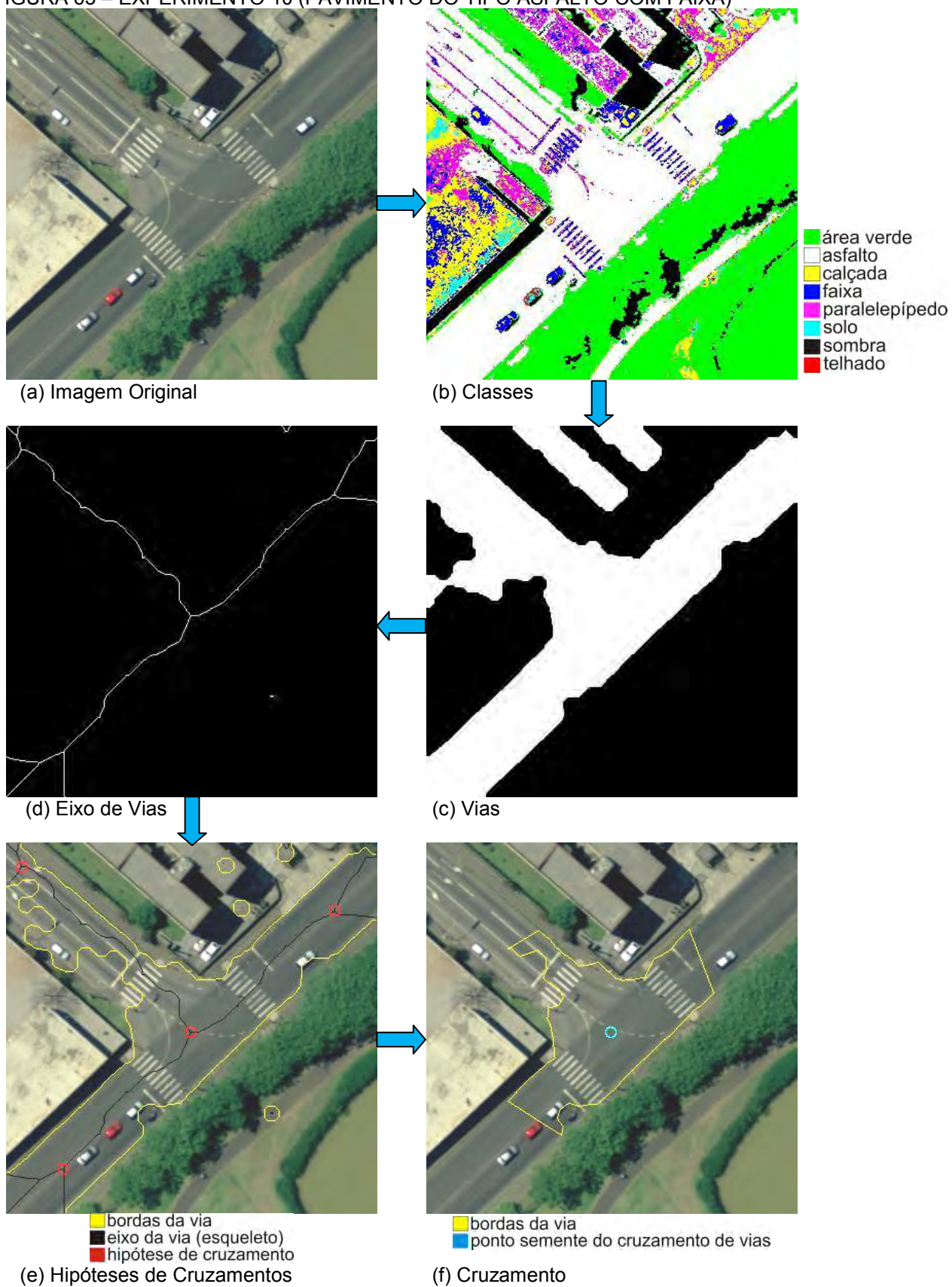


FIGURA 64 – EXPERIMENTO 11 (PAVIMENTO DO TIPO PARALELEPÍPEDO)

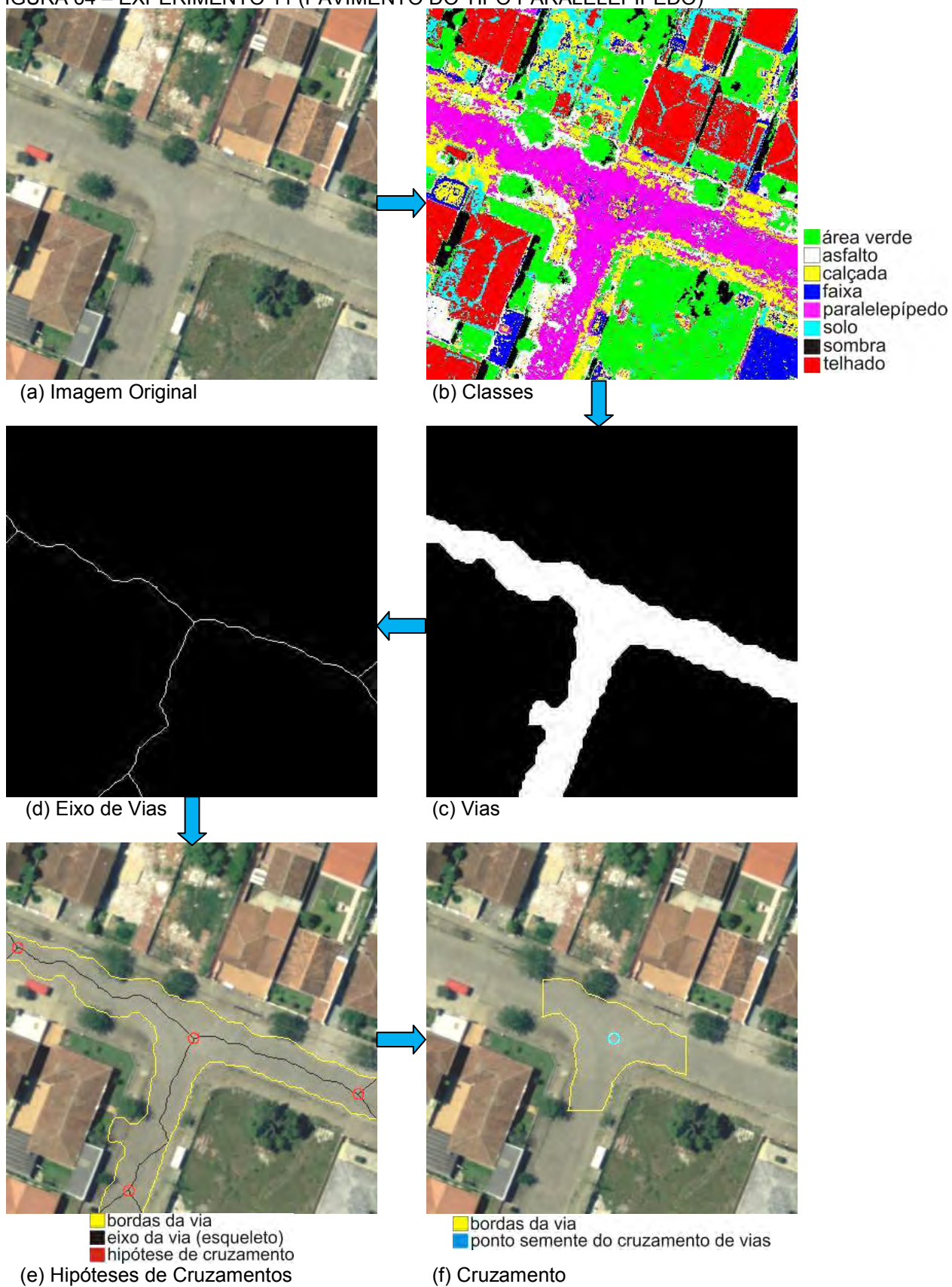


FIGURA 65 – EXPERIMENTO 12 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO)

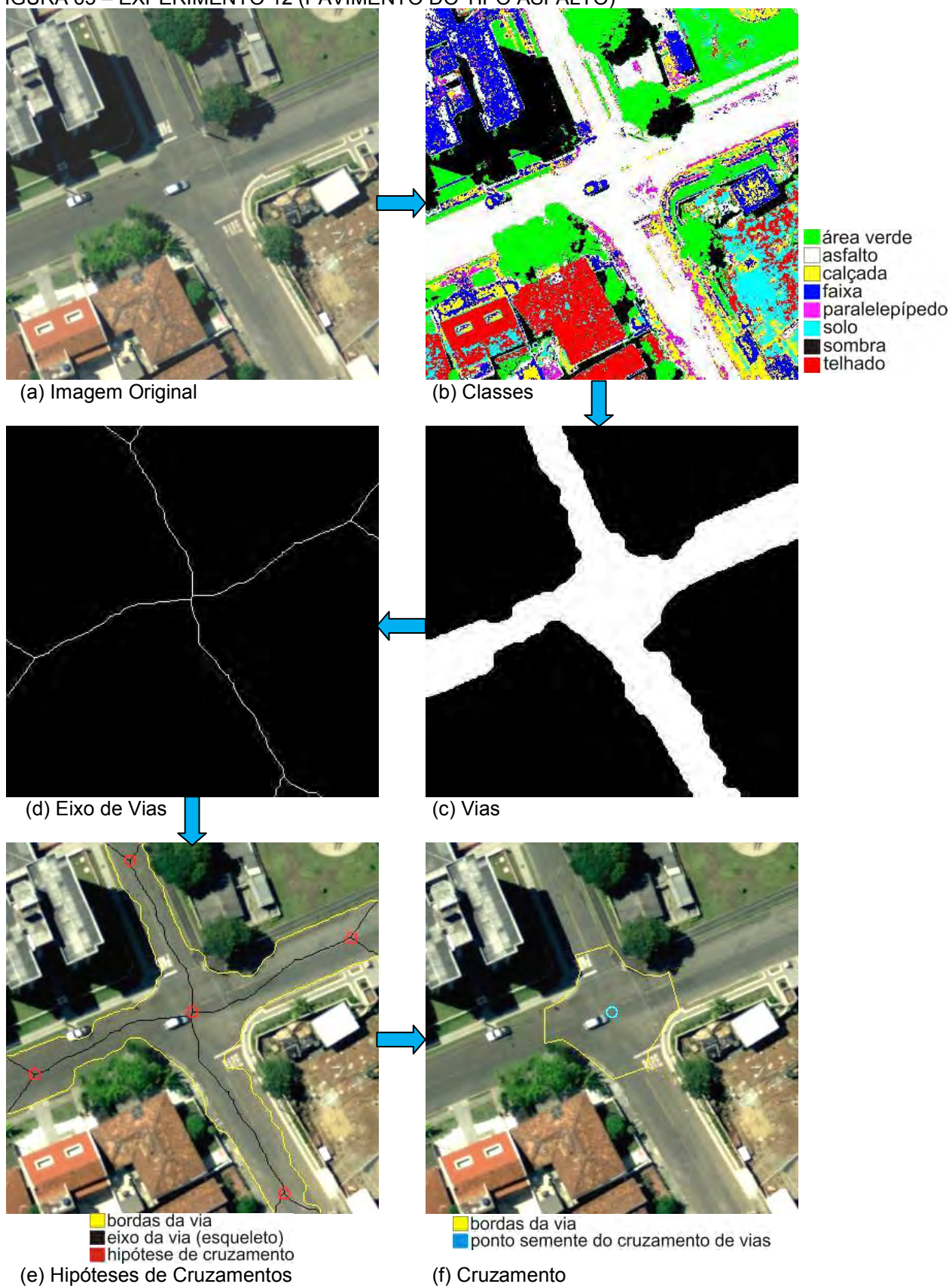


FIGURA 66 – EXPERIMENTO 13 (PAVIMENTO DO TIPO MISTO)

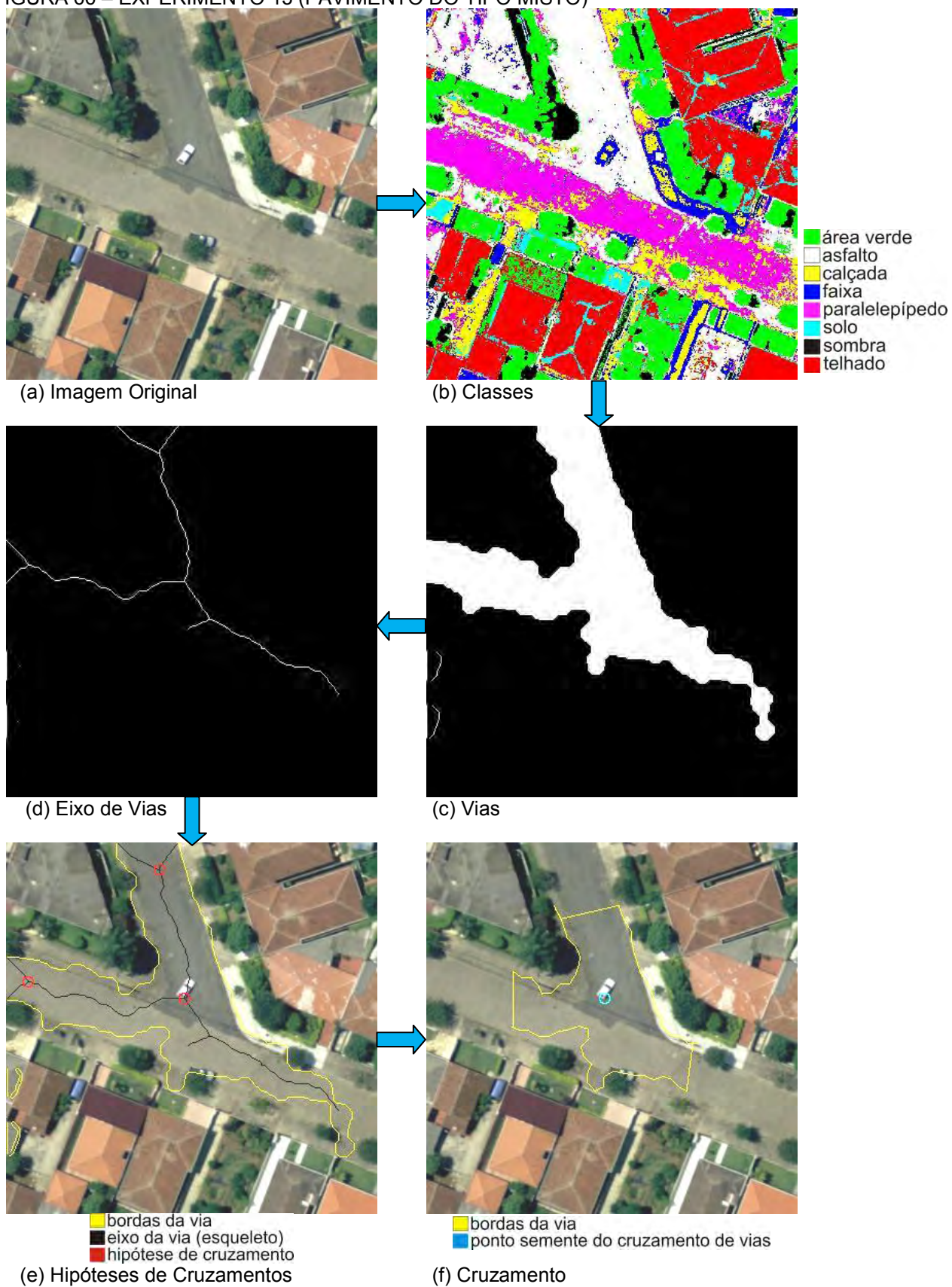


FIGURA 67 – EXPERIMENTO 14 (PAVIMENTO DO TIPO ASFALTO)



5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para auxiliar a análise e discussão dos resultados alcançados com a aplicação da estratégia proposta, os cruzamentos foram separados em duas classes, a saber:

- **Cruzamento simples:** formados por um único ponto semente de cruzamento de via;

- **Cruzamento complexo:** formados por mais de um ponto semente de cruzamento de via.

Aplicando-se a classificação acima nos resultados apresentados na Tabela 4 temos que os experimentos 01, 03, 04, 05, 10, 11, 12 e 13 possuem cruzamentos simples; e os experimentos 02, 06, 07, 08, 09 e 14 possuem cruzamentos complexos.

Para a análise dos resultados da aplicação da estratégia semi-automática proposta, a extração do cruzamento de vias é dividida em duas partes, a saber: (a) **ponto semente:** círculo localizado no centro do cruzamento da via (na cor azul claro). A avaliação deste item será realizada através da comparação entre a quantidade de pontos sementes extraída pela aplicação e a quantidade do número de cruzamentos possíveis definidas na segunda coluna da Tabela 3; e as (b) **bordas das vias:** que são os pixels que definem as bordas das vias (na cor amarelo). Para análise deste item é utilizado o critério de completeza, onde, a razão entre o que foi extraído pela aplicação da estratégia proposta e dados de referência obtidos manualmente (na cor magenta) com o auxílio do software Paint.

A equação (32) define o critério de completeza que deve ter valor no intervalo de [0,1] sendo que 1 é o valor ótimo (ZANIN, 2004).

$$\text{completeza} = \frac{\text{número de elementos extraídos pela aplicação}}{\text{número total de elementos obtidos manualmente}} \quad (32)$$

O número de elementos extraídos e o número total de elementos obtidos manualmente são medidas desenvolvidas com base no número de pixels utilizados para representar a feição extraída e de referência, demonstrados na equação (33).

$$\text{número de elementos extraídos} = \sum_{i=0}^{n-1} f_i \quad (33)$$

onde f_i , é o valor atribuído a cada uma das n feições extraídas, representando o número de pixels utilizados para representá-la. O número total de elementos obtidos manualmente seguem o mesmo critério que o número de elementos extraídos.

Nas imagens dos experimentos apresentados a seguir, tem-se: (a) representado na cor azul claro, a localização do ponto semente dos cruzamentos de vias; (b) representado na cor amarelo, os pixels das bordas das vias extraídos com a aplicação do Módulo [3]; e (c) representado na cor magenta, os pixels das bordas das vias extraídos manualmente estão representados na cor magenta.

5.1. Experimento 01

A figura 68 apresenta uma imagem de 361 x 361 pixels com um cruzamento simples em forma de “+” e a via com pavimentação do tipo asfalto onde se observa que a oclusão provocada por veículos e sombras de árvores, e a classificação errônea de pixels da classe vias causa em alguns pontos da via um estreitamento e em outros um alargamento que compromete a qualidade da extração dos pixels que definem as bordas das vias, contudo, não compromete a localização do ponto semente do cruzamento de vias. Os resultados demonstram que a estratégia proposta definiu com 100% de acerto a quantidade de ponto semente e com 80% o índice de completeza dos pixels que definem as bordas do cruzamento de vias.

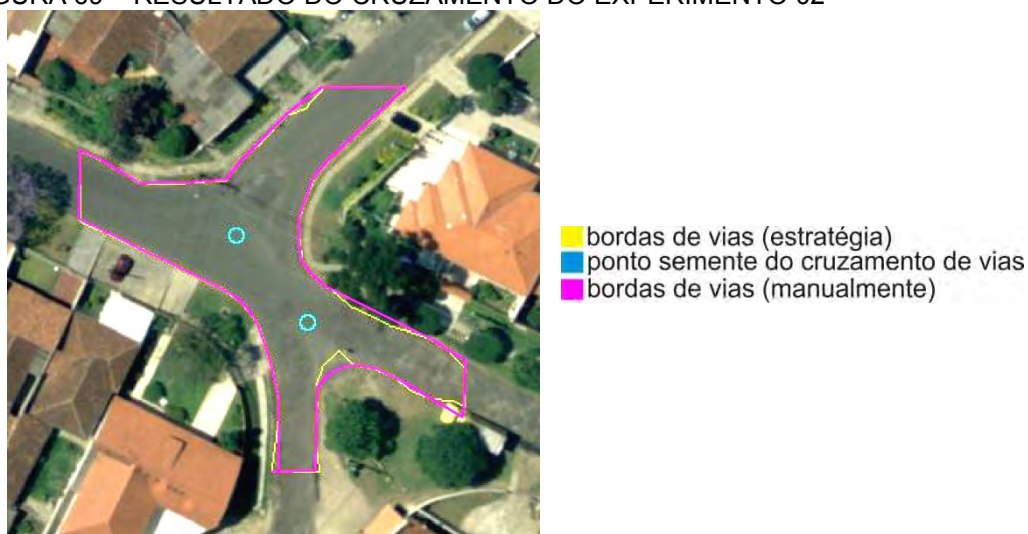
FIGURA 68 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 01



5.2. Experimento 02

A figura 69 apresenta uma imagem de 361 x 361 pixels com dois cruzamentos em forma de “T”, classificados como cruzamento complexo, e a via com pavimentação do tipo asfalto onde se observa que a oclusão provocada por sombras de árvores, e a classificação errônea de pixels da classe vias causa em alguns pontos da via um estreitamento e em outros um alargamento que compromete a qualidade da extração dos pixels que definem as bordas das vias, contudo, não compromete a localização dos pontos sementes dos cruzamentos de vias. Os resultados demonstram que a estratégia proposta definiu com 100% de acerto a quantidade de pontos sementes e com 80% o índice de completeza dos pixels que definem as bordas do cruzamento de vias.

FIGURA 69 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 02



5.3. Experimento 03

A figura 70 apresenta uma imagem de 361 x 361 pixels com um cruzamento simples em forma de “T” e a via com pavimentação do tipo asfalto onde se observa que a oclusão provocada por sombras de árvores, e a classificação errônea de pixels da classe vias causa em alguns pontos da via um estreitamento e em outros um alargamento que compromete a qualidade da extração dos pixels que definem as bordas das vias, contudo, não compromete a localização do ponto semente do

cruzamento de vias. Os resultados demonstram que a estratégia proposta definiu com 100% de acerto a quantidade de ponto semente e com 60% o índice de completudeza dos pixels que definem as bordas do cruzamento de vias.

FIGURA 70 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 03



5.4. Experimento 04

A figura 71 apresenta uma imagem de 361 x 361 pixels com um cruzamento simples em forma de “T” e a via com pavimentação do tipo asfalto onde se observa que a oclusão provocada por sombras de árvores e a classificação errônea de pixels da classe vias causa em alguns pontos da via um estreitamento e em outros um alargamento que compromete a qualidade da extração dos pixels que definem as bordas das vias, contudo, não compromete a localização do ponto semente do cruzamento de vias. Os resultados demonstram que a estratégia proposta definiu com 100% de acerto a quantidade de ponto semente e com 50% o índice de completudeza dos pixels que definem as bordas do cruzamento de vias.

FIGURA 71 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 04



5.5. Experimento 05

A figura 72 apresenta uma imagem de 361 x 361 pixels com um cruzamento simples em forma de “Y” e a via com pavimentação do tipo asfalto onde se observa que a oclusão provocada por veículos e faixas de sinalização e a classificação errônea de pixels da classe vias causa em alguns pontos da via um alargamento que compromete a qualidade da extração dos pixels que definem as bordas das vias, contudo, não compromete a definição da quantidade de ponto semente do cruzamento de vias. Os resultados demonstram que a estratégia proposta definiu com 100% de acerto a quantidade de ponto semente e com 95% o índice de completude dos pixels que definem as bordas do cruzamento de vias.

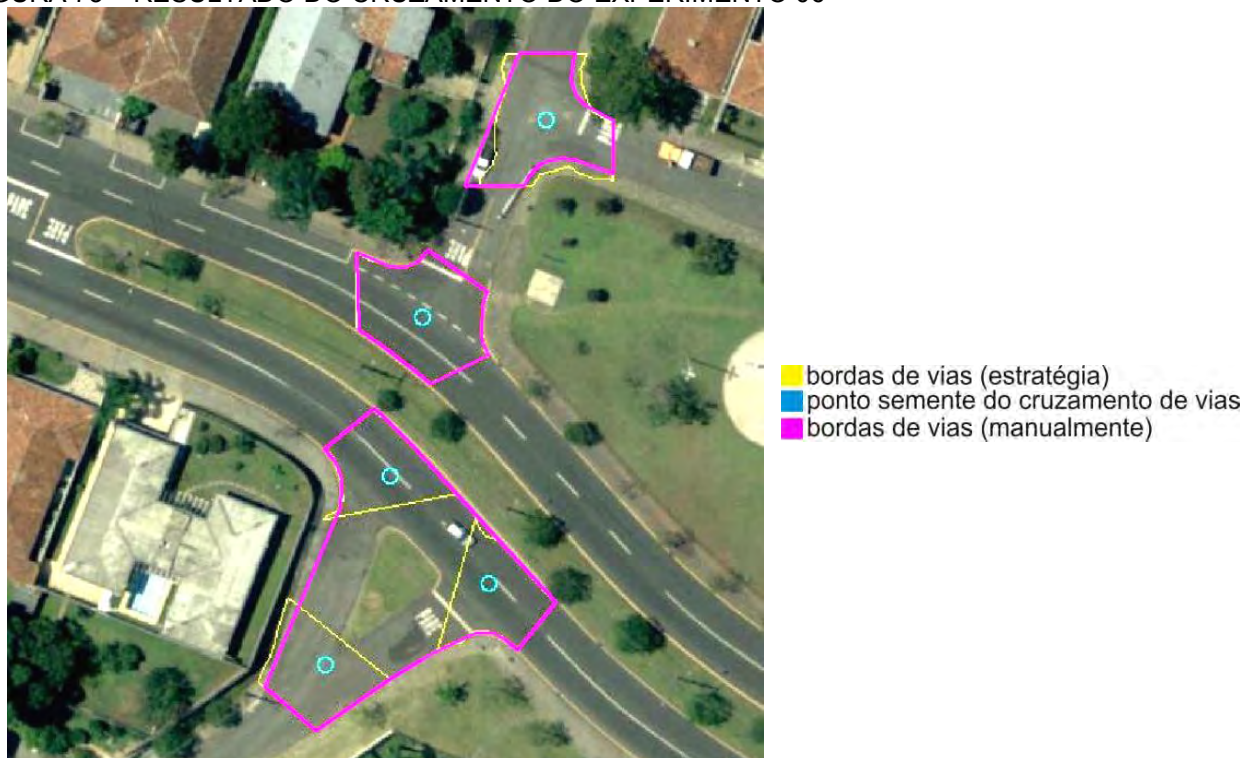
FIGURA 72 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 05



5.6. Experimento 06

A figura 73 apresenta uma imagem de 515 x 515 pixels com cinco cruzamentos, sendo quatro em forma de “T” e um em forma de “Y”, classificados como cruzamento complexo e com as vias com pavimentação do tipo asfalto onde se observa que a oclusão provocada por veículos, faixas de sinalização e sombras de árvores e a classificação errônea de pixels da classe vias causa em alguns pontos da via um estreitamento e em outros um alargamento que compromete a qualidade da extração dos pixels que definem as bordas das vias, contudo, não compromete a definição da quantidade de pontos sementes dos cruzamentos de vias. Os resultados demonstram que a estratégia proposta definiu com 100% de acerto a quantidade de pontos sementes e com 85% o índice de completeza dos pixels que definem as bordas do cruzamento de vias.

FIGURA 73 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 06



5.7. Experimento 07

A figura 74 apresenta uma imagem de 361 x 361 pixels com três cruzamentos, sendo dois em forma de “Y” e um em forma “T”, classificados como

cruzamento complexo e com a via com pavimentação do tipo asfalto e paralelepípedo onde se observa no canto esquerdo inferior da imagem, que a oclusão provocada pelas faixas de sinalização e a classificação errônea de pixels da classe vias causa em alguns pontos da via um estreitamento e em outros um alargamento que compromete a qualidade da extração dos pixels que definem as bordas das vias, e a localização do ponto semente do cruzamento de vias não comprometendo a definição da quantidade destes pontos. Os resultados demonstram que a estratégia proposta definiu com 100% de acerto a quantidade de pontos sementes e com 75% o índice de completeza dos pixels que definem as bordas do cruzamento de vias.

FIGURA 74 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 07



5.8. Experimento 08

A figura 75 apresenta uma imagem de 361 x 361 pixels com dois cruzamentos, sendo um em forma de “Y” e um em forma “T”, classificados como cruzamento complexo e com a via com pavimentação do tipo asfalto onde se observa que a oclusão provocada por veículos, sombras de postes e faixas de sinalização e a classificação errônea de pixels da classe vias causa em alguns pontos da via um estreitamento e em outros um alargamento que compromete a qualidade da extração dos pixels que definem as bordas das vias, contudo, não compromete a definição da quantidade de pontos sementes dos cruzamentos de vias. Os resultados demonstram que a estratégia proposta definiu com 100% de

acerto a quantidade de ponto semente e com 90% o índice de completudeza dos pixels que definem as bordas do cruzamento de vias.

FIGURA 75 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 08



5.9. Experimento 09

A figura 76 apresenta uma imagem de 361 x 361 pixels com dois cruzamentos em forma de “Y”, classificados como cruzamentos complexos e com a via com pavimentação do tipo asfalto onde se observa que a oclusão provocada por sombras de árvores, copas de árvores e faixas de sinalização e a existência de pavimentação do tipo asfalto no interior da quadra (indicado com um círculo vermelho na figura 76) classifica erroneamente os pixels da classe vias e causa em alguns pontos da via um estreitamento e em outros um alargamento que compromete a qualidade da extração dos pixels que definem as bordas das vias, contudo, não compromete a definição da quantidade de pontos sementes dos cruzamentos de vias. Os resultados demonstram que a estratégia proposta definiu com 100% de acerto a quantidade de ponto semente e com 60% o índice de completudeza dos pixels que definem as bordas do cruzamento de vias.

FIGURA 76 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 09



5.10. Experimento 10

A figura 77 apresenta uma imagem de 361 x 361 pixels com um cruzamento simples em forma de “T” e a via com pavimentação do tipo asfalto onde se observa que a oclusão provocada por veículos, faixas de sinalização e a classificação errônea de pixels da classe vias causa em alguns pontos da via um estreitamento que compromete a qualidade da extração dos pixels que definem as bordas das vias, contudo, não comprometem a definição da quantidade de ponto semente do cruzamento de vias. Os resultados demonstram que a estratégia proposta definiu com 100% de acerto a quantidade de ponto semente e com 85% o índice de completude dos pixels que definem as bordas do cruzamento de vias.

FIGURA 77 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 10



5.11. Experimento 11

A figura 78 apresenta uma imagem de 361 x 361 pixels com um cruzamento simples em forma de “T” e a via com pavimentação do tipo paralelepípedo onde se observa que a classificação errônea de pixels da classe vias causa em alguns pontos da via um estreitamento e outros um alargamento que compromete a qualidade da extração dos pixels que definem as bordas das vias, contudo, não compromete a definição da quantidade de ponto semente do cruzamento de vias. Os resultados demonstram que a estratégia proposta definiu com 100% de acerto a quantidade de ponto semente e com 70% o índice de completude dos pixels que definem as bordas do cruzamento de vias.

FIGURA 78 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 11



5.12. Experimento 12

A figura 79 apresenta uma imagem de 361 x 361 pixels com um cruzamento simples em forma de “T” e a via com pavimentação do tipo asfalto onde se observa que a oclusão provocada por veículos, sombras de árvores e faixas de sinalização e a classificação errônea de pixels da classe vias causa um estreitamento da via que compromete a qualidade da extração dos pixels que definem as bordas das vias, contudo, não compromete a definição da quantidade de ponto semente do cruzamento de vias. Os resultados demonstram que a estratégia proposta definiu com 100% de acerto a quantidade de ponto semente e com 90% o índice de completude dos pixels que definem as bordas do cruzamento de vias.

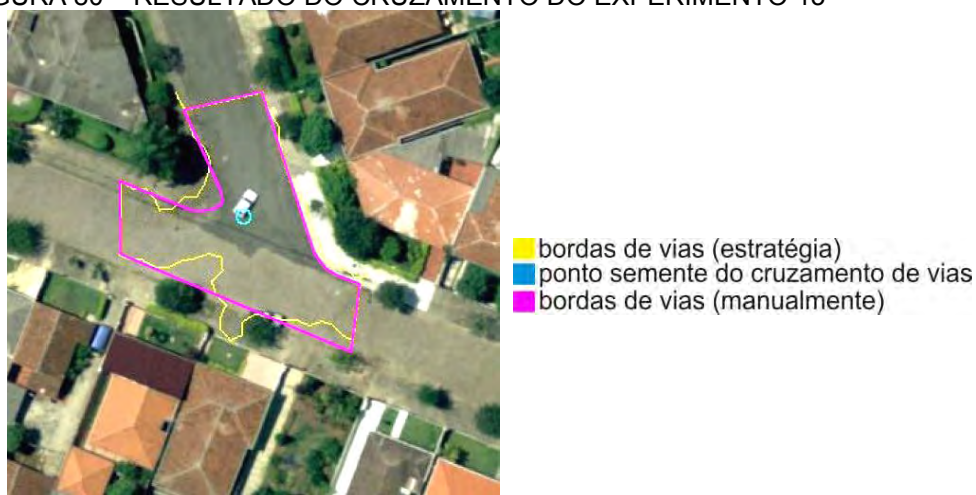
FIGURA 79 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 12



5.13. Experimento 13

A figura 80 apresenta uma imagem de 361 x 361 pixels com um cruzamento simples em forma de “Y” e a via com pavimentação do tipo asfalto e paralelepípedo onde se observa que a oclusão provocada por veículo e sombras de árvores e a classificação errônea de pixels da classe vias causa em alguns pontos da via um estreitamento, e em outros um alargamento que compromete a qualidade da extração dos pixels que definem as bordas das vias, contudo, não compromete a definição da quantidade de ponto semente do cruzamento de vias. Os resultados demonstram que a estratégia proposta definiu com 100% de acerto a quantidade de ponto semente e com 70% o índice de completeza dos pixels que definem as bordas do cruzamento de vias.

FIGURA 80 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 13



5.14. Experimento 14

A figura 81 apresenta uma imagem de 2062 x 2062 pixels com dez cruzamentos, sendo sete em forma de “+” e três em forma de “T” (indicados com círculo vermelho na figura 81) e via com pavimentação do tipo asfalto onde se observa que a oclusão provocada por veículo, sombras de árvores e faixas de sinalização, e a classificação errônea de pixels da classe vias causa em alguns pontos da via um estreitamento e em outros um alargamento que compromete a qualidade da extração dos pixels que definem as bordas das vias e compromete a definição da quantidade de pontos sementes dos cruzamentos de vias. Os resultados demonstram que a estratégia proposta definiu com 70% de acerto a quantidade de ponto semente e com 80% o índice de completude dos pixels que definem as bordas do cruzamento de vias.

FIGURA 81 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DO EXPERIMENTO 14



A Tabela 4 apresenta o resumo geral dos resultados alcançados nos experimentos com a aplicação da estratégia semi-automática proposta.

TABELA 4 –RESULTADOS ALCANÇADOS PELA ESTRATÉGIA PROPOSTA

Experimento	Número de Cruzamentos Existentes	Número de Pontos Sementes Definidos pela Estratégia	Total e acerto na quantidade de Pontos Sementes (%)	Índice de Completeza (%)
01	1	1	100,00	80,00
02	2	2	100,00	80,00
03	1	1	100,00	60,00
04	1	1	100,00	50,00
05	1	1	100,00	95,00
06	5	5	100,00	85,00
07	3	3	100,00	75,00
08	2	2	100,00	90,00
09	2	2	100,00	60,00
10	1	1	100,00	85,00
11	1	1	100,00	70,00
12	1	1	100,00	90,00
13	1	1	100,00	70,00
14	10	7	70,00	80,00
Total	32	29	90,62	76,43

Como se observa na Tabela 4 a estratégia proposta apresentou um total de 90,62% de acerto da quantidade de pontos sementes que definem os cruzamentos de vias e um índice de completeza de 76,43% nos pixels que definem as bordas das vias.

No experimento 14 o percentual de 70% de acerto na quantidade de pontos sementes de cruzamentos de vias se deve a deficiência, apresentada pela aplicação do Módulo [3], da segmentação da imagem na definição dos pixels pertencentes à classe via e isto não permitiu a definição de três cruzamentos de vias existentes na imagem. Neste caso, para melhorar o percentual de acerto da quantidade de pontos sementes e a eficiência do índice de completeza dos pixels que definem as bordas das vias pode-se aumentar o conjunto de dados de treinamento através da coleta manual de pixels em outros pontos da imagem aumentando a eficiência da árvore de decisão que cotem as faixas de valores dos pixels que permite a segmentação da imagem dos experimentos.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma estratégia semi-automática para a detecção e extração do cruzamento de vias com o uso de ortoimagens de alta resolução espacial em cenas de áreas urbanas com cinco objetivos específicos.

Para atender aos objetivos propostos, foi realizado a aplicação do WEKA na geração da árvore de decisão com as faixas de valores dos tons de cinza que permitiram a segmentação da imagem e a separação dos pixels pertencentes a classe via, sobre os quais, foram aplicados operadores morfológicos e algoritmos matemáticos que geraram os eixos das vias (esqueletos), a detecção de hipóteses de cruzamentos (pontos sementes dos cruzamentos de vias) e a extração do cruzamento de vias (delineamento das bordas das vias).

Para a aplicação da estratégia proposta foram implementados programas computacionais em linguagem C++ BUILDER 6.0 e MATLAB, e os resultados apresentados nos experimentos foram analisados e demonstraram a viabilidade da aplicação, bem como, as situações potencialmente problemáticas da extração do cruzamento de vias em cenas de áreas urbanas densas.

Os procedimentos aplicados permitiram o conhecimento explícito: da segmentação da imagem em classes de objetos que a formam; da separação da classe do objeto via; da aplicação da morfologia matemática para solução de oclusões (no interior e nas bordas da via) e extração do eixo da via; e da detecção e extração dos cruzamentos das vias.

No geral, a aplicação da estratégia propostas obteve um total de 90,62% de acerto na quantidade de pontos sementes que definem os cruzamentos e um índice de completeza de 76,43% nos pixels que definem as bordas das vias.

Durante a execução dos experimentos, observou-se que as oclusões ocasionadas por veículos e sombras de objetos projetadas sobre a borda das pistas das vias, prejudicam a localização do eixo e em consequência a extração do cruzamento de vias.

Outro fator observado é que a coleta manual das amostras influencia a qualidade da segmentação da imagem, por este motivo, fazendo-se necessário um

aumento da quantidade de pixels coletados em cada amostra, bem como a coleta dessas amostras em locais da imagem que apresentem maior distinção nos pixels que formam as classes dos objetos que formam a imagem.

O uso da morfologia matemática mostrou-se eficaz na redução dos efeitos dos pixels classificados inadequadamente e os efeitos das oclusões provocadas por veículos e faixas, localizados no centro das pistas de rolamento das vias. Já os casos de oclusão nas bordas das vias precisa de um estudo mais aprofundado para serem solucionados. Além da solução dos casos de oclusão o uso de técnicas morfológicas aliadas à definição de polígonos da classe vias apresenta grande potencial para a detecção de eixos e cruzamentos de vias em imagem digitais de alta resolução em cenas de áreas urbanas densas respondendo as expectativas esperadas.

As vantagens da estratégia proposta são:

- o uso do software WEKA com aplicação dos conceitos de aprendizagem de máquina, árvore de decisão que garante a segmentação de imagem com maior qualidade quando comparada aos métodos de Distância Mínima ou Máxima Verossimilhança (LUZ *et al.* 2009);
- a aplicação de operadores morfológicos na redução dos casos de oclusões e na extração dos eixos das vias;
- o uso do algoritmo de Bresenham (1965) na minimização do efeito “dente de serra” dos pixels que formam as bordas das vias;
- a extração do cruzamento de vias em imagens de cenas de áreas urbanas densas.

As desvantagens da estratégia proposta são:

- a falta de análise topológica do contexto global detalhando a relação existente entre os objetos que formam a imagem e os materiais que os compõem no mundo real;

- a falta de análise topológica de contexto local detalhando a relação entre os veículos e projeções de sombra que prejudicam a definição das vias e em consequência a determinação do seu cruzamento;
- a não identificação e reconstrução das regiões da imagem ocupadas por veículos estacionados nas bordas das vias que provocam o não paralelismo entre as bordas dificultando a extração de um eixo de via centralizado.

Deste modo, o presente trabalho tem por finalidade contribuir com a automação de processos fotogramétricos para extração de eixos, detecção de pontos sementes em vias e extração de cruzamentos de vias permitindo um ganho significativo de produtividade, apesar da necessidade de intervenção de humana na coleta manual de amostras sobre a imagem.

6.2. RECOMENDAÇÕES

Alguns pontos podem ser apontados para a obtenção de melhores resultados na extração de detecção dos eixos e dos cruzamentos de vias.

O primeiro ponto: a aplicação do trabalho de Hinz (2002) que tem como objetivo a determinação de área de sombra e a localização de faixas e veículos existentes sobre a pista rolamento das vias. A implementação deste trabalho pode auxiliar na minimização das oclusões provocadas por veículos estacionados nas bordas das vias além de permitir a extração automática de vias através da detecção de faixas de sinalização da vias e isto pode reduzir o trabalho de coleta manual de amostras melhorando a automação do processo.

O segundo ponto: a obtenção de uma largura média da via coletando manualmente eixos e bordas de vias reduzindo a influências de obstruções existentes nas bordas, permitindo uma reconstrução mais precisa das vias.

O terceiro ponto: desenvolver o Módulo [3] também em linguagem de programação C++ BUILDER 6.0 com a aplicação direta do WEKA reduzindo o tempo de processamento e extração dos cruzamentos das vias.

O quarto ponto: seria a aplicação da estratégia proposta para imagens de cenas de áreas rurais onde são menores a complexidade dos objetos que foram a imagem.

O quinto e último ponto: a utilização de dados topográficos, sobre vias, existentes em SIG para a extração automatizada das vias eliminando as operações humanas no processo.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, Q. A. Your question answered: the layman's perspective on technical theory and practical applications of mapping and GIS. In: **ASPRS Journal of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, Columns & Updates, v.75, n. 3, p. 231-232, mar. 2009.
- AMERI, F.; MOBARAKI, A. M.; ZOEJ, M. J. V. Semi-automatic extraction of different-shaped road centerlines from ms and pan-sharped ikonos images. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPR08**. Beijing, China, vol. XXXVII, part. b3b, p. 621, 2008.
- BANON, G. J. F.; BARREIRA, J. **Bases da morfologia matemática para a análise de imagens binárias**. UFPE, Recife, 1994.
- BARSI, A.; HEIPKE, C.; WILLRICH, F. Junction extraction by artificial neural network system jeans. In: **ISPRS Technical Commission III Symposium 2002**. Photogrammetry Compute Vision, PCV'02, Graz 2002 International. Arch. Photogrammetry and Remote Sensing. Graz, Australia, vol. 34, part. b-18, p. 9-13, set. 2002.
- BAUMGARTNER, A.; STEGER, C.T.; WIEDEMANN, C.; MAYER, H.; ECKSTEIN, W.; EBNER, H. Update of Roads in GIS from Aerial Imagery: Verification and Multi-Resolution Extraction. In: **IAPRS – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. XXXI, part. b3, p. 53-58, 1996.
- BAUMGARTNER, A.; ECKSTEIN, W.; MAYER, H.; HEIPKE, C.; EBNER H. **Automatic Extraction of Man-Made Objects form Aerial and Space Images**. Ed. A. Gruen – Basel, Boston, Berlin, Birkhauser, v. 2, p. 299-302, 1997.
- BAUMGARTNER, A. Extraction of roads from aerial imagery based on grouping and local context. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, ISPRS Symposium, Commission III, Columbus, Ohio, USA, jul. 6-10, vol. 32, part. 3/1, p. 196-201, 1998.
- BAUMGARTNER, A.; STEGER, C.; MAYER, C.; ECKSTEIN, W.; BNER. H. Automatic road extraction based on multi-scale, grouping, and context. In: **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 65, n. 7, p. 777-785, jul, 1999a.
- BAUMGARTNER, A.;ECKSTEIN, W.; HEIPKE, C.; HINZ S.; MAYER, H; RADIG, B; STEGER, C.; WIEDEMANN, C. T-rex: tum research on road extraction. In:

Heipke, C., Mayer, H. (Eds.), Festschrift für Prof. Dr. Ing. Heinrich Ebner zum 60. Geburtstag, Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, p. 43–64, 1999b.

BAUMGARTNER, A.; HINZ, S.; WIDEMANN C. Efficient methods and interfaces for road tracking. In: **ISPRS Technical Commission III Symposium 2002**. Photogrammetry Compute Vision, PCV'02, Graz 2002 International. Arch. Photogrammetry and Remote Sensing, Graz, Australia, vol. 34, part. b3, p. 28-31, 2002.

BAZZAN, A. L.; ENGEL, P. M.; SCHROEDER, L. F.; SILVA, S. C. Automated annotation of keywords for proteins related to mycoplasmataceae using machine learning techniques. In: **Bioinformatics**, v. 18, p.35-43, 2002.

BORENSTEIN E.; SHARON E.; ULLMAN S. Combining Top-down and Bottom-up Segmentation. In: **IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop**, vol. 4, 2004.

BRASIL. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, v.189, n. 06, p. 38, 24 set. 1997.

BRASIL. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes - DNIT. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de projeto de interseções**. 2.ed., 528 pg., Rio de Janeiro, 2005.

BRESENHAM, J. Algorithm for Computer Control of a Digital Plotter. In: **IBM Systems Journal**, vol. 4, n. 1, p. 25-30, 1965.

CARVALHO, D. R. **Árvore de decisão / algoritmo genético para tratar o problema de pequenos disjuntos em classificação de dados**. 162 f. Tese da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 2005.

CANNY, J. A Computational approach to edge detection, **IEEE Transactions on Pattern Analysis and machine Intelligence**, v. 8, n. 6, p. 679-698, 1986.

CRAMER, M.; STALLMAN, D.; HAALA, N. High precision georeferencing using GPS/INS and image matching. In: **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 56, issue 1, p. 1-12, jun. 2001.

- CRAMER, M. Integrated GPS/Inertial and digital aerial triangulation – recent test results. In: **Photogrammetrische Woche 2003**, Institute für Photogrammetrie. Dieter Fritsch ed., p. 161-172, 2003.
- CRAMER, M. The ADS40 Vaihingen/Enz geometric performance test. In: **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 60, p. 363-374, 2006.
- DAI, C.; JI, S.; ZHANG, Y. Multiple-view matching AMMGC model for three-line-array digital images. In: **Information Science and Engineering 2008. ISISE'08**. International Symposium on, v. 2, p. 139-142, 20-22 Dec. 2008.
- DAL POZ, A. P.; AGOURIS, P. Georeferenced road extraction and formulation of hypotheses for new road segments. In: Spie's 12th annual international symposium on aerospace/defense sensing, simulation, and control, V. 4054, 2000, Orlando-FL, Usa – **Conference Automated Geo-Spatial Image and Data Exploitation**, Orlando-FL, USA, p. 56-65, 2000a.
- DAL POZ, A. P.; AGOURIS, P. Extração semi-automática de rodovias usando programação dinâmica. In: **II Workshop Brasileiro de Geoinformática**, São Paulo, p. 3-9, 2000b.
- DAL POZ, A. P.; GYFTAKIS, S.; AGOURIS, P. Semi-automated Road extraction: Comparison of methodologies and experiments. In: **DC 2000 ASPRS Annual Conference, 2000**, Washington-DC, 2000c.
- DAL POZ, A. P.; AGOURIS, P.; GYFTAKIS, S. Metodologias para a extração semi-automática de rodovias em imagens digitais: In: **IV Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário**, Florianópolis – SC: UFSC, 2000d.
- DAL POZ, A. P.; AGOURIS, P. Um algoritmo de otimização global para a extração de rodovias em imagens digitais. In: **Revista Brasileira de Cartografia**, nº 53, p. 65-72, 2001.
- DAL POZ, A. P. **Modelos e estratégias para a extração de malha viária em imagens digitais**. Relatório FAPESP, Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2002.
- DAL POZ, A. P.; VALE, G. M.; OLIVEIRA, R. M. S. Extração semi-automática de rodovias em imagens digitais usando metodologias baseadas em programação dinâmica e contorno ativo. In: **XXI Congresso Brasileiro de Cartografia**, Belo Horizonte, Minas Gerais, pg. 134, out. 2003.

- DAL POZ, A. P.; ZANIN, R. B.; VALE, G. M. Extração automática da malha viária em imagens de média e alta resolução de cenas rurais. In: **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia - GO, 16-21 abril, p.1183-1190, 2005.
- DAL POZ, A. P.; ZANIN, R. B.; VALE, G. M. Extração automática de feições rodoviárias em imagens digitais. In: **SBA Controle & Automação**, v. 18, n. 1, p. 44-54, mar. 2007.
- DAL POZ, A. P.; HABIB, A. F.; MARCATO, V. J.; CORREIA, L. S. Uso de dados fotogramétricos no refinamento geométrico de contornos de telhados de edifícios extraídos de dados laser. In: **Boletim de Ciências Geodésicas**, sec. artigos, Curitiba, v. 15, nº4, p.594-614, out.-dez., 2009.
- DAL POZ, A. P.; GALLIS, R. A.; SILVA, J. F. C. Extração semi-automática de rodovia baseada em um par estéreo de imagens aéreas e em otimização por programação dinâmica no espaço-objeto. In: **Boletim de Ciências Geodésicas**, sec. artigos, Curitiba, v. 16, nº 2, p.189-209, abr.-jun., 2010.
- ECKARDT, A.; BRAUNECKER, B.; SANDAU, R. Performance of the imaging system in the lh systems ADS40 airborne digital sensor. In: **IAPRS – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, The Netherlands, Amsterdam, v. 33, part. b3, p. 16-22, jul. 2000.
- ESPERANÇA, C.; CAVALCANTI, P. R. **Introdução à computação gráfica: rasterização**. Notas do Curso de Computação Gráfica da UFRJ. Rio de Janeiro, 2000.
- FACON, J. **Morfologia Matemática: Teorias e Exemplos**. 320 f. Editora Universitária Champagnat da Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba. 1996.
- FAYYAD, U. M.; SHAPIRO, G.P.; SMYTH, P. From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. In: **American Association for Artificial Intelligence – AAAIMIT**. p.37-54, 1996.
- FAYYAD, U. M.; UTHURUSAMY, R. **Evolving Data Mining into Solutions for Insights**. Communications of the ACM: vol.45, n. 8, p. 28-31, 2002.
- FRICKER, P.; ZUBERBÜHLER, F. **Introducción al Sensor Digital ADS 40**. Versão em Espanhol por Guillermo Gallo, LH Systems, LLC, 2000.

- FRICKER, P.; SCHAEPPPI, R.; WALKER, S. A. Results from test flights of the lh systems ADS40 airborne digital sensor. In: **22nd Asian Conference on Remote Sensing**, Singapore, 5-9 nov. 2001.
- FRICKER, P.; GALLO, G. M. High resolution color imagery for ortho maps and remote sensing. In: **Rio Pipeline Conference & Exposition**, Riocentro, Rio de Janeiro, aug. 2005a.
- FRICKER, P. The benefits of an airborne digital sensor an advanced system for high-resolution web-based multi-spectral imagery. In: **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Journal of the America Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 71, n. 11, p. 1243-1244, nov. 2005b.
- FRITSCH, D. Experiences with the Airborne Three-line Photogrammetric Image Acquisition System DPA. In: **D. Fritsch, D. Hobbie (Eds.), Photogrammetric Week '97**, Wichmann Verlag, Heidelberg, p. 63-74, 1997.
- GAUTAMA, S., GOEMAN, W.; D'HAeyer, J. Robust detection of road junctions in VHR images using an improved ridge detector. In: **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, vol.35, part. b3, p. 815–819, 2004
- GERKE, M., 2006. Automatic quality assessment of road databases using remotely sensed imagery. In: **Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodasie und Geoinformatik der Leibniz Universitat Hannover 261, and Deutsche Geodatische Kommission, Reihe C**, n. 599. Beck Verlag Munchen – Germany, p.105, 2006.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital imagem processing**. 3. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2008.
- GÜLCH, E. Digital systems for automated cartographic feature extraction. In: **IAPRS – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 32, part. b2, p.241-256, 2000.
- GREEN, K.; LOPEZ, C. Using object-oriented classification of ADS40 data to map the benthic habitats of the state of Texas. In: **ASPRS Journal of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, PE&RS**, v. 73, n. 8, article 861-865, aug. 2007.
- GWINNER K.; HAUBER E.; HOFFMANN H.; SCHOLTEN F.; JAUMANN R.; NEUKUM G.; PUGLISI G.; COLTELLI M. The HRSC-A Experiment on High Resolution Multispectral Imaging and DEM Generation at the Aeolian Islands. In:

13th Int. Conf. on Applied Geologic Remote Sensing, Vancouver B.C., Canada, vol. 1, p. 560-569, 1-3 mar. 1999.

HAALA, N.; FRITSCH, D.; STALLMANN, D.; CRAMER, M. On the performance of digital airborne pushbroom cameras for photogrammetric data processing - a case study. In: **Int'l Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 33, part b4/1, p. 324-331, 2000.

HEIER, H. Applications and market for digital airborne cameras. In: **Photogrammetric Week'99**, Dr Fritsch & R. Spiller, Eds, Wichmann Verlag, Heidelberg, 1999.

HEIPKE, C.; MAYER, H.; WIEDEMANN, C, JAMET, O. External evaluation of automatically extracted road axes. In: **PFG Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation**, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart, heft 2/98, p. 81-94, 1997.

HINZ, S; BAUMGARTNER, A.; STEGER, C.; MAYER, H.; ECKSTERIN, W.; EBNER, H.; RADING, B. Road Extraction in Rural and Urban Areas. In: **Proc. of Semantic Modelling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps (SMATI)**, München. Ed. Förstner, Liedtke and Bückner, 1999.

HINZ, S; BAUMGARTNER, A. Road extraction in urban areas supported by context objects. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing** 33, part. b3, p. 405– 412, 2000.

HINZ, S; BAUMGARTNER, A. Urban road net extraction integrating internal evaluation models. In: **ISPRS. Photogrammetry Compute Vision**, Graz, Austria, 163p, 9-13 set. 2002.

HINZ, S. Automatic object extraction for change detection and gis update. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPR08. Vol. XXXVII.** part B4: p.277-284, Beijing, China, 2008.

HINSKEN, L.; MILLER, S.; TEMPELMANN, U.; UEBBING, R.; WALKER, S. Triangulation of LH Systems' ADS40 imagery using orima GPS/IMU. In: **ISPRS Commision III Symposium Photogrammetric Computer Vision (PCV'02), Graz 2002; International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Graz, Austria, 9-13 sep. 2002.

HOFFMANN, A.; VAN DER VEGT, J.W.; LEHMANN F. Towards automated map updating: Is it feasible with new digital data-acquisition and processing

- techniques?. In: **Int'l Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Vol. 33, Part B2, pp. 295-302, 2000.
- HOLMES, G.; DONKIN, A.; WITTEN, I. H. Weka: a machine learning workbench. In: **IEEE Transactions on Pattern Analysis and machine Intelligence**, p. 357-361, 1994.
- HONKAVAARA, E.; MARKELIN, L. Radiometric performance of digital image data collections – a comparison of ADS40/DMC/UltraCam and EmergeDSS. In: **Photogrammetrische Woche 2007**, Institut für Photogrammetrie, Dieter Fritsch, p. 117-129, 2007.
- HOSOMURA, T. Road extraction from high resolution satellite image by using circle area. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPR08. Vol. XXXVII. part B3b: 505 ff**, Beijing, China, 2008.
- ISHIBASHI, R. **Extração de segmentos de rodovias em imagens de resolução variadas usando o princípio de bordas paralelas**. 136 f. Dissertação de Mestrado pela Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP, Presidente Prudente - SP, 2008.
- ISHIKAWA, A. S. **Detecção de rodovias em imagens digitais de alta resolução com o uso da teoria de Morfologia Matemática**. 111f. Dissertação de Mestrado pela Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP, Presidente Prudente - SP, 2008.
- JAIN, R.; KASTURI, R; SCHUNCK, B. G. **Machine Vision**. MIT Press and McGraw-Hill, New York, 1995.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres** / John R. Jensen; tradução José Carlos Neves Epiphanyo (coordenador) . São José dos Campos - SP: Parênteses, 2009.
- JINYAN LI; LIU, H.; NG, S. K.; WONG, L. Discovery of significant rules for classifying cancer diagnosis data. In: **Bioinformatics**, v.19, p.93ii–102ii, 2003.
- JONKER, P. P. Skeletons in N dimensions using shape primitives. In: **Pattern Recognition Letters**. v. 23 (6), p. 677-686, 2002.

- KRETSCHMANN, E.; FLEISCHMANN, W.; APWEILER, R. Automatic rule generation for protein annotation with the C4.5 data mining algorithm applied on SWISS-PROT. In: **Bioinformatics**, v, 17, p.920–926, 2001.
- KUMAR, K. V.; MARTHA, T. R.; ROY, P. S. Mapping damage in the Jammu and Kashmir caused by 8 October 2005 Mw 7.3 earthquake from the Cartosat-1 and Resourcesat-1 imagery. In: **International Journal of Remote Sensing**, vol. 27, issue 20, p. 4449-4459, oct. 2006.
- LEBERL, W.F.; GRUBER, M.; PONTICELLI, M.; BERNOEGGER, S.; PERKO, R. The UltraCam Large Format Aerial Digital Camera System. **Proc. ASPRS Annual Conference 2003**, 2003.
- LIN, X. G.; ZHANG, J. X.; LIU Z. J.; SHEN, J. Semi-automatic extraction of ribbon roads from high resolution remotely sensed imagery by cooperation between angular texture signature and template matching. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPR08**. vol. XXXVII, part. b3b, p.539, Beijing, China, 2008.
- LUZ, N. B; SANTOS, D. J; ANTUNES, A. F. B. Segmentação de imagens e classificação baseada em regras de conhecimento como novas abordagens para o mapeamento do uso da terra no Estado do Paraná. In: **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, Brasil, 25-30 abril, p.989-996, 2009.
- MAKTAV, D. Integration of remote sensing and SIG for archaeological investigations. In: **International Journal of Remote Sensing**, vol. 30, issue 7, p. 1663-1673, 2009.
- MAYER, H., LAPTEV, I., BAUMGARTNER, A. Multi-scale and snakes for automatic road extraction. In: **5th Europe Conference on Compute Vision**, vol. I, p. 720-733. 1998.
- MAYO, M. Automatic species identification of live moths. In: **Ellis et. al, editor, Proc. of the 26th SGAI International Conference on Innovative Techniques and Applications of Artificial Intelligence**, p. 195-202, 2006.
- MAYUNGA, S. D.; COLEMAN, D. J.; ZHANG, Y. A semi-automated approach for extracting buildings from QuickBird imagery applied to informal settlement mapping. In: **International Journal of Remote Sensing**, vol. 28, issue 10, p. 2343-2357, may. 2007.

- MCMILLAN, J. C; ARDEN, D. A; LACHAPELLE, G.; LU, G. Dynamic GPS attitude performance using INS/GPS reference. In: **ION GPS'94**, Salt Lake City, 21-23 sep. 1994.
- MENA, J. B. **State of the art on automatic toad extraction for SIG update: a novel classification**. Pattern Recognition Letters 24 (16), p. 3037-3058, 2003.
- MIRNALINEE, T. T.; SUKHENDU DAS; VARGHESE, K. Integration of Region and Edge-based information for Efficient Road Extraction from High Resolution Satellite Imagery. In: **Advances in Pattern Recognition, 2009. ICAPR '09. Seventh International Conference**, p. 373-376, feb. 2009.
- MITCHELL, T. Machine Learning. New York: McGraw-Hill. 1997.
- NEUKUM G. The Airborne HRSC-A: Performance Results and Application Potential. In: **Photogrammetric Week'99**, D. Fritsch, D. Hobbie (Eds.), Wichmann, Heidelberg, p. 83-88, 1999.
- NEVES, S. R. **Algoritmos para segmentação de imagens infravermelhas**. 131 f. Tese do Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 2003.
- NEVATIA, R.; BABU, K. R. Linear feature extraction and description. Computer Graphics and Image Processing, v. 13, p. 257-269, 1980.
- PATERAKI, M. N.; BALTSAVIAS, E. Adaptive multi-image matching algorithm for the airborne digital sensor ADS40. In: **Proceedings of the Map Asia 2002, Asian Conference on SIG, GPs, Aerial Photography and Remote Sensing**, Bangkok, Thailand, 7-9 aug. 2002.
- PATERAKI, M. N.; BALTSAVIAS, E. P. Analysis and performance of the adaptive multi-image matching algorithm for airborne digital sensor ADS40. In: **Institute of Geodesy and Photogrammetry**, EHTZ-Hoenggerberg, Zürich, Switzerland, 2003a.
- PATERAKI, M. N.; BALTSAVIAS, E. P. Analysis of a DSM generation algorithm for the ADS40 Airborne Pushbroom Sensor. In: **Proc. Conf. Optical 3-D Measurement Techniques VI**, Zurich, Switzerland, p. 83-91, 22-25 sep. 2003b.
- PAULA, M. B. **Indução automática de árvore de decisão**. 85 f. Dissertação da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis - SC, 2002.

- PETRIE, G.; WALKER, S. Airborne Digital Imaging: A new overview. In: **Photogrammetric Record**, v. 22, n. 119, p. 203-205, 2006.
- QUINLAN, J. R. **Induction of decision trees**. Machine Learning Academic Publish, Manufacture in The Netherlands, Boston:Kluwer, v.1, n.1, p.81-106, mar. 1986.
- QUINLAN, J. R. **Simplifying decision trees**. International Journal of Man-Machine Studies, 12. p. 221-234. 1987.
- QUINLAN, J. R. **C4.5: Programs for Machine Learning**. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, USA, 1993.
- QUINLAN, J. R. **Improved use of continuous attributes in C4.5**. Journal of Artificial Intelligence Research 4. p. 77-90, 1996.
- RAVANBAKHS, M.; HEIPKE, C.; PAKZAD, K. Road junction extraction from high resolution aerial images. In: **Proceeding of International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. München, Germany, p. 131-138, 2007.
- ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto**. 248p. 6 ed. EDUFU, 2007.
- RUY, R; TOMMASELLI, A. M. G. Reconstrução automática de estereomodelos a partir de parâmetros de orientação direta do sensor. In: **Boletim de Ciências Geodésicas**, sec. artigos, Curitiba, v. 10, nº1, p.65-82, jan.-jun. 2004.
- SANDBAU, R.; BRAUNECKER, B.; DRIESCHER, H.; ECKARDT, A.; HILBERT, S.; HUTTON, J.; KIRCHHOFER, W.; LITHOPOULOS, E.; REULKE, R.; WICKI, S. Design principles of the LH Systems ADS40 airborne digital sensor. In: **IAPRS – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 33, part b3, The Netherlands, Amsterdam, p. 258-265, 16-22 jul. 2000.
- SHANNON, C. E; WEAVER, W. The mathematical theory of communication. Board of Trustees of the University of Illinois, 1949.
- SANTOS, D. R.; DALMOLIN, Q.; ARAKI, H. Detecção automática de veículos com uso de imagens de Intensidade LiDAR e anaglifo. In: **RBC - Revista Brasileira de Cartografia**, nº 58/03, 2006.
- SARABANDI, P.; YAMAZAKI, F.; MATSUOKA, M.; KIREMIDJIAN, A. Shadow detection and radiometric restoration in satellite high resolution images. In: **Geosciences and Remote Sensing Symposium, 2004, IGARSS '04**,

Proceedings, 2004 IEEE International, Anchorage, Alaska, USA, vol. 6, p. 3744-3747, 20-24 sep. 2004.

SCHOLTEN, F. Digital 3D data acquisition with the High Resolution Stereo Camera – Airborne (HRSC-A). In: **IAPRS – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. The Netherlands, Amsterdam, vol. 33, part. b4, p. 901-908, 16-22 jul. 2000.

SENÇO, W. **Estrada de Rodagem: projeto**. Grêmio Politécnico – São Paulo, 1980.

SILVA, M. A. O; DAL POZ, A. P. Detecção e reconstrução automática de junções de rodovia em imagens digitais de cenas rurais. In: **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 9, n. 2, p. 263-281, 2003.

SILVA, M. P. S. **Mineração de Dados : Conceitos, Aplicações e Experimentos com Weka**. Livro da Escola Regional de Informática Rio de Janeiro - Espírito Santo. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, v. 1, p. 1-20, 2004.

STEGER, C. **An unbiased detector of curvilinear structures**, Technical Report FGBV-96-03, Forschungsgruppe Bildverstehen (FG BV), Informatik IX, Technische Universität München, 1996.

STEGER, C.; MAYER, H.; RADIG, B.: The Role of Grouping for Road Extraction. In: **Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)**, Armin Gruen, Emmanuel Baltsavias, Olof Henricsson (Editors), Birkhäuser Verlag, p. 245-256, 1997.

STEGER, C. Subpixel – Precise Extraction of Lines and Edges. IN: **ISPRS - International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam**, v. 33, part. b3, p. 141-156, 2000.

STRAT, T. M.; FISCHER, M. Context-based vision: recognizing objects using information from both 2D and 3D imagery, In: **IEEE Transactions on Pattern Analysis and machine Intelligence**, v. 13, issue 10, p. 1050-1065, oct. 1991.

SHUKLA, V.; KANTH, R. C; RAMACHANDRAN, R. Semi-Automatic Road extraction algorithm for high resolution images using path following approach, In: **III Indian Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing**, Ahmedabad - India, p. 311, 16-18, dec. 2002.

- TEOH, C.; SOWMYA, A. Junction Extraction from high resolution images by composite learning. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. XXXIII, part B3, p.882 – 888, 2000.
- TIANEN C.; RYOSUKE S.; MURAI S. **Development and Calibration of the Airborne Three-Line Scanner (TLS) Imaging System**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 69(1), 71-78, 2003.
- VALE, G. M. **Extração semi-automática do eixo de rodovia em imagens de média e alta resolução usando programação dinâmica**. 116 f. Dissertação de Mestrado pela Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP, Presidente Prudente - SP, 2003.
- VALE, G. M.; GALVANIN, E. A. S.; DAL POZ; A. P. O detector de Canny-EDP: uma combinação entre as teorias de Canny e de difusão anisotrópica não linear. **RBC - Revista Brasileira de Cartografia**, nº 56/2, 2004.
- VOSSelman, G.; KNECHT, J. Road Tracing by Profile Matching and Kalman Filtering. In: **Proceedings Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images**, Gruen, A., O. Kuebler, and P. Agouris (eds.), Birkhaeuser, Basel - Boston - Berlin, p. 265-274, 1995.
- WASER, L.T.; GINZLER, C.; KUECHLE, M.; THEE, P.; BALTSAVIAS, E.; EISENBEISS, H. Extraction of forest parameters in a mire biotope using high-resolution digital surface models and airborne imagery In: **Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007**. IEEE International, p. 1265-1270, 23-28 jul. 2007.
- WEISS, S. M; KULIKOWSKI, C. A. **Computer systems that learn: classification and prediction methods from statistics, neural nets, machine learning and expert systems (machine learning series)**. 1ª ed. 223 p. Morgan Kaufmann Publishers, 1990.
- WEKA**: Data Mining Software in Java. Disponível em: <<http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka>>. Acesso em: 19/05/2009.
- WEWEL F., SCHOLTEN F., NEUKUM G., ALBERTZ J. **Digitale Luftbildaufnahme mit der HRSC** – Ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie. Photogrammetrie – Fernerkundung Geoinformation (6), 337-348, 1998.
- WIEDEMANN, C. Improvement of Road Crossing Extraction and External Evaluation of the Extraction Results. In: **Proc. of the ISPRS Commision III Symposium on Photogrammetric Computer Vision (PCV'02)**, Graz/Austria 09.-13.09.2002.

Institute for Computer Graphics and Vision, Graz University of Technology, vol. XXXIV, part 3B, p. 297-300, 2002.

WITTEN, I. H.; FRANK, E.; TRIGG, L.; HALL, M.; HOLMES, G.; CUNNINGHAM, S. J. WEKA: Practical machine learning tools and techniques with Java implementations. In: **Proc ICONIP/ ANZIIS/ANNES99 Future Directions for Intelligent Systems and Information Sciences**. Waikato - New Zealand. p. 192-196, 1999.

WITTEN, I. H.; FRANK, E. **Data mining: practical machine learning tools and techniques**. 2 ed. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2005.

YOTSUMATA, T., OKAGAWA, M., FUKUZAWA, Y., TACHIBANA, K., SASAGAWA, T. Investigation for Mapping Accuracy of the Airborne Digital Sensor-ADS40. In: **ISPRS Commission I Mid-Term Symposium in conjunction with Pecora 15/Land Satellite Information IV Conference, Integrated Remote Sensing at the Global, Regional and Local Scale**. Denver, CO USA, 10-15 nov., 2002.

ZANIN, R. B. **Metodologia automática para extração de cruzamento de rodovias em imagens de alta resolução**. 121 f. Dissertação de Mestrado pela Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP, Presidente Prudente - SP, 2004.

ZHANG, C. Updating of cartographic road databases by images analysis. IN: **Institute of Geodesy and Photogrammetry**. Ph.D. thesis, report n. 79, ETH Zurich, Switzerland. 188 pages. 2003.

ZHOU, J.; BISCHOF, W. F.; CAELLI, T. Robust and efficient road tracking in aerial images. In: Stilla U, Rottensteiner F, Hinz S In: **CMRT05. IAPRS – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Vienna, Austria, v. 36, part 3-w24, 29-30 aug. 2005.

ZHOU, J.; BISCHOF, W. F.; CAELLI, T. Road tracking in aerial images based on human-computer interaction and Bayesian filtering. In: **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 61, issue 2, p. 108-124, nov. 2006.

ZHU, L.; SASAGAWA, T.; TACHIBANA, K.; FUKUZAWA, Y. Triplet image matching for airborne digital sensor ads40. In: **IAPRS – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Istanbul, Turkey, v. 35, part. b3, 12-23 jul. 2004.