

DARLAN MIRANDA NUNES

**EXTRAÇÃO SEMIAUTOMÁTICA DE MALHA VIÁRIA EM IMAGENS  
DIGITAIS UTILIZANDO CLASSIFICAÇÃO BASEADA EM OBJETOS E  
OPERADORES MORFOLÓGICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de Magister Scientiae.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2016

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

Nunes, Darlan Miranda, 1990-  
N972e           Extração semiautomática de malha viária em imagens  
2016           digitais utilizando classificação baseada em objetos e operadores  
                  morfológicos / Darlan Miranda Nunes. – Viçosa, MG, 2016.  
                  xii,76f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Nilcilene das Graças Medeiros.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f.70-76.

1. Rodovias. 2. Estradas vicinais. 3. Processamento de  
imagens digitais. 4. Imagens de sensoriamento remoto.  
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia  
Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.  
II. Título.

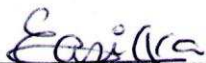
CDD 22 ed. 625.7

DARLAN MIRANDA NUNES

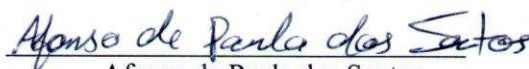
**EXTRAÇÃO SEMIAUTOMÁTICA DE MALHA VIÁRIA EM IMAGENS  
DIGITAIS UTILIZANDO CLASSIFICAÇÃO BASEADA EM OBJETOS E  
OPERADORES MORFOLÓGICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

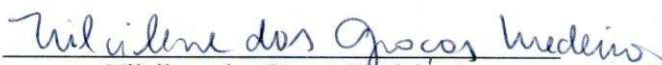
APROVADA: 27 de outubro de 2016.



Erivaldo Antônio da Silva



Afonso de Paula dos Santos  
(Coorientador)



Nilcilene das Graças Medeiros  
(Orientadora)

Aos meus pais Geraldo e Maria da Glória,  
aos meus irmãos Denilson e Darciel e  
à Daniely,  
dedico este trabalho.

"Quando surgirem os obstáculos, mude a sua direção para alcançar a sua meta, mas não a decisão de chegar lá."

(Anônimo)

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo.

A todos os familiares e principalmente aos meus pais Geraldo e Maria da Glória e aos meus irmãos Denilson e Darciel, por todas as formas de apoio, incentivo, conselhos, confiança e carinho constante em toda minha vida.

À Daniely pelo amor, companheirismo, carinho, compreensão e ajuda durante todo este tempo.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade, por todos os conhecimentos adquiridos e pela infraestrutura disponibilizada ao longo de minha jornada acadêmica de graduação e mestrado.

À professora Nilcilene Medeiros pela amizade, paciência, compreensão, os enriquecedores ensinamentos, discussões, dedicação, incentivo e orientação a este trabalho.

Ao professor Afonso Santos, pela enobrecedora amizade, discussões sobre o trabalho, além de toda ajuda e ensinamentos desde a graduação.

Ao professor Erivaldo Silva pelas sugestões e contribuições a este trabalho.

A todos os professores do Setor de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica pela ótima convivência e pelos grandiosos ensinamentos ao longo de toda minha graduação e pós-graduação.

À Cilene Knauf pela amizade, carinho, incentivo e todo auxílio desde os tempos de graduação.

Aos professores Ten. Cel. Carlos Volotão, da sessão de ensino em Engenharia Cartográfica do Instituto Militar de Engenharia (IME), Manoel Fernandes e Rafael Barros, do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), pela oportunidade e importantes ensinamentos durante as disciplinas cursadas como aluno externo.

A todos os amigos verdadeiros, em especial Francisco Neto, Alessandra Braga, Evaldo Pires, Victor Hugo, Marília Sanglard e Lecio Alves pela enobrecedora e eterna amizade, as horas de estudos, enriquecedoras discussões, os cafezinhos, e os momentos de lazer.

Aos companheiros de trabalho da CCAR/IBGE e em especial aos colegas da Gerência de Imageamento (GIMAG), pela amizade, incentivo, compreensão e importantes contribuições.

À Alexandre Teixeira pelo fornecimento de dados de campo e pelas pertinentes discussões.

À Guilherme Cardim e ao professor Erivaldo Silva pela disponibilidade do software CARTOMORPH.

À Luciana Temponi (CREN/IBGE) pela oportunidade de uso conjunto do software ENVI.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para este trabalho e por descuido não tenha mencionado, muito obrigado!

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>x</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Considerações Iniciais .....	1
1.2 Objetivos .....	4
1.3 Justificativas .....	4
1.4 Estrutura do trabalho .....	6
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>7</b>
2.1 Análise de Imagens Baseada em Objetos (OBIA) .....	7
2.1.1 Classificação baseada em objetos no módulo Feature Extraction (ENVI) .....	8
2.2 Morfologia Matemática .....	11
2.2.1 Elemento estruturante .....	12
2.2.2 Operadores Morfológicos Elementares .....	13
2.2.3 Abertura e Fechamento Morfológico .....	16
2.2.4 Transformações Top-hats .....	18
2.2.5 Reconstrução morfológica .....	19
2.2.6 Afinamento morfológico .....	21
2.3 Malha Viária como feição cartográfica de interesse .....	22
2.3.1 Conceitos e classificações .....	23
2.3.2 Características da malha viária em imagens digitais .....	25
2.4 Métricas para avaliação da qualidade .....	26

2.4.1 Controle de qualidade posicional utilizando feições lineares.....	26
2.4.2 Análise da qualidade do método de extração por correspondência linear.	30
2.5 Imagens Rapideye .....	34
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>37</b>
3.1 Área de estudo .....	37
3.2 Materiais utilizados .....	38
3.3 Metodologia .....	38
3.3.1 Etapa de avaliação da acurácia posicional das imagens .....	40
3.3.2 Métodos para extração semiautomática da malha viária em Imagens RapidEye.....	43
3.3.3 Análise da qualidade do processo de extração da malha viária.....	51
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>53</b>
4.1 Resultados da avaliação da acurácia posicional planimétrica das imagens ...	53
4.2 Resultados obtidos através do processo de extração da malha viária .....	55
4.2.1 Avaliação da qualidade por correspondência linear .....	64
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>68</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>70</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de elementos estruturantes.....	13
Figura 2 - Erosão de uma imagem binária a partir do elemento cruz. ....	14
Figura 3 - Dilatação de uma imagem binária a partir do elemento cruz. ....	14
Figura 4 - Exemplo da reconstrução morfológica por dilatação: (a) imagem marcadora, (b) imagem máscara e (c) reconstrução morfológica por dilatação (somente os elementos que possuem "sementes" na imagem marcadora são recuperados). ....	20
Figura 5 - Exemplo de imagem resultante da operação de afinamento morfológico sobre imagem binária. ....	22
Figura 6 - Exemplos de vias em um trecho de imagem RapidEye de área não urbana.....	25
Figura 7 - Ilustração do método Buffer Duplo. ....	29
Figura 8 - Comparação entre as feições da (a) imagem extraída e (b) imagem de referência.....	32
Figura 9 - Localização das áreas de estudo.....	37
Figura 10 - Fluxograma síntese das principais atividades realizadas no trabalho. ....	39
Figura 11 - Feições lineares utilizadas no processo de avaliação da acurácia posicional planimétrica das imagens RapidEye das áreas teste 1 (a), 2 (b) e 3(c).....	41
Figura 12 - Fluxograma das etapas envolvidas no processo de extração da malha viária das imagens RapidEye. ....	43
Figura 13 - Módulo do ENVI FX, ilustrando a regra de classificação da malha viária por objetos aplicada na área teste 1 e demonstrando a definição de limiar através do histograma de frequência e pesos.....	47
Figura 14 - Vias utilizadas na geração das imagens referência para análise da qualidade do processo de extração de feições das áreas teste 1 (a), 2 (b) e 3(c).....	52

Figura 15 - Gráficos das discrepâncias e estatísticas encontradas utilizando o método de feições lineares Buffer Duplo para avaliação das imagens das áreas teste 1 (a), 2 (b) e 3(c).....	54
Figura 16 - Imagem parcial da área 3 com presença de aglomerado rural e respectiva segmentação (em vermelho), exemplificando as dificuldades em delinear os objetos nesse meio em imagens de média resolução. ....	62
Figura 17 - Imagens de entrada para análise da correspondência linear no software CARTOMORPH. À direita as imagens com as feições lineares extraídas e à esquerda as imagens correspondentes de referência para cada área teste. ....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Tolerâncias utilizadas para avaliação da acurácia posicional planimétrica no padrão do Decreto-lei nº 89.817.....	28
Tabela 2 - Características gerais do sistema RapidEye.....	35
Tabela 3 - Resumo dos principais níveis de processamento das imagens dos satélites do sistema RapidEye. ....	35
Tabela 4- Resumo dos trechos lineares utilizados na avaliação da acurácia posicional por área de estudo.....	42
Tabela 5- Valores para PEC e EP na escala de 1:25.000. ....	42
Tabela 6 - Critérios, atributos, respectivos limiares e pesos utilizados na regra de classificação para cada área de estudo. ....	47
Tabela 7 - Passos mais relevantes e respectivos resultados do processo de extração da malha viária para a área teste 1. ....	56
Tabela 8 - Passos mais relevantes e respectivos resultados do processo de extração da malha viária para área teste 2. ....	58
Tabela 9 - Passos mais relevantes e respectivos resultados do processo de extração da malha viária para área teste 3. ....	60
Tabela 10 - Exemplos de obstruções totais ou parciais nas cenas em estudo que limitaram o processo de extração das feições de interesse (em verde as vias extraídas). ....	63
Tabela 11 - Métricas resultantes da análise comparativa entre a malha viária extraída e de referência por meio do software CARTOMORPH para cada área teste. ....	66

## RESUMO

NUNES, Darlan Miranda, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2016. **Extração semiautomática de malha viária em imagens digitais utilizando classificação baseada em objetos e operadores morfológicos.** Orientadora: Nilcilene das Graças Medeiros. Coorientador: Afonso de Paula dos Santos.

As demandas por dados geoespaciais referentes à malha viária são constantes, visto a gama de aplicações que necessitam desse tipo de informação, tanto no meio urbano quanto rural. Tais dados em um ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são fontes essenciais para integração de uma base de dados espaciais, os quais podem ser utilizados para fins diversos. Vale salientar a importância de dados da malha viária nos ciclos de atualização de bases cartográficas, que podem ser obtidos utilizando, por exemplo, técnicas de extração de feições em imagens digitais, de forma mais precisa, rápida e menos onerosa, comparados aos métodos tradicionais. Nesse sentido, a partir de imagens obtidas por sensores remotos, aliadas as técnicas de análise e Processamento Digital de Imagens (PDI), é possível realizar aplicações (semi-) automáticas que buscam extrair as feições de interesse, entre estas as estradas e/ou rodovias. Dessa forma, este trabalho teve como foco a extração da malha viária em imagens RapidEye através do desenvolvimento de uma metodologia semiautomática utilizando técnicas de classificação de imagens baseada em objetos, bem como o uso de operadores morfológicos. A metodologia foi testada em três áreas distintas e com imagens adquiridas em épocas diferentes, assim possibilitando verificar o desempenho do método proposto para diversas situações. Por meio da análise por correspondência linear, que forneceu valores estatísticos para métricas de análise da qualidade do processo de extração da malha viária, foi possível alcançar em termos de corretude e completude os valores de 92,23% e 85,15% para a área teste 1, os valores de 79,16% e 81,06% na área teste 2, e os valores de 82,05% e 92,22% para a área teste 3, respectivamente. Diante dos resultados obtidos, foi possível verificar que a metodologia proposta apresentou bom desempenho para a extração semiautomática de vias em imagens de sensoriamento remoto, mais especificamente de imagens Rapideye, sendo uma alternativa viável para auxiliar na aquisição e atualização de base de dados da malha viária. Dentre as principais dificuldades encontradas no processo de extração, destaca-se a definição de parâmetros ótimos a fim de separar as feições de interesse das com respostas espectrais similares que não são feições interesse (ruídos).

## ABSTRACT

NUNES, Darlan Miranda, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2016. **Semi-automatic road network extraction from digital images using object-based classification and morphological operators.** Adviser: Nilcilene das Graças Medeiros. Co-adviser: Afonso de Paula dos Santos.

The demand for geospatial data concerning road network are constant due to the variety of application that need of this type of data, in both urban and rural areas. Such data in a Geographic Information System (GIS) are essential source for integration of a spatial database, which can be used for many purposes. It's worth noting the importance of road network data in cartography update cycles, because these data can be obtained using, for example, an automated process of feature extraction in digital images, more accurately, faster and less costly than traditional methods. In this way, from images obtained by remote sensors, associated with techniques of analysis and Digital Image Processing (DPI), is possible perform (semi-) automatic applications to extract the features of interest, such as roads. Therefore, this work aimed to the extraction of road network from RapidEye images, by a methodology developed using techniques of object-based image classification and morphological operators. The methodology was tested in three different sites and with images acquired in distinct dates, turning possible evaluate the performance of the proposed method in various situations. Through a procedure of linear matching, that return statistics values of metrics to evaluate the quality of road network extraction process, were achieved in terms of correctness and completeness the values of 92.23% and 85.15% for test site 1, the values of 79.16% and 81.06% for test site 2, and the values of 82.05% and 92.22% for test site 3, respectively. The results obtained shows that the proposed methodology presented a good performance for semi-automatic road network extraction from remote sensing images, more specifically from Rapideye images, representing an auxiliary alternative for road network database acquisition and updating. Among the main difficulties on the road network extraction process, stands out the search for optimum parameters in order to separated features targets of interest from others with similar spectral properties that are not feature targets of interest (noises).

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

As imagens digitais adquiridas por sensores remotos, a bordo de plataformas aéreas ou de satélites, são as principais fontes para detecção e/ou extração de feições<sup>1</sup> cartográficas, tais como edificações, estradas ou rodovias, vegetação etc, que propiciam a obtenção de dados para mapeamentos, atualização de bases cartográficas e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (GALLIS, 2006).

As bases cartográficas são instrumentos fundamentais para o desenvolvimento e planejamento em todas as instâncias de gestão, uma vez que possuem denso conteúdo de informações para diversas atividades, constituindo alicerces para tomadas de decisões eficazes.

No entanto, é sabido que a Cartografia nacional carece de produtos cartográficos em escalas adequadas para o desenvolvimento e planejamento de uma série de atividades, além dos existentes estarem desatualizados já a mais de três décadas (de acordo com a escala e região). Assim, se faz necessário a buscar por alternativas que permitam a obtenção de bases cartográficas com informações atualizadas, confiáveis e economicamente viáveis, que minimizem os esforços realizados por meio de procedimentos convencionais, que são dispendiosos e demorados, mesmo que em ambiente digital.

Nesse contexto, o uso das imagens de satélite é de grande interesse, pois além de possibilitar a obtenção de feições cartográficas atualizadas, tais imagens são fontes de dados relativamente mais acessíveis economicamente, com um grande banco de dados temporal, além da disponibilidade espectral desses dados, possuindo geralmente, grandes recobrimentos de extensões territoriais.

A necessidade de dados cartográficos detalhados, atualizados e acurados de sistemas viários são constantemente demandados, vistas a gama de aplicações deste recurso nas mais diversas áreas de atuação, sendo estas de fundamental importância

---

<sup>1</sup> Feições correspondem a uma representação abstrata dos fenômenos do mundo real, sendo um objeto considerado uma feição geográfica se estiver associado a uma localização relativa à superfície da Terra. Uma feição pode ser representada por um elemento gráfico do tipo ponto, linha ou polígono.

para o gerenciamento, planejamento e tomada de decisões (HINZ e BAUMGARTNER, 2000; GALLIS, 2006). Exemplos de aplicação deste recurso são em bases cartográficas de referência, mapeamentos rodoviários, planejamento urbano, gerenciamento de tráfego e frotas, serviços baseados em localização, sistemas de navegação veicular, monitoramento ambiental, aplicações web, turismo etc (MAYER et al., 2006).

Os avanços tecnológicos dos sensores remotos a bordo de satélites, possibilitaram a aquisição de imagens da superfície terrestre com aumento significativo das resoluções espacial, espectral e radiométrica, gerando novas possibilidades para o processo de extração de feições lineares, tais como a malha viária, mais especificamente estradas ou rodovias (BACHER e MAYER, 2005).

As pesquisas sobre identificação e extração de estradas ou rodovias em fotografias aéreas e imagens de satélite, conduzidas pela comunidade científica das áreas de Fotogrametria Digital e Visão Computacional, remonta à década de 70 com os trabalhos pioneiros de Bajcsy e Tavakoli (1976) e Quam (1978).

Ishikawa et al. (2010) comenta que desde então, diferentes abordagens, quase sempre buscando a automação dos processos de obtenção das feições cartográficas, têm surgido. Embora sejam reconhecidas as dificuldades de automação nesta área de conhecimento, principalmente pela complexidade das cenas envolvidas, em função da diversidade de alvos com diferentes formas, tonalidades e texturas.

Os métodos de extração de feições são caracterizados, quanto ao nível de automação, segundo duas tarefas básicas inerentes ao processo de extração: o reconhecimento e o delineamento. A tarefa de reconhecimento depende de conhecimentos semânticos para atribuir o significado a cada objeto presente na imagem. Após o reconhecimento, cada objeto pode ser delineado geometricamente através de informações geométricas e radiométricas. Assim, os métodos automáticos desempenham ambas as tarefas de reconhecimento e delineamento, enquanto que os métodos semiautomáticos apenas a tarefa de delineamento é realizada, já que o reconhecimento fica a cargo da habilidade interpretativa do operador (DAL POZ et al., 2007).

Dal Poz e Agouris (2000) citam, que na extração de feições cartográficas, nenhuma abordagem puramente automática se mostrou competitiva perante a habilidade do operador humano. Sendo então, as soluções semiautomáticas as que têm sido mais pesquisadas.

O uso das imagens de sensoriamento remoto, aliado às técnicas de análise e processamento digital de imagens, tem propiciado a obtenção de resultados mais significativos nos procedimentos de extração de feições, tanto em termos geométricos quanto semânticos (GATO et al., 2001; SILVA et al., 2010).

Com a melhoria na resolução das imagens digitais, a técnica de classificação de imagens baseada em objetos passou a ganhar destaque entre a comunidade de sensoriamento remoto. Este tipo de abordagem tem sido extensivamente aplicada em mapeamentos de uso e cobertura do solo, principalmente com uso de imagens de alta resolução espacial (HOFMANN, 2001; CENTENO et al., 2003; PINHO, 2005; TAUBENBÖCK et al., 2010; etc). No entanto, ainda é pouco explorado na extração de feições lineares para área de cartografia.

Destaca-se dentre as técnicas de PDI, os operadores morfológicos, advindos da teoria da Morfologia Matemática. Por fornecerem condições de analisar a estrutura geométrica dos alvos contidos nas imagens, a partir do conhecimento a priori da forma dos objetos, é uma ferramenta muito utilizada na extração de feições cartográficas em imagens digitais (MEDEIROS, 2003; SILVA e LEONARDI, 2009; SILVA et al., 2010; ISHIKAWA et al., 2010; BRAZ e MIURA, 2014; LIU et al., 2015; etc).

Conforme Wang et al. (2016), a extração de estradas e/ou rodovias em imagens de sensoriamento remoto através de métodos que utilizam da morfologia matemática tem sido amplamente utilizada por apresentar certas vantagens. No entanto, em termos práticos, os resultados dependem muito da escolha adequada do elemento estruturante (tamanho e forma), o que torna difícil obter uma alta acurácia e bons resultados no processo de extração utilizando somente os métodos que fazem uso da morfologia matemática.

Estes autores, ainda sugerem que para a obtenção de resultados mais significativos, os procedimentos de extração de estradas/rodovias em imagens digitais devem ser pesquisados combinando diferentes métodos em situações diversas.

É nesse sentido, que a presente dissertação apresenta uma metodologia semiautomática pioneira para extração da malha viária em imagens digitais, mais especificamente imagens RapidEye, utilizando as técnicas de classificação de imagem baseada em objetos em conjunto com operadores da morfologia matemática.

Também é necessário ressaltar que tão relevante quanto o método de extração da malha viária, é o controle de qualidade posicional das imagens utilizadas, bem como a análise de qualidade dos resultados obtidos por meio do processo de extração. Segundo Goodchild (2010), o controle de qualidade posicional em dados espaciais é de fundamental importância, pois permite garantir e especificar a qualidade dos mesmos, além de evidenciar discrepâncias, omissões, incertezas e definir a finalidade do dado espacial.

Concernente a análise de qualidade de processos semi ou automáticos de extração de feições, Maia e Dal Poz (2004) afirmam que são essenciais, visto que possibilita a verificação do potencial das novas metodologias de extração frente aos métodos tradicionais, os quais são baseados somente no operador humano.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral desta dissertação é a proposição de uma metodologia para identificação e detecção semiautomática da malha viária em imagens RapidEye, bem como avaliação da qualidade do produto gerado.

Considerando o foco principal, têm-se como objetivos específicos:

- i. Desenvolver uma metodologia semiautomática para extração de malha viária por abordagem conjunta de Classificação de Imagens Baseada em Objetos e Operadores de Morfologia Matemática;
- ii. Aplicar a metodologia proposta sobre imagens digitais de média resolução espacial, mais especificamente sobre imagens RapidEye nível 3A; e
- iii. Avaliar o método de extração através de métricas (corretude, completude, qualidade e redundância) que utilizam de correspondência entre feições lineares.

## **1.3 Justificativas**

Diante das constantes e rápidas alterações do meio físico, seja devido às ações antrópicas ou pelos próprios processos naturais, faz-se necessário buscar alternativas que permitam a obtenção de bases de dados com informações atualizadas, confiáveis, economicamente viáveis e mais ágeis, que minimizem os

esforços realizados através dos procedimentos convencionais que são dispendiosos e morosos.

Ainda, tendo em vista o cenário que paira sobre a cartografia brasileira, com produtos cartográficos desatualizados já a mais de três décadas (de acordo com a escala e região), é imprescindível enveredar esforços em busca de processos que venham a auxiliar a atualização desses produtos.

A extração de feições da superfície terrestre, a partir de imagens de sensoriamento remoto, com suporte das técnicas de análise e processamento de imagens, apresenta-se como uma das alternativas promissoras e de fundamental importância para elaboração e atualização do mapeamento cartográfico de um território, bem como fonte de dados para Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

Segundo Correia et al. (2005), o uso de imagens de satélite tem contribuído significativamente em várias áreas do conhecimento, por apresentarem, entre outras, as seguintes vantagens:

- i. aumento significativo de resoluções das imagens com os avanços tecnológicos;
- ii. alta capacidade de revisita e obtenção de imagens de uma mesma região;
- iii. aquisição de dados atualizados do terreno; e
- iv. visão sinóptica da área de estudo; etc.

Dentre as feições da superfície terrestre, as estradas e/ou rodovias são um dos principais elementos que integram uma base de dados. Conforme Bentabet et al. (2003), a malha viária representa uma classe de feições cartográficas de interesse primordial para minimizar ciclos de atualização cartográfica.

A extração de elementos do sistema viário pelos procedimentos convencionais, a partir de interpretação visual e posterior delimitação manual de vias sobre as imagens, é uma tarefa que consome muito tempo. Sendo a busca pela automatização desse procedimento altamente desejável, tendo em vista o grande potencial quanto à otimização de tempo e utilidade do mapeamento desse tipo de feição (JIN et al., 2009).

Do exposto, a presente dissertação visa apresentar uma abordagem alternativa e semiautomática pioneira para o processo de extração de estradas / rodovias em imagens RapidEye, utilizando classificação baseada em objetos aliada a

operadores morfológicos. Dessa forma, visando contribuir para a obtenção de base de dados dos sistemas viários de forma rápida, economicamente viável e eficaz.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

Esta pesquisa está dividida em cinco capítulos, conforme abaixo:

Capítulo 1: Introdução - apresenta as considerações iniciais sobre a extração de feições em imagens de sensoriamento remoto, os objetivos gerais e específicos, justificativas e relevância do presente trabalho.

Capítulo 2: Fundamentos teóricos - aborda os fundamentos teóricos que embasam o desenvolvimento deste trabalho. Na seção 2.1 é apresentada, brevemente, a Análise de Imagens Baseadas em Objetos e sua relevância em sensoriamento remoto, bem como um processo de classificação baseado em objetos. Em 2.2 é apresentada a teoria de Morfologia Matemática com seus principais conceitos e operadores. Na seção 2.3 são realizadas as considerações sobre as feições de interesse para o trabalho. Em 2.4 são apresentadas as métricas que permitem inferir sobre a qualidade de imagens e do processo de extração com uso de feições lineares. A seção 2.5 se ocupa em descrever sobre as imagens RapidEye.

Capítulo 3: Materiais e Métodos - neste capítulo são apresentadas as áreas de estudo, os materiais utilizados e detalhado a metodologia desenvolvida para a extração semiautomática da malha viária das imagens.

Capítulo 4: Resultados e Discussões - são apresentados os experimentos, os respectivos resultados da extração de feições, as avaliações realizadas e as discussões pertinentes.

Capítulo 5: Considerações Finais e Recomendações - contém as considerações finais acerca do trabalho desenvolvido e as recomendações para trabalhos futuros.

## **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### **2.1 Análise de Imagens Baseada em Objetos (OBIA)**

A partir dos avanços na área de sensoriamento remoto e o aumento considerável na resolução das imagens, novas abordagens passaram a ser adotadas na análise e processamento de imagens. Os procedimentos tradicionais de classificação com base na informação espectral de pixels individuais tornaram-se pouco eficientes para identificação automática dos alvos na nova geração de imagens (BLASCHKE e STROBL, 2001; BLASCHKE et al., 2008).

Neste contexto, foi cunhado o termo OBIA, acrônimo do inglês Object-Based Image Analysis, para definição do conceito das análises de imagens de sensoriamento remoto baseadas em objeto (BLASCHKE, 2010). Mais recentemente, tem emergido a modificação do termo original para GEOBIA (Geographic Object-Based Image Analysis) apresentado em Hay e Castilla (2008) e Blaschke et al. (2014).

Ao invés do que ocorre na classificação tradicional pela investigação de pixels individuais, na abordagem baseada em objetos, os pixels são agrupados em segmentos ou regiões homogêneas contíguas na imagem (com base em algum critério de homogeneidade). Os segmentos são tratados como objetos primitivos aos quais o processo de classificação atribui classes (WALTER, 2004). Dessa forma, além das informações espectrais (média, desvio padrão, variância etc), o processo de classificação leva em conta atributos que estão associados aos objetos, como: forma, textura, contexto, relações de vizinhança etc.

Nóbrega (2007), afirma que embora a classificação de imagens baseada em objetos esteja em constate desenvolvimento, tem como base um fluxo determinado de procedimentos, que inicia pela técnica de segmentação, por meio da qual são gerados os objetos. Definidos os objetos, informações espectrais e geométricas são, indiretamente, extraídas dos mesmos. A esse conjunto de informações são consideradas, também, informações contextuais, que auxiliam os relacionamentos entre os objetos.

Ainda segundo o mesmo autor, os objetos podem ser discriminados através de diferentes médias espectrais, dimensões, formas etc. Como exemplo, é citado o

caso das vias com pavimentação em concreto que podem ser separadas de uma edificação com cobertura de concreto através de atributos como área e forma, mesmo ambas feições apresentando respostas espectrais semelhantes.

Blaschke et al. (2007), argumentam que há uma tendência de que a abordagem por classificação baseada em objetos preencha o vazio entre a extração de informações em imagens digitais de alta resolução e a integração dessas informações em um SIG.

A inclusão de regras, cada vez mais complexas, recorrendo a fontes de dados diversas, parâmetros espectrais combinados a parâmetros espaciais, informações topológicas e contextuais, faz com que a classificação por objetos dependa da supervisão e das tomadas de decisão do operador (NÓBREGA, 2007).

Visando superar as limitações impostas pelos programas que utilizam classificadores tradicionais, baseados apenas em métodos estatísticos, surgiram plataformas para interpretação de imagens que propiciam a detecção de alvos com maior nível de complexidade (COSTA et al., 2008). Como exemplo, destacam-se os softwares ERDAS através da ferramenta IMAGE Objective, módulo Feature Extraction do ENVI, Definens eCognition e o sistema InterIMAGE.

Nesta dissertação será feito uso do módulo Feature Extraction do software ENVI, devido à possibilidade de uso, praticidade e ambiente amigável dessa plataforma.

### **2.1.1 Classificação baseada em objetos no módulo Feature Extraction (ENVI)**

O módulo Feature Extraction do software ENVI (ENVI FX), implementa um processo de classificação baseada em objetos, que utiliza uma rede semântica, na qual são definidos limiares para os atributos espaciais (forma), espectrais e texturais das regiões (objetos) na imagem (COSTA et al., 2008).

As classes de objetos são organizadas através da rede semântica, sendo os objetos, provenientes do processo de segmentação, associados às classes segundo regras condicionantes, no caso da classificação ser baseada em regras (Rule-Based).

A extração de feições por meio do ENVI FX, resumidamente, combina os processos de segmentação da imagem em regiões, cálculo de atributos de cada objeto

e classificação dos objetos segundo regras condicionantes ou com base em exemplos (processo supervisionado) (ENVI FX; 2016).

Como neste trabalho será utilizada a classificação baseada em regras para extração das feições de interesse, na sequência são apresentadas às características inerentes a este procedimento.

O processo de segmentação no ENVI FX basicamente envolve as seguintes etapas: cálculo de uma imagem gradiente ou imagem intensidade a partir da imagem original; cálculo da função de distribuição acumulada normalizada para a imagem determinada anteriormente; modificação dessa imagem por meio do valor estabelecido para o parâmetro denominado nível de escala (Scale Level) e segmentação da imagem modificada tendo como base a operação watershed (ENVI FX, 2016).

Os watersheds podem ser compreendidos fazendo analogia dos valores de níveis de cinza de uma imagem representada como os pontos de elevação de uma superfície topográfica. Os níveis de cinza, neste caso, indicam a altitude do ponto no relevo. Então, pensando em um processo no qual a partir dos pontos mínimos de cada uma das bacias que constituem a superfície topográfica, ocorre a imersão de água até que o nível atinja o ponto mais alto e o processo se encerra, durante o preenchimento, dois ou mais fluxos vindos de mínimos diferentes podem se unir. Para evitar que a junção de "águas" ocorra, são construídos diques na superfície, os quais são denominados linhas watersheds (SOILLE, 2003).

Pelo fato da operação watershed agrupar pixels com base em um único valor, as imagens multiespectrais necessitam ser convertidas para uma imagem de banda única para o processamento. Para isso se dispõem de dois métodos: Edge (Bordas) e Intensity (Intensidade). Como foi utilizado somente o método Edge nesta pesquisa, este será descrito na sequência.

Pelo método Edge cria-se uma imagem gradiente usando o operador de detecção de bordas Sobel, onde o pixel de valor mais elevado representa áreas de maior contraste. Sobre a imagem gradiente (após modificá-la pelo parâmetro nível de escala, descrito na sequência) é aplicado o algoritmo watershed ao invés de aplicá-lo diretamente sobre a imagem original, a fim de minimizar a segmentação excessiva. O algoritmo inicia a partir do pixel com menor valor de gradiente, ou seja, das partes mais uniformes, até o maior valor de gradiente (as bordas) (ENVI FX, 2016).

Para melhorar o delineamento das bordas dos objetos de interesse é possível ajustar a escala de segmentação através do parâmetro nível de escala (Scale Level). Este parâmetro é obtido a partir de uma função de distribuição acumulada normalizada (normalized cumulative distribution function - CDF) dos valores da imagem gradiente, assim determinando o percentual de valores do gradiente com magnitudes mais baixas que serão descartadas, mantendo aqueles objetos com bordas mais distintas.

Como podem ser gerados vários segmentos após aplicar o algoritmo watershed, estes podem ser agrupados por critérios de similaridade e adjacência, se ajustando melhor a feição de interesse.

Para isso, tem-se implementado, no ENVI FX, o algoritmo denominado Full Lambda Schedule que consiste em agrupar, num processo iterativo, segmentos adjacentes baseados em uma combinação de informações espectrais e espaciais, até um valor definido de limiar (ENVI FX, 2016).

Após segmentar a imagem, são calculados os atributos espaciais (forma), espectrais e texturais para cada objeto gerado. Com base nesses atributos são criadas as regras de classificação dos objetos.

Nessa etapa, para cada classe são associadas uma ou mais regras, as quais podem conter a combinação de vários atributos, que melhor descrevem os objetos que se enquadram naquela classe de feições.

Em termos práticos, uma estratégia típica utilizada na construção das regras é iniciar o condicionamento de um atributo por vez, buscando ajustar o comportamento da regra sobre o alvo de interesse, a partir do valor de limiar selecionado no histograma para o atributo. Posteriormente, são adicionadas novas condições e atributos para filtrar as feições indesejadas de modo a manter somente a feições de interesse.

Ainda na elaboração das regras de classificação, o módulo ENVI FX possibilita inserir algumas funções de pertinência (membership function) da lógica fuzzy. Assim, os objetos podem ser classificados através de regras mais flexíveis, que associam um grau de incerteza quanto ao objeto pertencer à determinada classe de feição, e não considerando apenas regras estritamente binárias, do tipo exatamente verdade (“sim”) ou exatamente falso (“não”) (ENVI, 2016).

A introdução da lógica fuzzy na classificação por objetos é muito importante, pois conforme ressaltado por Sarath e Nagalakshmi (2014), as

informações extraídas das imagens de sensoriamento remoto são limitadas por medidas ruidosas do sensor com limitações de resoluções espectral e espacial, degradação do sinal após pré-processamento das imagens e transição imprecisa entre classes de uso do solo, o que pode levar pixels mistos a pertencerem a uma ou mais classes. Dessa forma, a lógica fuzzy ajuda a aliviar tais problemas, ao possibilitar simular o grau de incerteza inerente aos objetos ou a informação parcial de conhecimento humano.

Basicamente, no ENVI FX a saída de cada regra, após associar uma função de pertinência (que pode ser Linear ou "Quadrática" / Tipo-S, descritas com detalhes em Jin e Paswaters (2007)), é um mapa de confiabilidade, onde os valores representam o grau com que um objeto pertence à classe de feição definida pela regra. O grau de incerteza para a função é ajustado através do parâmetro denominado Tolerance<sup>2</sup>. Para cada regra fuzzy é assumido um valor de confiança padrão (peso / valor = 1,0), mas o operador pode atribuir um peso maior ou menor (valor entre 0 e 1,0) se julgar que uma regra discrimina melhor o objeto para determinada classe de feição do que a(s) outra(s) regra(s). Posteriormente, na classificação o objeto é associado à classe que apresentar o maior valor de confiança.

## 2.2 Morfologia Matemática

Uma importante técnica de suporte ao processamento de imagens, que vem se destacando é a Morfologia Matemática (MM). Gomes e Velho (1994) afirmam que a Morfologia Matemática compreende a área de estudo das propriedades topológicas e estruturais dos objetos a partir de suas imagens.

A Morfologia Matemática pode ser aplicada em várias áreas de processamento e análise de imagens, com objetivos distintos, tais como realce, detecção de bordas, esqueletização, afinamento, segmentação etc. É uma ferramenta muito utilizada na extração de feições, pois fornece condições de analisar a estrutura

---

<sup>2</sup> O parâmetro Tolerance (tolerância) ou Fuzzy Tolerance (Tolerância fuzzy), é utilizado para ajustar o grau com que a função de pertinência modela as incertezas inerentes à classificação e tem como valor padrão 5,0 %. Essa tolerância é aplicada sobre os atributos de uma regra, e se um valor maior for utilizado implica em permitir agrupar mais objetos vizinhos ao atributo.

geométrica dos elementos contidos na imagem, a partir do conhecimento a priori da forma dos objetos de interesse.

Para extração de feições lineares tem-se inúmeros trabalhos que empregam morfologia matemática, citam-se como exemplos Zhang et al. (1999), Amini et al. (2002), Medeiros (2003), Mohammadzadeh et al. (2006), Frigato e Silva (2008), Ishikawa et al. (2010) etc.

O princípio básico da Morfologia Matemática consiste em extrair as informações relativas à geometria e à topologia de um conjunto desconhecido (uma imagem), pela transformação através de outro conjunto bem definido e conhecido (forma e tamanho), denominado elemento estruturante (SERRA, 1982; FACON, 1996; SOILLE, 2003).

### **2.2.1 Elemento estruturante**

Um elemento estruturante é um conjunto completamente definido e conhecido em forma e tamanho, o qual é comparado, a partir de uma transformação, ao conjunto desconhecido da imagem (FACON, 1996).

O resultado dessa transformação permite avaliar o conjunto desconhecido, efetuando o deslocamento do elemento estruturante na imagem pixel a pixel, de forma a percorrer toda a cena. Conforme ressalta Medeiros (2003), embora seja similar a um processo de convolução, que efetua o produto do somatório dos pesos da máscara com a imagem original, nesse caso o procedimento não ocorre da mesma forma. No processo de deslocamento do elemento estruturante pela imagem, este realiza, em relação aos níveis de cinza, algumas transformações com os valores mínimos e máximos considerados na vizinhança do pixel analisado, sendo o resultado dessa transformação atribuído ao pixel correspondente da nova imagem.

Segundo Soille (2003), alterando-se o formato ou o tamanho do elemento estruturante é possível obter respostas sobre a estrutura geométrica do objeto contido na imagem. O tipo e a natureza da informação extraída dependem da escolha do elemento estruturante e da imagem estudada. O autor ainda ressalta que a escolha do elemento estruturante é a maior dificuldade para se conseguir o resultado procurado.

Alguns exemplos de elementos estruturantes são apresentados na Figura 1.

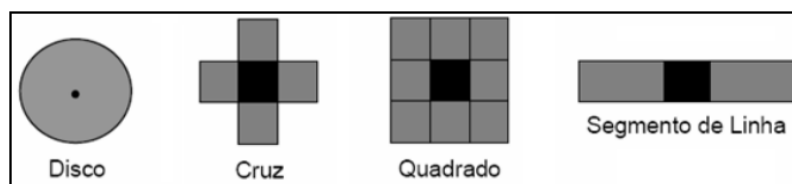


Figura 1 - Exemplos de elementos estruturantes.

Fonte: Silva et al. (2010)

De acordo com Medeiros (2003), a MM dispõe de vantagens, como a simplicidade de implementação e é constituída por operadores morfológicos elementares. Qualquer operador pode ser decomposto a partir de quatro classes fundamentais de operadores, quais sejam, erosão, dilatação, anti-erosão e anti-dilatação.

### 2.2.2 Operadores Morfológicos Elementares

A extração de informações de imagens é obtida a partir de transformações de formas, que envolvem o elemento estruturante e a imagem em estudo. Essas transformações são realizadas através dos operadores elementares. Originalmente, as operações morfológicas foram elaboradas para imagens binárias, sendo posteriormente estendidas para imagens em níveis de cinza (SERRA, 1982).

Nas discussões seguintes serão apresentados os dois operadores básicos, erosão e dilatação, que constituem os pilares da MM Binária e em níveis de cinza.

- **Erosão binária**

De acordo com Soille (2003), a erosão binária de um conjunto  $X$  por um elemento estruturante  $B(\varepsilon_B(X))$  é dada pela Equação 1.

$$\varepsilon_B (X) = \{ x | B_x \subseteq X \} \quad (1)$$

onde  $B_x$  corresponde ao elemento estruturante  $B$  centrado no pixel  $x \in X$ . De acordo com a Equação 1, o elemento estruturante  $B$  percorre a imagem  $X$ , comparando cada pixel com a vizinhança de  $x$ . Se o pixel de  $B$  corresponder a mesma

posição na vizinhança de  $x$  preservam-se os pixels onde as vizinhanças coincidem. Essa ideia é apresentada na Figura 2, com elemento estruturante em cruz.

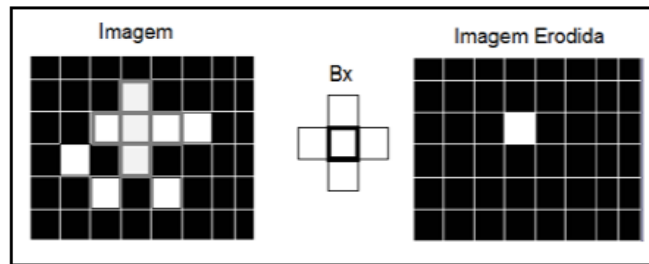


Figura 2 - Erosão de uma imagem binária a partir do elemento cruz.

Fonte: Ishikawa et al. (2010).

- **Dilatação binária**

A dilatação binária de um conjunto  $X$  pelo elemento estruturante  $B$  ( $\delta_B(X)$ ) é definida pela Equação 2 (SOILLE, 2003).

$$\delta_B(X) = \{ x \mid B_x \cap X \neq \emptyset \} \quad (2)$$

Por esta definição, o elemento estruturante  $B$  posicionado e centrado em cada pixel  $x \in X$  ( $B_x$ ), verifica uma possível interseção com a vizinhança de  $x$ . Caso seja verdadeiro, o ponto central na imagem resultante será um pixel relevante (valor 1), caso contrário será irrelevante (valor 0). A Figura 3 mostra a dilatação de uma imagem binária através de um elemento estruturante cruz.

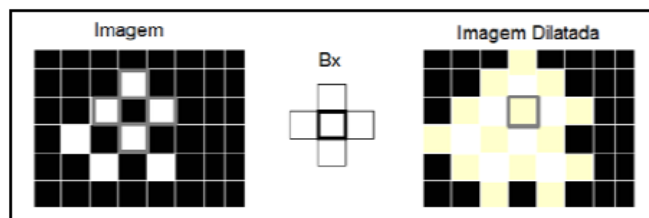


Figura 3 - Dilatação de uma imagem binária a partir do elemento cruz.

Fonte: Ishikawa et al. (2010)

Em geral, o operador de erosão binária apresenta os seguintes efeitos: diminuição dos objetos da imagem; eliminação dos objetos de tamanho inferior ao tamanho do elemento estruturante; aumento dos buracos e separação de objetos

próximos. Por sua vez, a aplicação da operação de dilatação binária produz como efeitos visuais: aumento dos objetos da imagem; preenchimento de pequenos buracos e conecta objetos próximos.

Estendendo para as imagens em tons de cinza, tem-se:

- **Erosão em níveis de cinza**

De acordo com Soille (2003), a erosão em níveis de cinza de uma imagem  $f$  por um elemento estruturante  $B$  ( $\varepsilon_B(f)(x)$ ) é definida como o valor mínimo da imagem na janela definida pelo elemento estruturante quando sua origem está em  $x$  (Equação 3).

$$[\varepsilon_B (f)](x) = \min_{b \in B} \{ f(x+b) - B(b) \} \quad (3)$$

A erosão em níveis de cinza consiste em verificar se o elemento estruturante centrado em  $x$  encontra-se abaixo do sinal  $f$ , não sendo definida num ponto onde o elemento estruturante estiver acima do sinal  $f$ , ou seja, não haverá resposta se o elemento estruturante  $B$  não estiver contido na função  $f$  (SOILLE, 2003).

Os efeitos da erosão em níveis de cinza são, de modo geral: escurecer a imagem; alargar e aumentar os padrões escuros; conectar padrões escuros próximos; reduzir e, as vezes, eliminar padrões claros; e separar padrões claros próximos.

- **Dilatação em níveis de cinza**

A dilatação em níveis de cinza da imagem  $f$  pelo elemento estruturante  $B$  ( $\delta_B (f) (x)$ ) é definida como o máximo valor da imagem na janela definida pelo elemento estruturante quando sua origem está em  $x$ , dado pela Equação 4 (SOILLE, 2003):

$$[\delta_B (f)](x) = \max_{b \in B} \{ f(x+b) + B(b) \} \quad (4)$$

A dilatação em níveis de cinza consiste em verificar se o elemento estruturante centrado em  $x$  encontra-se acima da função  $f$ . A operação não terá resposta quando o elemento estiver totalmente fora da função  $f$  (SOILLE, 2003).

De modo geral, os efeitos da dilatação em níveis de cinza são: clarear a imagem; alargar e aumentar os picos (padrões claros); conectar picos (padrões claros) próximos; reduzir e, às vezes eliminar vales (padrões escuros); e separar valores próximos.

Os operadores elementares erosão e dilatação fornecem condições básicas para a elaboração de outros filtros morfológicos, como a abertura, fechamento, gradiente morfológico etc.

### 2.2.3 Abertura e Fechamento Morfológico

- **Abertura**

Segundo Soille (2003), a abertura  $\gamma$  de uma imagem  $f$  por um elemento estruturante  $B$ , denotada por  $\gamma_B(f)$ , é definida pela operação de erosão de  $f$  por  $B$ , seguido pela operação de dilatação com elemento estruturante transposto  $B'$ , conforme Equação 5.

$$\gamma_B(f) = \delta_{B'}[\varepsilon_B(f)] \quad (5)$$

Dentre as propriedades da abertura, destacam-se a filtragem seletiva das estruturas da imagem de acordo com a forma e tamanho do elemento estruturante escolhido e, que iterar o processo várias vezes com mesmo elemento estruturante não produz efeito algum (propriedade de idempotência).

Nas imagens em níveis de cinza, os efeitos da abertura consistem na separação de padrões claros próximos, eliminação de padrões claros menores que o tamanho do elemento estruturante e na conservação de padrões escuros distantes.

De modo geral, a imagem obtida a partir de uma abertura (imagem aberta) possui menos detalhes que a imagem original (SOILLE, 2003).

## Abertura por rotações

Visto que a operação de abertura com elemento estruturante de dada forma, preserva as estruturas da imagem que contém o elemento estruturante e remove aquelas que não o contém, Heneghan et al. (2002) expõem uma maneira de utilizar essa operação para filtrar uma imagem em níveis de cinza, preservando os elementos lineares de interesse e removendo as estruturas indesejadas (ruídos).

Conforme estes autores, realizando a abertura de uma imagem ( $f$ ) com um elemento estruturante do tipo linha,  $B$ , de tamanho  $L$  e largura ( $W$ ) de um (1) pixel, é possível preservar formas lineares na imagem quando o elemento estruturante e a forma linear são aproximadamente paralelos, mais especificamente, quando  $L \sin(\alpha) < W$ . Onde  $\alpha$  representa o ângulo entre um único pixel do elemento estruturante e a forma linear de interesse.

Se muitos desses elementos estruturantes forem utilizados, com diferentes ângulos de rotação ( $\alpha$ ), então todas as formas lineares com tamanho maior ou igual ao elemento estruturante  $L$  podem ser preservadas ao menos em uma das rotações. Assim, ruídos e outros elementos que não contém o elemento estruturante em qualquer rotação, não serão preservados por essa operação. Tomando o supremo<sup>3</sup> das operações de abertura da imagem (com elemento estruturante do tipo linha em muitas diferentes rotações) (Equação 6) é possível obter uma imagem mais “limpa” (HENEGHAN et al., 2002).

$$f_c = \sup_{i=1, \dots, n} \{ \gamma_{B_i} (f) \} \quad (6)$$

Onde  $f_c$  é a imagem resultante do processo sobre a imagem  $f$ ,  $B_i$  representa o elemento estruturante  $B$  segundo a rotação de  $i$ , e  $n$  o número de rotações. Como exemplo, se  $n = 12$ , tem-se doze rotações ( $i$ ) do elemento estruturante incrementada a cada  $15^\circ$ .

---

<sup>3</sup> O supremo pode ser entendido, resumidamente, como o menor dos limitantes superiores de um subconjunto. Este conceito é apresentado com detalhes em Medeiros (2003).

## ▪ Fechamento

O operador dual da abertura morfológica é o fechamento morfológico. Segundo Soille (2003) o fechamento  $\phi$  de uma imagem  $f$  por um elemento estruturante  $B$ , denotado  $\phi_B(f)$ , é definido pela operação de dilatação de  $f$  por  $B$ , com seguida por uma erosão com o elemento estruturante transposto  $B'$ , conforme Equação 7:

$$\phi_B(f) = \varepsilon_{B'}[\delta_B(f)] \quad (7)$$

Como efeitos do fechamento sobre imagens em níveis de cinza, têm-se a separação de padrões escuros próximos, eliminação de padrões escuros menores que o tamanho do elemento estruturante, conservação de padrões claros distantes e conexão de padrões claros próximos.

Assim como acontece na operação de abertura, a imagem obtida a partir de um fechamento (imagem fechada), também possui menos detalhes que a imagem original e nesta operação também ocorre a propriedade de idempotência.

### 2.2.4 Transformações Top-hats

Segundo Facon (1996), é comum na área de análise e processamento de imagens a necessidade de extrair conjuntos de geometria complexa em imagens com fundos heterogêneos e/ou presença de ruídos. No entanto as técnicas tradicionais, como detecção de bordas, limiarização etc, de forma geral, têm dificuldades para recuperar a informação relevante e ao mesmo tempo eliminar a heterogeneidade e o ruído. Assim, têm-se como alternativas às transformações top-hats, que respondem bem a essa necessidade.

A combinação entre uma imagem original e a imagem correspondente aberta ou entre a imagem fechada e a imagem original, são a base para elaboração dos top-hats.

- **Top-hat por abertura**

O top-hat por abertura de uma imagem  $f$ , segundo Soille (2003) é definido como a diferença aritmética entre a imagem original  $f$  e sua abertura  $\gamma$  (Equação 8).

$$\text{WTH}(f) = f - \gamma(f) \quad (8)$$

Como a operação de abertura é um processo anti-extensivo (FACON, 1996), sendo seu resultado menor do que o sinal original, logo a transformação WTH é sempre positiva.

- **Top-hat por fechamento**

O top-hat por fechamento de uma imagem  $f$  é definido como a diferença aritmética entre o fechamento  $\phi$  da imagem original e a imagem original  $f$  conforme Equação 9 (SOILLE, 2003).

$$\text{BTH}(f) = \phi(f) - f \quad (9)$$

Neste caso, devido à operação de fechamento ser um processo extensivo (FACON, 1996), o resultado da transformação BTH é sempre positivo.

A forma e tamanho do elemento estruturante usado nas transformações top-hats dependem da morfologia das estruturas a serem extraídas (SOILLE, 2003).

### **2.2.5 Reconstrução morfológica**

A reconstrução morfológica por dilatação, ou reconstrução por dilatação condicional, visa restabelecer a forma de objetos nas imagens que podem ter sofrido alterações por outras técnicas de processamento. A partir de uma imagem denominada marcadora (marker), a qual funciona como “semente”, pode ser realizada uma dilatação a partir de um elemento estruturante. O resultado dessa operação será comparado com uma imagem denominada máscara (mask), e o resultado a ser considerado será a interseção dessas duas imagens. O processo é

iterado até sua estabilidade, isto é, até que o resultado seguinte seja igual ao anterior (SOILLE, 2003).

A reconstrução por dilatação de uma imagem  $g$  para uma imagem marcadora  $f$  é definida como a dilatação geodésica de  $f$  com relação a  $g$  até atingir a estabilidade, e denotada por  $R_g(f)$ , conforme Equação 10 (SOILLE, 2003):

$$R_g(f) = \partial_g^i(f) \quad (10)$$

onde,  $i$  é tal que:

$$\partial_g^i(f) = \partial_g^{i+1}(f)$$

Um exemplo de reconstrução morfológica por dilatação é apresentado na Figura 4.

A dilatação geodésica ( $\partial_g^{(1)}$ ) da imagem marcadora  $f$  (sendo que o domínio de  $f$  deve ser igual ao domínio de  $g$  ( $D_f = D_g$ ) e a imagem  $f$  deve ser maior ou igual a imagem  $g$  ( $f \geq g$ ), com relação a imagem máscara  $g$ , pode ser definida (SOILLE, 2003) como apresentado na Equação 11.

$$\partial_g^{(1)} = \partial^{(1)}(f) \wedge g \quad (11)$$

onde,  $f \geq g$ .

Primeiramente, a imagem marcadora é dilatada e depois é forçada a permanecer menor que a imagem máscara. A imagem máscara age como se fosse um limite para a dilatação da imagem marcadora.

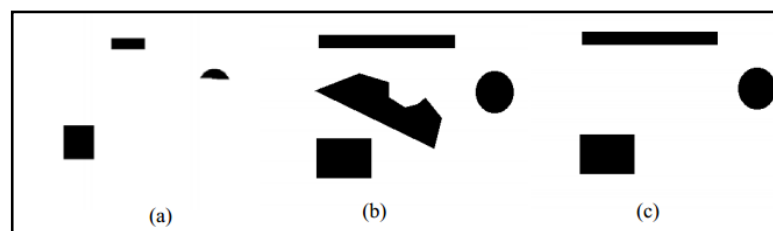


Figura 4 - Exemplo da reconstrução morfológica por dilatação: (a) imagem marcadora, (b) imagem máscara e (c) reconstrução morfológica por dilatação (somente os elementos que possuem "sementes" na imagem marcadora são recuperados).

Fonte: Neves (2003).

### 2.2.6 Afinamento morfológico

A operação de afinamento morfológico de uma imagem consiste em remover pixels que correspondem a certa configuração, preservando a forma da imagem original. Segundo Fisher et al. (2003), a operação de afinamento (thinning), é normalmente aplicada para remover seletivamente pixels dos objetos em imagens binárias. Dentre as várias aplicações, é muito comum o uso sobre imagens resultantes de processos de detecção de bordas, para reduzir as linhas resultantes à espessura de um único pixel.

Esta operação tem como base a transformação hit-or-miss ("acerto ou erro"), que consiste em testar o conjunto  $X$  de uma imagem a partir de um elemento estruturante e o conjunto complementar ( $X^c$ ) a partir de outro elemento estruturante. Para tanto, são necessários dois elementos estruturantes que formam um par  $V=(B^i, B^e)$ , que testam o interior e exterior das entidades da imagem. A transformação hit-or-miss é definida através da Equação 12 (FACON, 1996).

$$\text{hom}^V(X) = X \text{ hom } V = \{x : B_x^i \subset X; B_x^e \subset X^c\} \quad (12)$$

Onde  $B_x$  representa o elemento estruturante  $B$  centrado no pixel  $x$ .

Conforme Facon (1996), um conjunto de pontos de  $X$  pertence a transformada  $(X \text{ hom } V)$  se  $B^i$  se "encaixa" em  $X$  e se  $B^e$  se "encaixa" em  $X^c$ . Isso supõe que os elementos estruturantes  $B^i$  e  $B^e$  sejam disjuntos.

A transformação apresentada é dita homotópica, pois não modifica o número de conectividade. Isso implica dizer que a imagem inicial e a transformada têm o mesmo número de partes. Em  $R^2$ , uma operação deste tipo consiste em reduzir a espessura dos componentes conexos de  $X$  até um valor infinitamente pequeno sem mudar o número nem o tipo (FACON, 1996).

Dessa forma, afinar uma imagem binária a partir da transformação hit-or-miss é representada pela Equação 13 (FACON, 1996).

$$\text{AFI}^V(X) = X \setminus \text{AFI}^V = X / (\text{hom}^V(X)) = X / (\varepsilon^{B^i}(X) \cap \varepsilon^{B^i}(X^c)) \quad (13)$$

Portanto, o afinamento é uma operação homotópica, ou seja, preserva a conectividade e o número de componentes conexos. Além disso, caso o resultado tenha sido alcançado, processar mais não destrói o resultado obtido, Nesse nível, a transformação morfológica de afinamento torna-se idempotente (FACON, 1996).

Na Figura 5 é apresentado o resultado da operação de afinamento morfológico sobre uma imagem binária.

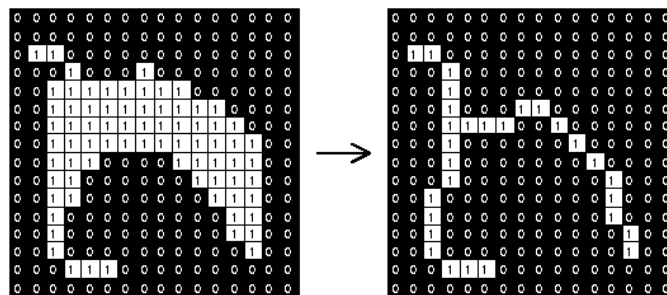


Figura 5 - Exemplo de imagem resultante da operação de afinamento morfológico sobre imagem binária.

Fonte: Fisher et al. (2003).

### 2.3 Malha Viária como feição cartográfica de interesse

Dentre as feições da superfície terrestre presentes em imagens digitais, são de interesse para esta pesquisa, as vias (estradas, rodovias etc) que compõem a malha viária.

Em vista que são diversas as terminologias existentes, referente a esta feição, faz-se necessário apresentá-las, conforme item 2.3.1.

No item 2.3.2, são apresentadas as principais características geométricas e espectrais da malha viária em imagens digitais.

### 2.3.1 Conceitos e classificações

De acordo com DNIT (2007), em documento que visa delinear as terminologias frequentemente adotadas no meio rodoviário, as vias são classificadas nas seguintes categorias:

- **Rodovia em áreas urbanas:** correspondente aos trechos de rodovias localizados no interior de perímetro urbano das cidades ou municípios;
- **Rodovia rural:** se refere aos trechos de rodovias que conectam áreas urbanas e industriais, pontos de geração e atração de tráfegos e pontos significativos dos segmentos modais, que atravessam área rural; e
- **Rodovia Vicinal:** definida como a estrada local, que visa principalmente dar acesso a propriedades lindeiras, fazendas e sítios, ou caminhos que ligam povoações relativamente pequenas e próximas.

Já Silva (2008), cita algumas nomenclaturas existentes adotadas em sinônimo às estradas sem pavimentação asfáltica em meio rural, como estradas rurais, estradas de terra, estradas de chão e estradas vicinais. Ainda segundo este autor, o termo estradas vicinais é o mais adequado para descrever as estradas não pavimentadas, pois as demais denominações não fazem distinção entre as estradas em meio urbano e rural.

De outra forma, no contexto da produção de dados geoespaciais no Brasil, normatizados pela Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), tem-se inserido na Especificação Técnica para a Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-EDGV) na categoria sistema de transportes, o subsistema rodoviário, o qual agrega, entre outras, a classe trecho rodoviário (CONCAR, 2010).

Conforme descrito na referida norma técnica, os tipos de trechos rodoviários são:

- **Acesso:** caracterizado como o segmento rodoviário que liga a rodovia principal a determinado ponto de interesse, como por exemplo, áreas urbanas, portos, parques, fazendas etc;
- **Rodovia:** via destinada ao tráfego de veículos sobre rodas;
- **Caminho carroçável:** via transitável em tempo bom e seco, com piso e traçado irregulares, comumente de difícil tráfego para veículos motores; e
- **Autoestrada:** são vias de tráfego para altas velocidades, com todos os acessos controlados, sem cruzamento de nível e destinada exclusivamente a veículos

motorizados, de revestimento sólido (asfalto, concreto ou calçamento), com um mínimo de quatro (4) faixas, apresentando separação física entre as pistas de tráfego.

Tem-se também inserida na ET-EDGV a classe arruamento, a qual é destinada as vias internas de uma área urbana.

Um atributo inerente a estes tipos de vias é a natureza do revestimento da superfície de rolamento, de suma relevância nos métodos de extração das feições rodoviárias em imagens digitais. Ainda segundo a ET-EDGV (CONCAR, 2010), quanto à natureza do revestimento as vias podem ser categorizadas como:

- **Leito natural:** no qual a superfície de rolamento se apresenta no próprio terreno natural (solo, terra);
- **Revestimento primário (solto):** formado comumente por saibro e/ou cascalho;
- **Pavimentado:** toda a superfície de rolamento da via é composta por revestimento rígido ou flexível, tais como asfalto, concreto, cimento etc.;
- **Calçado:** a superfície é revestida por blocos de pedra, paralelepípedos ou por bloquetes; e
- **Desconhecido:** quando a natureza do revestimento da via não é conhecida.

Do exposto, a malha viária (feição cartográfica de interesse) irá envolver todo tipo de via carroçável, sendo que segundo as terminologias apresentadas englobam: rodovia rural ou vicinal (DNIT, 2007), acessos, rodovias, caminho carroçável e autoestrada (CONCAR, 2010) ou estradas vicinais (SILVA, 2008). Podendo o tipo de revestimento da via ser pavimentado, leito natural, primário ou ainda desconhecido.

Para fins desta pesquisa, as feições de interesse serão referidas como malha viária, vias ou estradas / rodovias, indistintamente.

É pertinente destacar que nesta dissertação não se buscar discernir sobre o tipo de revestimento das vias, pois é de interesse principal apenas a extração da forma geométrica da malha viária. No entanto, o conhecimento do tipo de revestimento faz-se necessário para o método de extração, visto que está intrinsecamente relacionado ao comportamento espectral do alvo de interesse nas imagens digitais.

### 2.3.2 Características da malha viária em imagens digitais

As características das feições lineares do sistema viário em imagens digitais estão vinculadas, principalmente, às propriedades espectrais e geométricas deste alvo, que influenciam diretamente os processos de extração.

Neste sentido, Gruen e Li (1995) e Dal Poz e Agouris (2000) descrevem que as vias em uma imagem de Sensoriamento Remoto, do ponto de vista geométrico e espectral, podem ser consideradas como uma faixa estreita e contínua de alta intensidade de brilho, margeada por regiões (fundos) de baixa intensidade.

Estes autores, afirmam ainda que a intensidade de brilho não possui grande variação para curtas distâncias ao longo da via, devido ao fato de suas propriedades espectrais serem similares em trechos curtos. E para fins práticos de modelagem matemática, uma via é normalmente composta por segmentos retos e com curvas suaves, geralmente em forma de arcos circulares.

Jin et al. (2014) descreve que os trechos viários em áreas rurais ou não urbanas de uma imagem digital, apresentam características como largura constante, mudança de curvatura contínua e distribuição local homogênea (Figura 6).

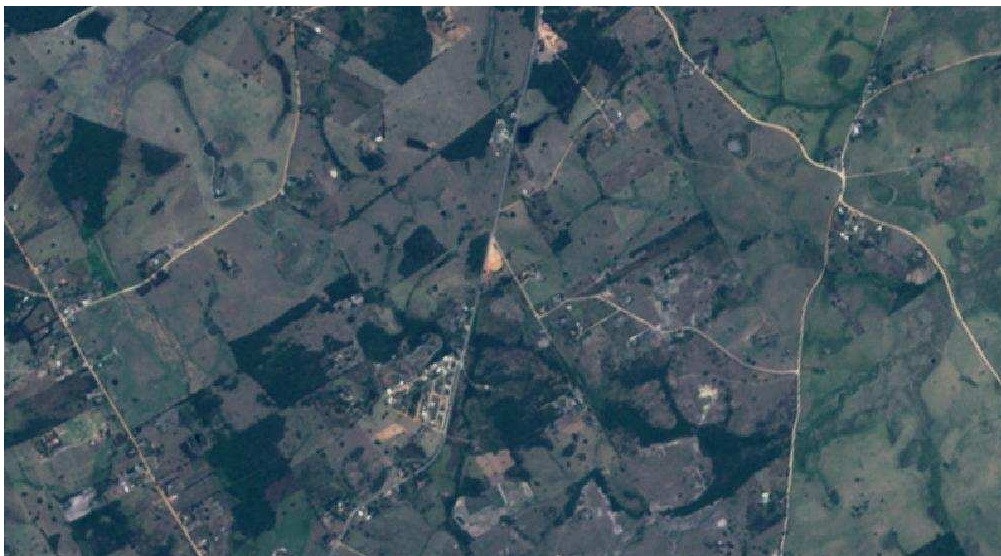


Figura 6 - Exemplos de vias em um trecho de imagem RapidEye de área não urbana.

Para Baumgartner et al. (1999) em imagens de baixa resolução (consideradas pelos autores com IFOV (campo de visada instantâneo) maior que 2 m), as vias aparecem principalmente como linhas que formam uma rede mais ou menos densa, e está diretamente relacionado ao grau de ocupação antrópica da

região. Wang et al. (2005) acrescenta que neste tipo de imagem, as vias são expressas como linhas com largura em torno de 1 a 3 pixels, sendo então modeladas como linhas no processo de extração.

Já para imagens de alta resolução, as entidades geométricas, como estrutura e forma, desempenham um papel crucial no reconhecimento da malha viária. Conseqüentemente, as vias são modeladas como regiões homogêneas, contínuas e alongadas, com largura aproximadamente constante (JIN et al., 2009).

De acordo com Zhang (1999) a extração da malha viária sobre imagens multiespectrais apresenta grandes vantagens sobre imagens pancromáticas ou outras imagens em níveis de cinza, pois aumentam a capacidade de discriminar os materiais que compõem a superfície das vias (asfalto, concreto, terra exposta etc) da maioria dos outros tipos de materiais que compõem a paisagem.

## **2.4 Métricas para avaliação da qualidade**

Neste trabalho foram empregadas métricas que, com uso de feições lineares, permitiram aferir sobre a qualidade posicional planimétrica das imagens RapidEye utilizadas, bem como da malha viária extraída pelo método proposto, conforme descrito no item 3.3. Dessa forma, faz-se necessário apresentar os fundamentos que permeiam o tema.

### **2.4.1 Controle de qualidade posicional utilizando feições lineares**

O controle de qualidade posicional em dados espaciais é um procedimento de suma importância, pois permite garantir e especificar a qualidade dos mesmos, evidenciando discrepâncias, omissões e incertezas, bem como definir sua finalidade (GOODCHILD, 2010).

Conforme Santos (2010), a principal importância do controle de qualidade em cartografia é informar a qualidade e assim, proporcionar a destinação do uso da informação (seja posicional, de atributos ou temporal) inerente nos dados espaciais.

A componente posicional, intrínseca aos dados espaciais, é uma das mais estudadas e importantes no controle de qualidade. A acurácia posicional de um dado

espacial é realizada comparando, estatisticamente, o posicionamento horizontal e vertical deste dado em relação à posição mais provável no terreno, a qual é obtida de um produto ou método mais acurado que o original (SANTOS, 2010).

Tradicionalmente, a maioria das Normas e Leis de controle de qualidade posicional utilizam metodologias de avaliação baseadas na comparação de pontos homólogos, bem definidos e distribuídos espacialmente pela área de estudo.

Entretanto, quando o número de pontos de checagem é insuficiente ou não apresentam distribuição homogênea na área de estudo, surge como alternativa a utilização de feições lineares ou polígonos para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais (SANTOS, 2010).

Tong et al. (2013), ressalta que a investigação de métodos de avaliação da acurácia posicional que utilizam feições lineares tem sido uma das grandes demandas nas pesquisas de Sistemas de Informações Geográficas, com crescente esforço da comunidade científica para compreensão do tema e desenvolvimento de diferentes métodos de avaliação.

Nos métodos de avaliação da acurácia posicional com o uso de feições lineares, consideram-se a comparação entre linhas homólogas dos dados de teste em relação aos dados de referência. Esta comparação analisa aspectos como: razão entre comprimentos e quantidade de vértices, angularidade, razão de segmentos curvilíneos, distância entre os vértices, percentual de inclusão em uma área de influência, entre outros (SANTOS, 2015).

No trabalho de Santos et al. (2015), é apresentado um estudo detalhado de aplicação dos métodos da Banda Épsilon, Buffer Simples, Buffer Duplo, Distância de Hausdorff e Influência do Vértice, os quais utilizam feições lineares na avaliação da acurácia posicional planimétrica de uma ortoimagem Ikonos.

Ainda os autores, utilizando o padrão nacional definido pelo Decreto-lei nº 89.817 de 1984, aliado à ET-ADGV (BRASIL, 1984; DSG, 2011), demonstram a viabilidade de aplicação dos distintos métodos de feições lineares para atestar a acurácia posicional planimétrica. Por meio da comparação dos resultados obtidos com o método tradicional por pontos, foram alcançados resultados similares aplicando os métodos Buffer Simples e Buffer Duplo.

Embora os resultados do método Buffer Simples foram semelhantes ao Buffer Duplo, este último é recomendado por ser mais robusto, uma vez que gera

uma medida de discrepância, na qual se pode investigar a presença de outliers e tendências (ATKINSON e ARIZA, 2002; SANTOS et al., 2015).

Para fins desta pesquisa, será adotado na etapa de avaliação da acurácia posicional planimétrica das imagens RapidEye o método do Buffer Duplo, utilizando o padrão do Decreto-lei nº 89.817.

Conforme BRASIL (1984), Santos (2010), DSG (2011, 2016), para que um produto cartográfico seja classificado quanto ao Decreto-lei nº 89.817, duas condições devem ser atendidas: (i) 90% dos valores de discrepâncias posicionais devem ser iguais ou inferiores ao valor do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) em relação à escala e a classe testada e; (ii) o RMS (Root Mean Square) das discrepâncias deve ter valor igual ou inferior à tolerância EP (Erro Padrão) definido pela norma (Tabela 1).

Tabela 1- Tolerâncias utilizadas para avaliação da acurácia posicional planimétrica no padrão do Decreto-lei nº 89.817.

Classe	Tolerância Planimétrica	
	PEC*	EP*
A	0,5 mm	0,3 mm
B	0,8 mm	0,5 mm
C	1,0 mm	0,6 mm

A discrepância planimétrica é obtida através da Equação 14, tomando a resultante posicional entre as coordenadas de campo ou referência ( $X_R$ ,  $Y_R$ ) com as coordenadas do dado espacial em teste ( $X_T$ ,  $Y_T$ ). Já o RMS das discrepâncias é obtido pela Equação 15.

$$d_p = \sqrt{(X_T - X_R)^2 + (Y_T - Y_R)^2} \quad (14)$$

$$RMS_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{p_i})^2}{n-1}} \quad (15)$$

### 2.4.1.1 Método Buffer Duplo

O método Buffer Duplo, originalmente proposto por Tveite e Langaas (1999) como Buffer Overlay Statistics, consiste em aplicar o modelo da Banda de Erro tanto na linha de referência quanto na linha a ser testada.

Criado por Perkal (1966), o modelo da faixa de incerteza ou Banda de Erro, como também é conhecido, se refere a um buffer gerado ao redor do segmento de linha, sendo esta área utilizada para representar a incerteza posicional da feição linear.

Portanto, no método do Buffer Duplo, após aplicar um buffer em ambas as linhas (de referência e a ser testada), é realizada uma interseção entre os polígonos resultantes dos buffers, de modo a obter uma medida de discrepância média entre as feições lineares (Figura 7). Assim, é possível avaliar posicionalmente a acurácia do dado espacial em teste e gerar um gráfico da discrepância média em relação à largura do buffer.

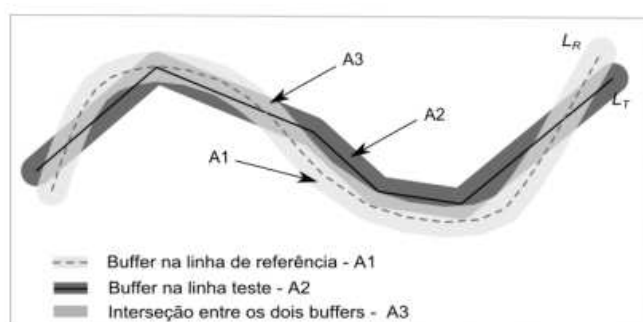


Figura 7 - Ilustração do método Buffer Duplo.

Fonte: Santos (2015).

Atkinson e Ariza (2002) destacam que um dos ganhos do método Buffer Duplo é o cálculo de uma medida de discrepância (Equação 16), que pode ser aplicada a um teste de tendência para a verificação de erros sistemáticos. A discrepância ( $dm$ ) pode ser obtida multiplicando-se o valor de  $\pi$  ( $\pi$ ) pela largura do buffer ( $x$ ) e pelo somatório da área do buffer da linha de referência que não faz interseção com o buffer da linha de teste ( $A_1 - A_2$ ) dividido pelo valor da área formada pelo buffer da linha teste ( $A_2$ ).

$$dm_i = \pi \cdot x \cdot \frac{(A_1 - A_2)_i}{(A_2)_i} \quad (16)$$

Para a aplicação do Buffer Duplo, a seguinte sequência de passos é descrita em Santos et al. (2015):

1. Selecionar uma amostra de n linhas homólogas de teste ( $L_T$ ) e de referência ( $L_R$ );
2. Aplicar um buffer, de tamanho x, em cada linha i da amostra de linhas homólogas de teste e referência. Para o emprego do Decreto-lei nº 89.817, utiliza-se como tamanho do buffer o valor do PEC para a escala e a classe utilizada no processo de avaliação;
3. Calcular a área  $A_2$  gerada pela operação de buffer em cada linha de teste;
4. Fazer uma sobreposição entre os polígonos gerados pelos buffers da linha teste e da linha de referência e calcular o valor de  $(A_1 - A_2)$ , referente à área do polígono de referência que não faz interseção ao polígono teste;
5. Calcular a discrepância média (dm), para cada linha teste i (Equação 16);
6. Para análise do Decreto-lei nº 89.817, faz-se a análise se 90% das linhas testadas apresentam discrepância média (dm) menor ou igual ao valor do PEC (da classe e escala utilizados para gerar o buffer x), e ainda, o RMS das discrepâncias dm ter valor menor ou igual ao do EP. Se as duas condições forem aceitas, classifica-se o dado espacial de acordo com a classe e escala trabalhada.

#### **2.4.2 Análise da qualidade do método de extração por correspondência linear**

Em qualquer pesquisa relacionada ao desenvolvimento de métodos automatizados para aplicações práticas, é essencial a avaliação dos resultados obtidos através do processo, pois assim é possível inferir sobre o potencial dos mesmos (WIEDEMANN et al., 1998).

Nóbrega (2007) menciona que a análise de correspondência linear em sensoriamento remoto surgiu para estimar a acurácia com que as feições lineares são extraídas das imagens, seja através de métodos automáticos ou semiautomáticos. Ainda segundo o autor, as funções (métricas) deste tipo de análise, são desenvolvidas

através da correspondência geométrica dos elementos lineares extraídos e elementos lineares de referência.

Utilizando o princípio da correspondência linear, algumas métricas são reportadas na literatura, tais como: corretude (correctness), completude (completeness), qualidade (quality), redundância, entre outras (HEIPKE et al., 1997; WIEDEMANN et al., 1998; WIEDEMANN, 2003). Essas métricas fornecem valores estatísticos que visam quantificar e refletir a qualidade dos resultados alcançados no processo de extração da malha viária.

Nesse sentido, Cardim e Silva (2013) e Cardim et al. (2014) apresentam o desenvolvimento e implementação de algoritmos (compilados no software denominado CARTOMORPH), que tem como base variações das métricas de correspondência descritas por Wiedemman et al. (1998) e Wiedemann (2003). Assim, o software CARTOMORPH possibilita determinar de forma automática os valores estatísticos para as métricas e auxiliar o usuário inferir sobre a qualidade dos processos de extração de feições cartográficas em imagens.

Para avaliação do processo de extração por meio do sistema desenvolvido, é necessária uma imagem de referência, considerada como correta ou verdade absoluta, a qual é comparada pixel a pixel com a imagem resultante do método de extração de feições a ser avaliado. A comparação é então realizada de forma simplificada ou considerando uma área de tolerância (buffer) em torno da feição de interesse das imagens (CARDIM et al., 2014).

No caso da comparação considerando a área de tolerância, conforme proposto por Wiedemann (2003), é tomado um buffer de largura predefinido disposto separadamente em ambas às imagens (extraída e referência), sendo os pixels considerados coincidentes em uma imagem se estão incluídos dentro do buffer de tolerância da outra imagem. Na avaliação de processos automatizados para extração de malha viária em imagens, usualmente a dimensão do buffer é associada à largura média das vias (MAYER et al., 2006).

Ainda segundo Wiedemann (2003), a consideração do buffer proporciona melhores métricas para avaliação da qualidade, pois as imagens são consideradas correspondentes se a diferença de direção entre pequenos trechos da malha viária de referência e extraída forem suficientemente pequenas. No entanto, este autor ressalta que quanto maior o valor de tolerância adotada, menor o rigor do processo de extração, uma vez que a área de abrangência dos buffers passa a ser aumentada e

acaba gerando resultados aparentemente mais precisos e na prática menos confiáveis. Porém, ao adotar buffers com largura próxima a largura real das vias implica em resultados mais próximos a realidade.

Conforme Cardim et al. (2014), para geração do buffer de tolerância nas imagens, é empregada a operação de dilatação morfológica. Então, é necessário definir a forma e tamanho do elemento estruturante que será utilizado para gerar a área de tolerância ao redor das feições de interesse.

Assim feito, através do processo de comparação, inicialmente o algoritmo contabiliza o número total de pixels da feição de interesse presentes na imagem de referência que coincide com a feição extraída (pixels correspondentes da imagem extraída), e posteriormente contabiliza os pixels da feição de interesse extraída que coincidem com as feições de referência (pixels correspondentes da imagem de referência). Além de disso, o sistema computa o número total de pixels que não coincidem durante as comparações.

Na Figura 8 é apresentado um esquema que exemplifica ambas as comparações.

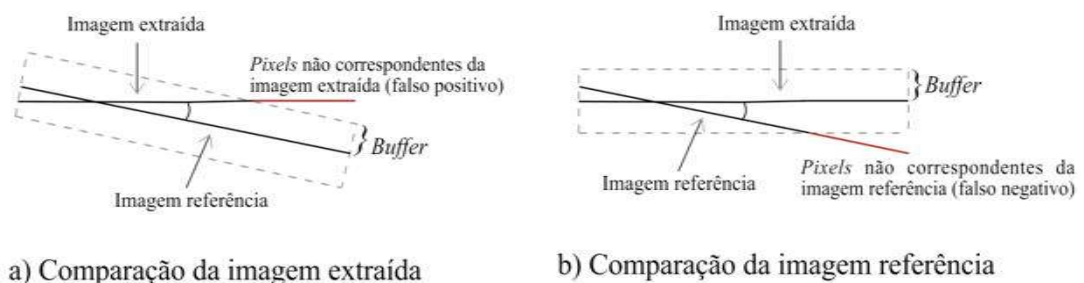


Figura 8 - Comparação entre as feições da (a) imagem extraída e (b) imagem de referência.

Fonte: Adaptado de Cardim e Silva (2013).

É relevante ressaltar, que durante as comparações é utilizado somente o esqueleto ou bordas das feições de interesse das imagens (WIEDEMANN, 2003; CARDIM et al., 2014). No caso da malha viária, a feição representativa do eixo central de cada via.

Com base nos números totais de pixels computados durante as comparações, são definidas as métricas para avaliação da qualidade obtida pelo processo de extração de feições (WIEDEMANN, 2003; CARDIM e SILVA, 2013).

- **Corretude (Correctness)**

A métrica denominada corretude (ou correctness), representa o percentual de pixels da imagem extraída que corresponde aos pixels da imagem de referência, ou seja, representa aos elementos que foram extraídos corretamente, conforme Equação 17. O valor estatístico da corretude está compreendido no intervalo entre [0:1], sendo o valor 1 (ou 100%) considerado ótimo (valor desejado).

$$\text{Corretude} = \frac{\text{pixels correspondentes na comparação da imagem extraída}}{\text{número total de pixels da imagem extraída}} \quad (17)$$

- **Compleitude (Completeness)**

A métrica de qualidade denominada compleitude (ou completeness), é definida como o percentual dos pixels da imagem de referência que foram devidamente extraídos através do método de extração (Equação 18). O valor dessa métrica também pode variar no intervalo [0:1], sendo o valor 1 (100%) desejado.

$$\text{Compleitude} = \frac{\text{pixels correspondentes na comparação da imagem referência}}{\text{número total de pixels da imagem referência}} \quad (18)$$

Conforme Wiedemann (2003), a partir da corretude e compleitude podem ser obtidas outras métricas, que também são utilizadas para inferir sobre a qualidade da extração da malha viária. Dentre elas, apresentam-se a qualidade e redundância.

- **Qualidade (Quality)**

A métrica denominada qualidade é interessante quando se deseja descrever a qualidade do método de extração através de um único valor. Essa métrica é obtida combinando os valores de corretude e compleitude (Equação 19), neste caso o valor também pode variar no intervalo de [0:1], sendo o valor 1 (100%) desejado.

$$\text{Qualidade} = \frac{\text{compleitude} * \text{corretude}}{\text{compleitude} - \text{compleitude} * \text{corretude} + \text{corretude}} \quad (19)$$

- **Redundância (Redundancy)**

A redundância representa a porcentagem de pixels extraídos corretamente que são redundantes, ou seja, pixels que se sobrepõem. O valor dessa métrica é obtido através da Equação 20, e pode variar no intervalo de  $]-\infty;1]$ , sendo considerado ótimo o valor 0 (0%).

$$\text{Redundância} = \frac{\text{pixels correspondentes da extração} - \text{pixels correspondentes da referência}}{\text{total da imagem extraída}} \quad (20)$$

## 2.5 Imagens Rapideye

O uso de imagens adquiridas por sensores remotos a bordo de plataformas orbitais tem sido um insumo efetivo para aquisição de dados necessários às instituições públicas e privadas na gestão territorial, permitindo a tomada de decisões auxiliadas pelo conhecimento do espaço físico (FELIX et al., 2009).

Nos últimos anos, inúmeros satélites de observação da Terra têm sido lançados com avanços consideráveis em seus sistemas sensores de coleta remota de informações da superfície terrestre, especialmente em termos de resoluções espacial, espectral e temporal.

Seguindo esta tendência, a empresa Alemã RapidEye lançou no dia 29 de Agosto de 2008, numa ação pioneira, uma constelação composta por cinco satélites de sensoriamento remoto. Estes satélites contêm sensores multiespectrais lineares do tipo pushbroom (varredura eletrônica) idênticos, e se encontram no mesmo plano orbital, capazes de realizarem a cobertura de extensas áreas e com alta capacidade de revisita (FELIX et al., 2009; KEPLER, 2011).

Os sensores multiespectrais da constelação de satélites RapidEye são capazes de adquirirem imagens em cinco bandas do espectro eletromagnético (nos comprimentos de onda entre 440 nm à 850 nm). A resolução espacial original de cada banda é de 6,5 metros, chegando a um pixel de tamanho 5 m no terreno após a ortorretificação das imagens, sendo compatíveis com a escala de 1:25.000. O tempo de revisita ocorre diariamente para as tomadas off-nadir (fora do nadir) e de 5,5 dias para visadas a nadir, e a resolução radiométrica das imagens é de 12 bits, conforme Tabela 2 (RAPIDEYE, 2015).

Tabela 2 - Características gerais do sistema RapidEye.

<b>Características</b>	<b>Informações</b>
Número de satélites	5
Altitude da órbita	630 km, órbita síncrona com o Sol
Hora de passagem pelo Equador	+/- 11:00 h em hora local
Largura da faixa de imageamento (swath):	77 km
Tempo de revisita	Diariamente (off-nadir); 5,5 Dias (nadir)
Tipo de sensor	Multiespectral (pushbroom)
Bandas espectrais	Azul: 440 - 510 nm Verde: 520 - 590 nm Vermelho: 630 - 685 nm Red-Edge: 690 - 730 nm Infravermelho próximo (NIR): 760 – 850 nm
Resolução espacial (nadir)	6,5 m
Tamanho do pixel no terreno (ortorretificada)	5 m
Resolução radiométrica	12 bits
Datum horizontal	WGS84

Fonte: Adaptado de RAPIDEYE (2015)

As imagens RapidEye são comercializadas de acordo com nível de processamento do produto. Na Tabela 3, são apresentados os dois principais, 1B e 3A.

Tabela 3 - Resumo dos principais níveis de processamento das imagens dos satélites do sistema RapidEye.

<b>Nível</b>	<b>Descrição</b>
1B	Produto básico - correções de sensor e radiométrica a partir dos dados de efemérides e altitude dos satélites. Imagens disponibilizadas apenas com correção radiométrica e registro entre bandas espectrais (tamanho original do pixel - 6,5 m).
3A	Produto ortorretificado - correções de sensor, radiométrica e geométrica a partir de dados de efemérides, atitude do satélite, modelo de visada da câmera, além de pontos de controle e modelo digital de elevação (DEM). Imagens processadas por tiles de 25 x 25 km (tamanho do pixel - 5 m).

Fonte: Adaptado de RAPIDEYE (2015)

Ressalta-se que a acurácia dos produtos do nível 3A (imagens ortorretificadas), depende da qualidade dos pontos de controle e do modelo digital de elevação utilizados no processo de processo de ortorretificação (MACHADO e SILVA et al., 2013; RAPIDEYE, 2015).

Impulsionado pelas políticas de gestão ambiental, em especial o Programa de Regularização Ambiental (instituído pelo Decreto Presidencial nº 7.830 de 17 de outubro de 2012), o qual tem como um de seus principais instrumentos o Cadastro Ambiental Rural (CAR), o Governo Brasileiro por meio do Ministério do Meio Ambiente (MMA) tem adquirido recobrimentos completos de todo o território nacional por imagens dos satélites RapidEye. Mais especificamente, coberturas dos anos de 2011, 2012, 2013 e mais recentemente 2014, que contém também algumas cenas do ano de 2015.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

A área de estudo desta pesquisa compreende três (3) recortes de cenas RapidEye, nível 3A, situados nos municípios de Araruama, Rio Bonito e Cabo Frio, ao leste do Estado do Rio de Janeiro, conforme Figura 9.

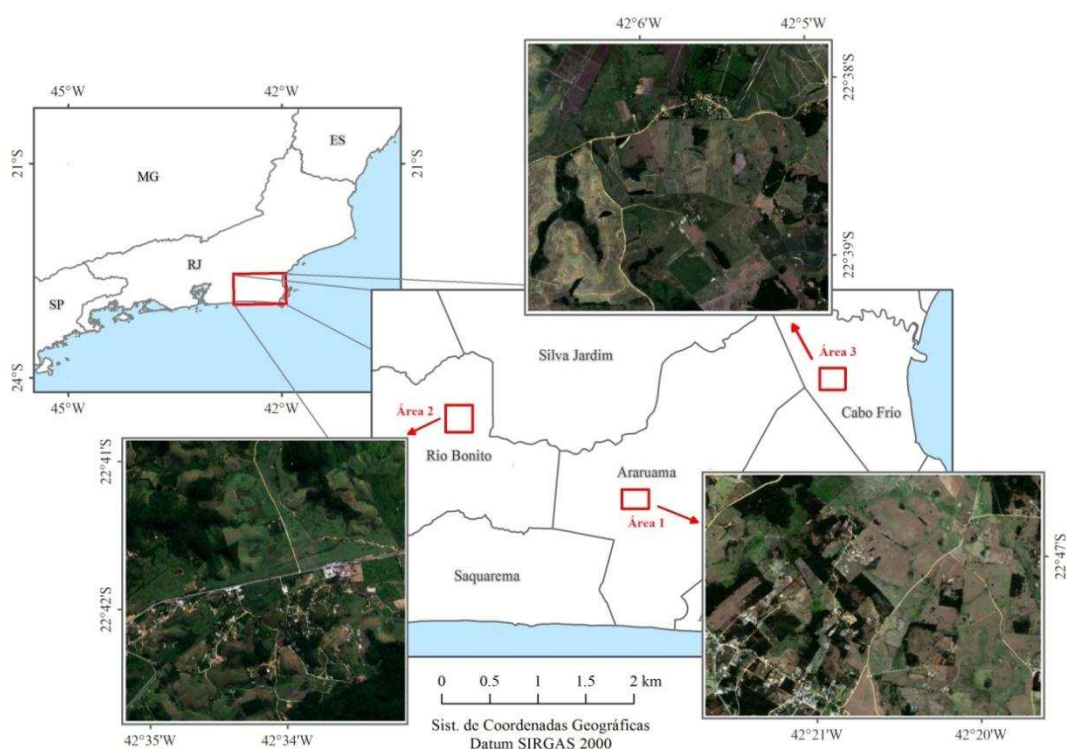


Figura 9 - Localização das áreas de estudo.

A escolha dessas áreas foi influenciada pela disponibilidade de dados de campo de alguns trechos de estradas / rodovias, coletados com receptores GNSS e fornecidos por Teixeira (2016).

Também foram consideradas as seguintes premissas na seleção das áreas e imagens:

- i. Diversidade das feições de interesse (malha viária), tanto em termos de tipo (estradas vicinais, rodovias etc), quanto geometria (trechos retilíneos e sinuosos), possibilitando testar a metodologia proposta para diferentes situações; e
- ii. Imagens mais recentes disponíveis que recobrem as áreas de interesse, com boa qualidade radiométrica e/ou isentas de cobertura por nuvens.

As cenas RapidEye para as áreas 1 e 2 são de 09/10/2014 e 06/04/2014, respectivamente, e de 20/02/2015 para a área 3.

É importante ressaltar que, nas áreas de estudo tem-se a presença de vias de leito natural (estradas vicinais, acessos etc), bem como de vias pavimentadas (rodovias, autoestradas etc).

### **3.2 Materiais utilizados**

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados os seguintes materiais:

- Imagens RapidEye, nível 3A, obtidas no Geo Catálogo do MMA por intermédio do Departamento de Engenharia Civil da UFV;
- Software ENVI e Módulo Feature Extraction, versão 5.1, para realização das correções de interferências atmosféricas das imagens e dos procedimentos de classificação baseada em objetos;
- Software MATLAB, versão R2013a, para elaboração de rotinas com operadores morfológicos;
- Software ArcGis, versão 10.2, para manipulação dos dados espaciais e aplicação de rotina de avaliação da acurácia posicional;
- Software CARTOMORPH, para avaliação da malha viária extraída pela análise de correspondência linear;

### **3.3 Metodologia**

A metodologia adotada para alcançar os objetivos que se propõem nesta dissertação, basicamente abrange os passos descritos nos fluxogramas das Figura 10 e 12.

Na primeira etapa da metodologia, são realizados os procedimentos para inferir sobre a acurácia posicional planimétrica do produto espacial utilizado no trabalho (as imagens RapidEye ortorretificadas). Para tanto, é utilizado feições

lineares, através do método do Buffer Duplo, para obtenção das discrepâncias posicionais e análise da acurácia posicional do produto.

Em segunda etapa, é apresentada a metodologia semiautomática desenvolvida para extração da malha viária das imagens, que utiliza a classificação baseada em objetos em conjunto com operadores da morfologia matemática.

Por fim, a terceira etapa da metodologia ocupa-se da validação dos resultados obtidos, sendo feito o uso da análise de correspondência linear, que possibilita inferir sobre a qualidade dos elementos extraídos e do processo de extração.

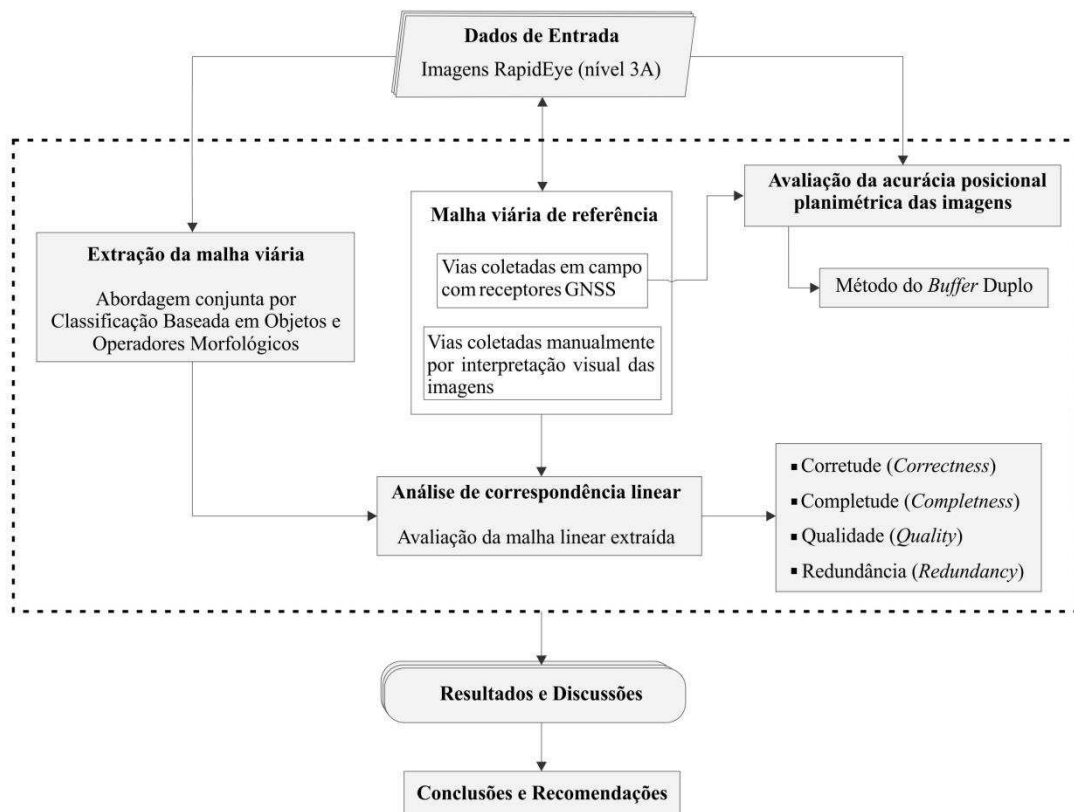


Figura 10 - Fluxograma síntese das principais atividades realizadas no trabalho.

No desenvolvimento das atividades do trabalho supracitadas, procedimentos específicos foram utilizados, os quais serão detalhados conforme itens apresentados na sequência.

### 3.3.1 Etapa de avaliação da acurácia posicional das imagens

No âmbito da cartografia, Ariza (2002) menciona que o controle de qualidade posicional é um procedimento indispensável na produção cartográfica, e que os prejuízos podem ser significativos com a utilização de base de dados de má qualidade.

Para tornar possível a avaliação da acurácia posicional planimétrica das imagens RapidEye utilizadas neste trabalho, bem como inferir sobre os elementos extraídos pelo método proposto, é necessário dispor de um conjunto de dados confiáveis que possam ser utilizados como referência.

Em conformidade com as métricas apresentadas no capítulo anterior, o uso de feições lineares permitem inferir sobre a qualidade dos dados de entrada (imagens) e das feições resultantes do processo de extração (estradas e/ou rodovias extraídas). Assim, é pertinente utilizar como dados de referência trechos de vias obtidos em campo.

A disponibilidade de alguns trechos de estradas e rodovias, coletados em campo, nas áreas de interesse e fornecidos por Teixeira (2016), viabilizaram o uso destes dados como referência para os procedimentos de avaliação.

No levantamento dos trechos viários em campo, foram utilizados receptores GNSS de dupla frequência. Após o processamento pelo método relativo cinemático, sendo a maior linha de base da ordem de 30 km, obteve-se uma precisão posicional planimétrica de 50 cm (TEXEIRA, 2016).

Conforme Norma da Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG) (DSG, 2016) e o que se tem observado na prática, para o controle de qualidade cartográfico se busca um dado de referência três (3) vezes mais acurado do que o produto a ser testado.

No caso de avaliar a qualidade posicional de imagens digitais, normalmente é realizada a comparação da precisão do levantamento com a resolução espacial da imagem. Assim, para avaliação de imagens RapidEye, com resolução espacial de 5 m, o dado de referência deve ter precisão de 1,67 m ( $5 \text{ m} / 3 \cong 1,67 \text{ m}$ ). Assim, os trechos viários levantados em campo e fornecidos por Teixeira (2016) com precisão de 0,5 m ( $< 1,67 \text{ m}$ ) atende ao propósito de comparação.

Para inferir sobre a qualidade posicional planimétrica das imagens RapidEye utilizadas no trabalho, o eixo médio dos trechos de estradas e rodovias coletados em campo foram tomados como referência, conforme ilustra Figura 11.

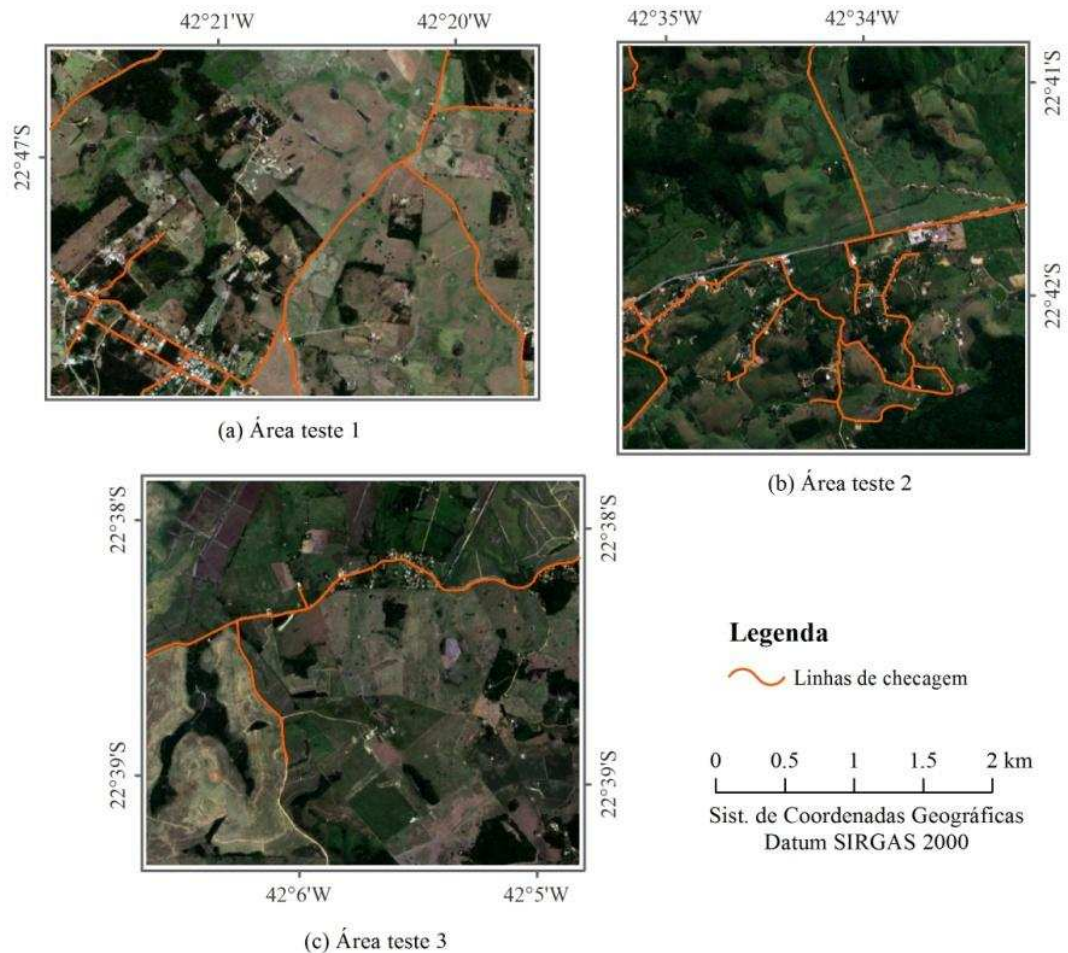


Figura 11 - Feições lineares utilizadas no processo de avaliação da acurácia posicional planimétrica das imagens RapidEye das áreas teste 1 (a), 2 (b) e 3(c).

Em passo seguinte, foi realizado o processo de monorestituição das retas correspondentes aos trechos de estradas e rodovias sobre as imagens. Um resumo do quantitativo de linhas utilizadas é apresentado na Tabela 4. De posse dos trechos de vias coletados em campo e seus homólogos nas imagens, foi possível aplicar o método do Buffer Duplo e se obteve amostras de discrepâncias posicionais para cada uma das áreas de trabalho. Estes processos foram realizados no software ArcGIS.

Tabela 4- Resumo dos trechos lineares utilizados na avaliação da acurácia posicional por área de estudo

Área de estudo	Quantidade de trechos (linhas) utilizados	Comprimentos (km)		
		Mínimo	Máximo	Total
Área 1	10	0,126	2,921	11,561
Área 2	16	0,079	2,577	14,672
Área 3	5	0,156	2,261	4,724

Para avaliação da acurácia posicional das imagens RapidEye, de acordo com as duas condições apresentadas no item 2.4.1, foram utilizados os valores de PEC e EP para a escala 1:25.000 (Tabela 5). Esta escala foi utilizada conforme especificações do produto (RAPIDEYE, 2015).

Tabela 5- Valores para PEC e EP na escala de 1:25.000.

Classe	Tolerância Planimétrica	
	PEC	EP
A	12,5 m	7,5 m
B	20 m	12,5 m
C	25 m	15 m

### 3.3.2 Métodos para extração semiautomática da malha viária em Imagens RapidEye

Para extração da malha viária das imagens RapidEye, a metodologia proposta neste trabalho agrega procedimentos de classificação baseada em objetos e operadores morfológicos, através de uma abordagem semiautomática. Os principais passos desenvolvidos são apresentados no fluxograma da Figura 12.

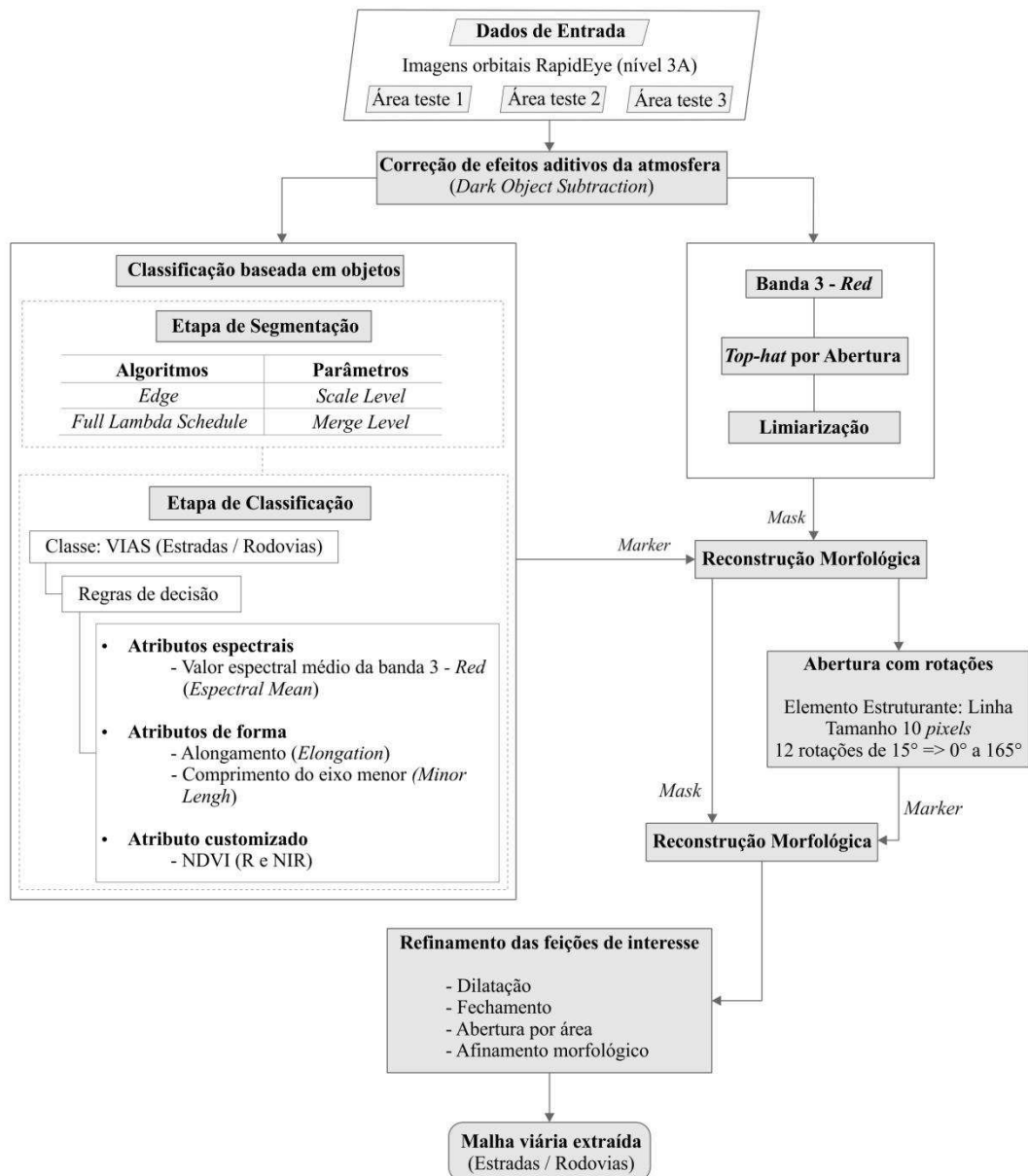


Figura 12 - Fluxograma das etapas envolvidas no processo de extração da malha viária das imagens RapidEye.

## **Passo 1:** Pré-processamento das imagens de entrada

De posse das imagens das áreas de interesse, em um primeiro momento foi realizada a correção dos efeitos aditivos da atmosfera pela técnica de subtração do pixel escuro - Dark Object Subtraction (DOS), de modo a minimizar os efeitos da atmosfera e contribuir para obtenção de melhores resultados no processo de classificação.

Conforme Jensen (2009), a matéria presente na atmosfera promove interferências que adicionam e subtraem energia ao que deveria ser registrado pelo sensor orbital, sendo de fundamental importância que estes efeitos sejam minimizados/eliminados. Antunes et al. (2014) afirmam que para a efetiva utilização das imagens RapidEye é necessária uma avaliação não só das características posicionais, mas também das características espectrais do sensor.

Tendo em vista que a correção atmosférica pela técnica de DOS é relativamente simples de ser aplicada, esta foi utilizada. Para tanto, a subtração do pixel escuro foi realizada através do software ENVI, tomando o valor mínimo no histograma de cada banda espectral das imagens.

## **Passo 2:** Classificação das feições de interesse por abordagem baseada em objetos

O processo de classificação das feições de interesse (estradas / rodovias) foi realizado no software ENVI, utilizando o módulo Feature Extraction baseado em regras (Rule Based).

Como etapa inicial deste processo, é realizada a obtenção dos objetos por meio de segmentação das imagens.

Para a segmentação das imagens foi usado o algoritmo Edge com nível de escala 40, o que implica em descartar 40% dos valores mais baixos da imagem gradiente, permitindo preservar somente as bordas mais bem definidas. Para o agrupamento (merge) dos objetos adjacentes similares, foi utilizado o algoritmo Full Lambda Schedule com parâmetro 80, considerando todas as cinco (5) bandas espectrais das imagens. A máscara utilizada foi de tamanho 5x5.

Os valores utilizados nos parâmetros de escala e merge, mencionados acima, foram definidos após realizar vários testes nas três imagens em estudo. Sendo

estes os que melhor possibilitaram individualizar os objetos de interesse nas três cenas.

Após a segmentação, foi realizado o processo de criação das regras de classificação por objetos.

A estratégia adotada foi definir regras que condicionassem a classificação somente das feições de interesse, em uma única classe e fluxo. Dessa forma, todos os outros alvos presentes nas imagens e que não se encaixassem nas regras e parâmetros estabelecidos para a classe de interesse, não seriam classificados.

Na construção das regras foram considerados os seguintes descritores (atributos) dos objetos:

- Média da banda do vermelho: atributo espectral correspondente ao valor médio dos números digitais dos pixels de um objeto para a banda em questão.
- Alongamento (Elongation): este atributo representa uma medida de forma que indica a razão entre os eixos maior e menor do objeto. Estes eixos são derivados de um retângulo envolvente orientado que contém o objeto;
- Comprimento do eixo menor (Minor Length): também representa uma medida de forma, obtida a partir do eixo menor de um retângulo orientado que contém o objeto; e
- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): inserido como atributo customizado, o índice de vegetação por diferença normalizada foi obtido a partir das bandas do vermelho e Infravermelho próximo (NIR).

Dentre os vários atributos possíveis de serem utilizados (mínimo, máximo, desvio padrão, textura média, entropia, área, perímetro etc), após testes realizados, foram utilizados somente aqueles supracitados (baseados em valores espectrais e de forma), uma vez que apresentaram melhor desempenho na classificação das vias.

Foi utilizada somente a banda do vermelho (banda 3) dentre as cinco bandas espectrais das imagens RapidEye, devido ao alto contraste dos alvos de interesse (estrada e rodovias não pavimentadas e pavimentadas) com relação à vizinhança nesta faixa espectral.

Para melhorar o processo de classificação dos objetos, foi também incorporado como atributo customizado o NDVI, obtido a partir das bandas do vermelho e infravermelho próximo. Este índice fornece uma condição interessante, pois apresenta valores muito baixos para áreas de solo exposto, entre aproximadamente 0 e 0.2 (Brasileiro et al., 2015), sendo este o tipo de cobertura predominante nas vias não pavimentadas.

Assim, a inclusão do NDVI nas regras condicionais do processo de classificação, permite filtrar a vegetação do processo de extração de feições e, ao mesmo tempo, manter os segmentos com características de vias não pavimentadas.

As regras para a classificação foram então estruturadas segundo os critérios de decisão, atributos selecionados, escolha de limiares e atribuição de peso entre as regras. Por meio da escolha de limiares (pela análise do histograma de frequência dos atributos), foi possível restringir o intervalo de valores de determinado atributo aos valores considerados como os mais adequados na identificação da feição desejada. A atribuição de pesos entre as regras possibilitou promover aquela que seja considerada mais eficiente em discriminar as feições de interesse.

Foi associada uma função de pertinência do tipo linear, com tolerância padrão de 5%, para todos os atributos que fazem parte das regras. Sendo ainda o peso entre atributos distribuídos igualmente.

Desse modo, foram construídas duas regras associadas a uma única classe denominada VIAS, que busca extrair os elementos lineares referentes à malha viária para todas as áreas teste (Figura 13).

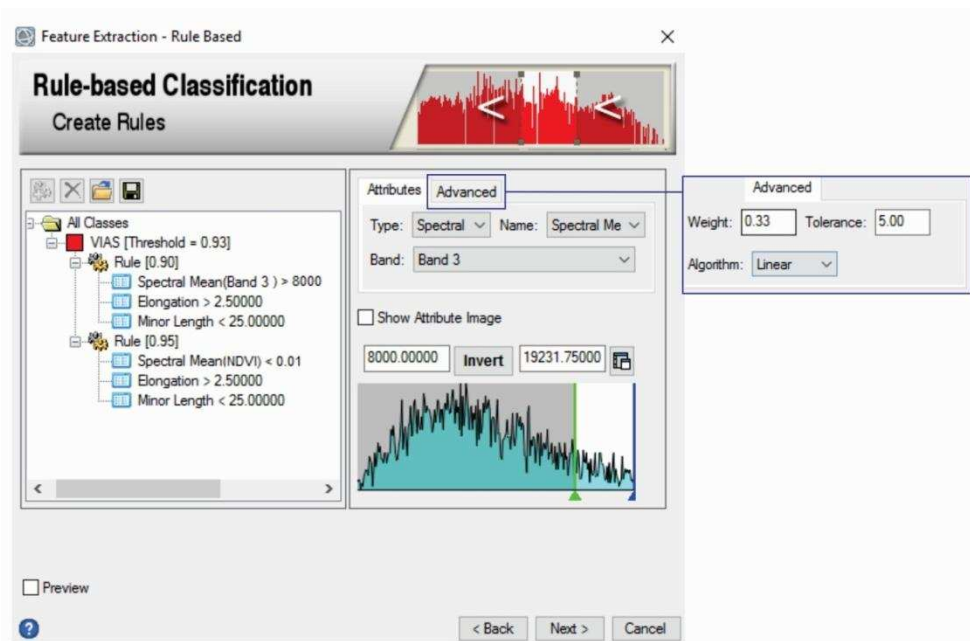


Figura 13 - Módulo do ENVI FX, ilustrando a regra de classificação da malha viária por objetos aplicada na área teste 1 e demonstrando a definição de limiar através do histograma de frequência e pesos.

Embora as regras preservem os mesmos atributos, foi necessário modificar os limiares de alguns desses a fim de se adequar as imagens das áreas em estudo (Tabela 6).

Tabela 6 - Critérios, atributos, respectivos limiares e pesos utilizados na regra de classificação para cada área de estudo.

	Atributos dos objetos			Área teste 1	Área teste 2	Área teste 3
	Descrição	Peso atrib.	Função / Tolerância			
<b>Regra 1</b> <b>Peso = 0,90</b>	Média espectral banda do vermelho	0,33	Linear /5,0 %	> 8000	> 4000	> 6500
	Alongamento			> 2,5		
	Comprimento do eixo menor			< 25		
<b>Regra 2</b> <b>Peso = 0,95</b>	Média NDVI	0,33		< 0,01	< 0,10	< 0,01
	Alongamento			> 2,5		
	Comprimento do eixo menor			< 25		

A partir das regras definidas, os objetos são analisados e classificados na classe de interesse segundo as condições impostas pelas regras de decisão.

### **Passo 3:** Reconstrução de segmentos ausentes da malha viária

Por meio do processo de classificação baseado nas regras definidas, foi possível delinear os trechos mais relevantes da malha viária presentes nas cenas em estudo.

No entanto, algumas feições de interesse não foram completamente extraídas e outras feições que não são de interesse (ruídos) foram detectadas. Isto, devido às próprias limitações impostas pelas imagens em estudo (por exemplo, a resolução espacial que não possibilita discriminar com clareza alguns trechos de vias).

Assim, foram introduzidas rotinas baseadas em operadores morfológicos que permitiram a obtenção de feições lineares de interesse não extraídas, além de soluções de pré-processamento, filtragem e posteriores refinamentos. Todas as rotinas foram desenvolvidas em ambiente do software MATLAB.

Para recuperar as feições de interesse "perdidas" na classificação foi feito uso da operação de reconstrução morfológica, que consiste em aplicar sucessivas dilatações sobre uma imagem marcadora até que esta se ajuste a uma segunda imagem máscara.

Como imagem marcadora (marker), foi utilizada a imagem binária produzida a partir dos resultados da classificação baseada em objetos, onde elementos pertencentes às vias são representados pelo valor um (1) e não classificados pelo valor zero (0) - elementos de fundo.

A imagem máscara (mask) é resultante das operações top-hat por abertura sobre a banda 3 e posterior limiarização. O operador top-hat por abertura foi utilizado inicialmente para realçar as vias, através do elemento estruturante máscara cheia de tamanho 3x3. Esta operação pode ser considerada como um filtro passa-alta, que além de possibilitar extrair as informações de alta frequência, realiza também uma suavização da imagem (MEDEIROS, 2003).

Na sequência, foi realizada a operação de limiarização sobre a imagem filtrada pelo operador top-hat por abertura, para separar as feições de interesse realçadas. Com auxílio do histograma da imagem filtrada, foi determinado o valor de corte (limiar) mais adequado.

É importante ressaltar, que o valor de corte foi determinado para cada cena em estudos das áreas teste, buscando se adequar a cada situação a fim de separar as informações de interesse.

#### **Passo 4:** Filtragem dos ruídos (excesso de segmentos)

A etapa anterior retorna uma imagem mais completa, composta por trechos viários extraídos pelo processo de classificação baseada em objetos e pela operação de top-hat por abertura seguida de limiarização. Aplicando a operação de reconstrução, muitos trechos representativos da malha viária que haviam sido perdidos durante o processo de classificação puderam ser recuperados.

No entanto, ruídos ainda permanecem em conjunto com as feições de interesse, muitos em função do valor de corte estabelecido na limiarização (que tem como base o valor de brilho para separar as informações) ou ainda ruídos da classificação errônea dos objetos.

Dessa forma, para se obter uma imagem com menos ruídos ao mesmo tempo em que se preservassem as feições lineares de interesse, foi utilizado o supremo da operação de abertura da imagem resultante da etapa anterior, com elemento estruturante do tipo linha em diferentes rotações (operação denominada neste trabalho como abertura com rotações).

Foram realizados vários testes a fim de se investigar a melhor solução para o tamanho do elemento estruturante e ângulo de rotação, de modo a preservar os elementos lineares e remover as estruturas indesejadas da imagem. É importante ressaltar que a escolha dos parâmetros mais adequados depende da presença de sinuosidades nas formas lineares e da quantidade de ruído na cena.

Assim, foi utilizado um elemento estruturante linha com tamanho de 10 pixels e ângulo de orientação incrementado a cada 15°, perfazendo ao todo 12 rotações. Foi possível rotacionar o elemento estruturante no intervalo de 0° a 165°, o que corresponde a cobrir todas as direções, tendo em vista o comportamento simétrico deste tipo de elemento.

Ao aplicar a operação de abertura com elemento estruturante linha em diferentes rotações, conseguiu-se eliminar muitos ruídos e preservar as feições lineares maiores que o elemento estruturante em pelo menos uma rotação.

Contudo, também foram eliminados muitos dos pequenos detalhes das feições de interesse, mas que puderam ser recuperados utilizando novamente a reconstrução morfológica, sendo os resultados dessa etapa (abertura com rotações) inseridos como a imagem marcadora e aqueles obtidos no passo anterior como a imagem máscara.

Com estas operações conseguiu-se uma imagem significativamente mais limpa contendo em sua maior parte as feições lineares de interesse.

#### **Passo 5:** Refinamento das feições de interesse e obtenção da malha viária

As feições extraídas, segundo os procedimentos descritos nos passos anteriores, são segmentos lineares na forma de polígonos que representam os trechos da malha viária.

Para obtenção das vias na forma de linhas simples, representativas dos eixos médios dos segmentos, em primeira instância foi necessário aplicar operações para conexão de pequenos trechos desconectados, eliminação de lacunas e objetos ainda presentes na cena que não fazem parte das vias.

Inicialmente, os pequenos trechos descontínuos foram conectados utilizando da operação de dilatação, sendo necessário iterar esta operação em duas das áreas teste (áreas 1 e 2), com diferente número de repetições em cada caso. Na sequência, as lacunas ou "buracos" foram eliminados com uso da operação de fechamento morfológico. A operação de abertura por área foi o passo seguinte, aplicado para remover os objetos menores que determinado número de pixels que não fazem parte das vias. Em todas essas operações foi utilizado elemento estruturante em forma de máscara cheia, de tamanho 3x3.

Para obtenção da malha viária na forma de linhas, foi aplicada a operação de afinamento morfológico até a convergência, ou seja, cada segmento de via passa a ser representado por uma linha simples, com largura de um único pixel. Assim, facilitando processos posteriores que requerem as vias extraídas na forma de linhas vetoriais, por exemplo, para elaboração de mapeamento.

### 3.3.3 Análise da qualidade do processo de extração da malha viária

Por fim, foi realizada a análise visual e quantitativa da qualidade da malha viária extraída.

Inicialmente, a partir de análise visual das vias extraídas sobrepostas com a imagem original, foram feitas inspeções pelo operador acerca de falhas, deslocamentos etc.

Posteriormente, através do software CARTOMORPH, foi possível quantificar, conforme as métricas descritas no item 2.4.2, e inferir sobre a qualidade dos resultados obtidos pelo método de extração proposto.

Para o processo comparativo através desse sistema, duas imagens (binárias) foram utilizadas (em cada área de estudo): a primeira correspondente à imagem de referência, tomada como verdade absoluta, e a segunda corresponde à imagem final do processo de extração de feições lineares a ser avaliada (imagem extraída).

A imagem tomada como referência foi produzida utilizando os trechos de estradas e rodovias coletados em campo (os mesmos empregados na etapa de avaliação da acurácia posicional), complementados por trechos obtidos manualmente pelo processo de vetorização em tela, a partir da interpretação visual das feições de interesse presentes nas imagens.

O procedimento de vetorização manual foi necessário para contemplar todas as estradas e rodovias presentes nas imagens das áreas teste ao nível de detalhes proporcionados pelas mesmas, visto que os trechos de vias provenientes do levantamento de campo não abrangem todo sistema viário destas.

O traçado das vias foi realizado no ambiente ArcGIS, fixando a escala de tela em 1:6.000, a fim de padronizar a interpretação dos alvos e obtenção dos vetores em termos de homogeneidade e detalhamento das linhas de referência. Cabe ressaltar que nesse processo, procurou-se delinear a região central das vias.

De posse das feições de referência em formato vetorial (Figura 14), estas foram convertidas para imagens binárias (imagens de referência) associando pixels de valor "um" as feições de interesse e o valor "zero" ao fundo das imagens.

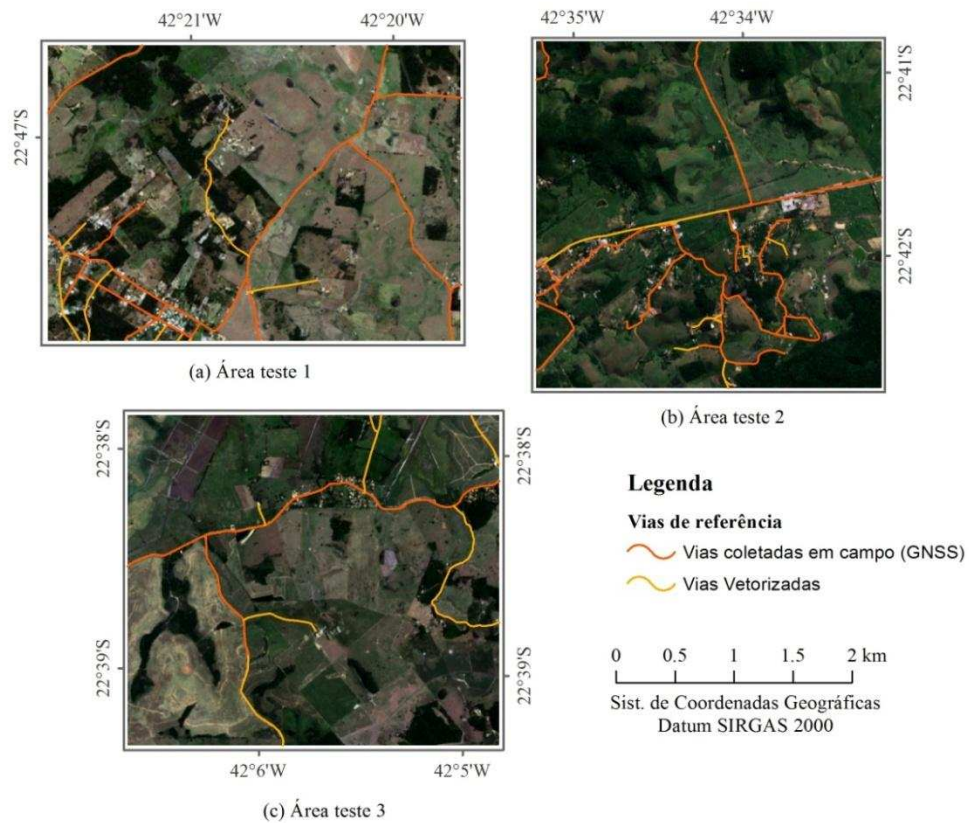


Figura 14 - Vias utilizadas na geração das imagens referência para análise da qualidade do processo de extração de feições das áreas teste 1 (a), 2 (b) e 3(c).

Foi considerado também para a análise de correspondência através do CARTOMORPH, um buffer de tolerância ao redor da malha viária nas imagens extraída e referência. Para tanto, foi utilizada a operação de dilatação com elemento estruturante cruz de tamanho 3x3, gerando um buffer de 1 pixel (em ambos lados da feição de interesse), que aproxima-se da largura média das vias, ou seja, 10 m em imagens RapidEye. Como retorno do sistema, obteve-se medidas estatísticas para as métricas consideradas: corretude, completude, qualidade e redundância.

A consideração do buffer de 1 pixel em ambos lados da malha viária, foi também influenciada pela qualidade posicional especificada para as imagens RapidEye (1:25.000) (RAPIDEYE, 2015). Pois, por exemplo, se utilizado um buffer de 3 pixels (15 m) ao redor da malha viária, ter-se-ia um valor fora da tolerância planimétrica do PEC para a escala 1:25.000, classe A, ou seja, 12,5 m ( $< 15$  m).

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio da metodologia desenvolvida para extração semiautomática da malha viária, as avaliações da imagem utilizada e do processo de extração. Simultaneamente, são feitas as devidas discussões dos resultados.

Inicialmente serão apresentados os resultados da avaliação da acurácia posicional de todas as imagens utilizadas e na sequência os resultados do processo de extração e a análise de qualidade por correspondência linear.

### **4.1 Resultados da avaliação da acurácia posicional planimétrica das imagens**

Como resultados da aplicação do método do Buffer Duplo para avaliação da acurácia posicional planimétrica das cenas RapidEye, são apresentados na Figura 15 os gráficos das discrepâncias posicionais e as estatísticas encontradas para cada uma das imagens das três áreas de teste.

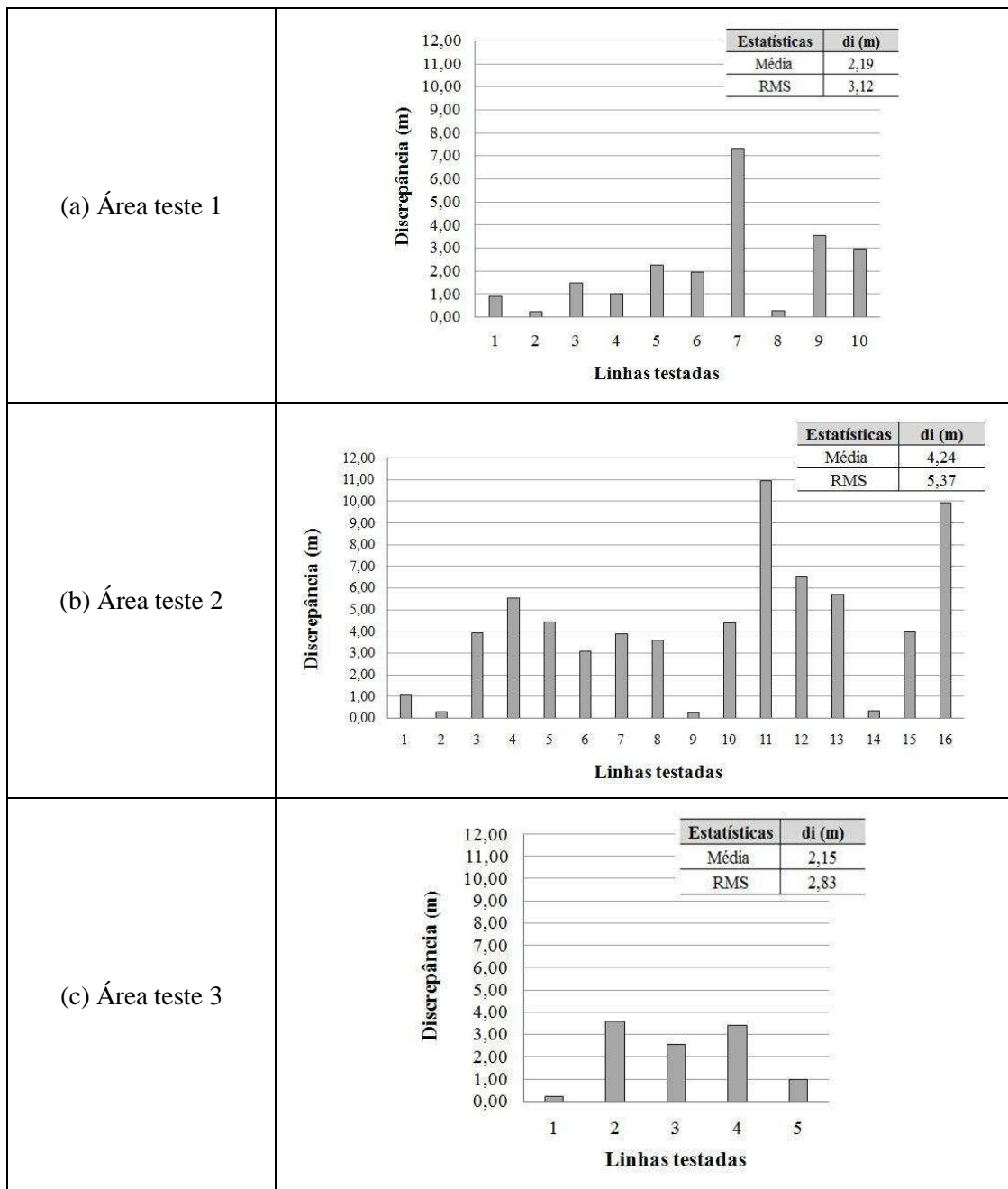


Figura 15 - Gráficos das discrepâncias e estatísticas encontradas utilizando o método de feições lineares Buffer Duplo para avaliação das imagens das áreas teste 1 (a), 2 (b) e 3(c).

As amostras de discrepâncias obtidas com o método do Buffer Duplo foram geradas utilizando como tamanho do buffer a tolerância do PEC para a Classe A e Escala 1:25.000.

Ao analisar a acurácia posicional das amostras de discrepâncias, todas as três imagens enquadraram-se na Classe A para a escala 1:25.000, visto que 90% das linhas testadas apresentaram discrepâncias menores que o valor do PEC (12,5 m) e o RMS das discrepâncias posicionais apresentaram valor menor que o EP (7,5 m).

É importante ressaltar, que para as áreas 1 e 2 havia disponibilidade de um maior número de linhas de referência e estas apresentavam boa distribuição espacial pelas cenas, garantido assim maior consistência na avaliação da acurácia posicional. Já para a área teste 3, as poucas vias (cinco) de referência disponíveis, que embora possibilitaram atender aos critérios de avaliação, não garantiram as condições ideais de avaliação da acurácia posicional utilizando feições lineares, pois a distribuição das linhas de referência é concentrada na região central da cena.

## **4.2 Resultados obtidos através do processo de extração da malha viária**

A partir da metodologia desenvolvida para a extração da malha viária, descrita no capítulo anterior, foi possível obter a malha viária das áreas de interesse.

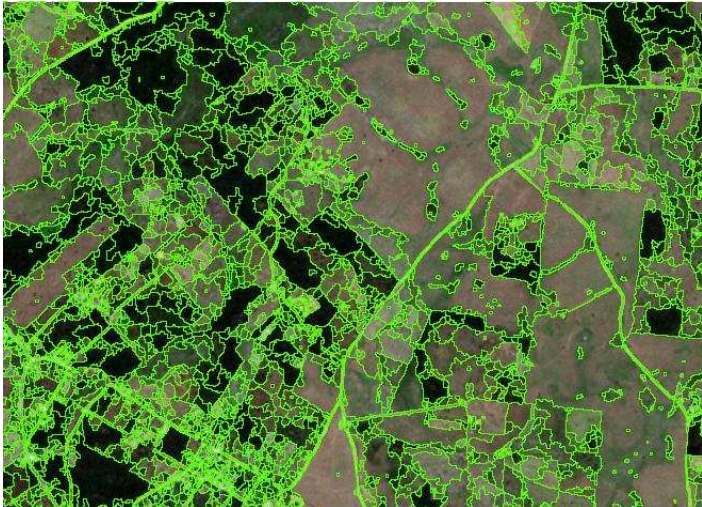


As imagens das áreas de estudo apresentam grande presença de vias não pavimentadas em áreas rurais, mas também de trechos (com e sem pavimento) atravessando localidades com características de extensão urbana ou aglomerado rural<sup>4</sup>, assim permitindo avaliar o processo de extração nesses ambientes.

Nas Tabelas 7, 8 e 9 são apresentadas a sequência dos passos mais relevantes e respectivos resultados, que expõem as principais etapas do processo de extração da malha viária das áreas teste 1, 2 e 3, respectivamente.

---

<sup>4</sup> Aglomerado rural é entendido como a localidade situada em área não definida legalmente como urbana e caracterizada por um conjunto de edificações permanentes e adjacentes, formando área continuamente construída, com arruamentos reconhecíveis ou dispostos ao longo de uma via de comunicação. Os aglomerados rurais classificam-se ainda em: aglomerados rurais de extensão urbana e aglomerados rurais isolados (IBGE, 2015).

Tabela 7 - Passos mais relevantes e respectivos resultados do processo de extração da malha viária para a área teste 1.

<p>Vetores resultantes da etapa de segmentação (em cor verde).</p> <p>Ao fundo imagem da área 1 na composição colorida RGB321.</p>	
<p>Feições lineares extraídas por meio da classificação baseada em objetos.</p> <p>Nota-se a existência de falhas, bem como feições classificadas erroneamente (falso-positivos) / ruídos.</p> <p>Setas brancas: exemplos de falhas existentes.</p> <p>Setas amarelas: exemplos de falso-positivos / ruídos.</p>	
<p>Imagem com feições lineares resultantes da operação de top-hat por abertura seguida de limiarização com valor de corte 900.</p> <p>Também se observa a presença de muitos ruídos (setas amarelas), mas boa detecção das feições lineares (setas brancas).</p>	

Continua...

Continuação da Tabela 7:

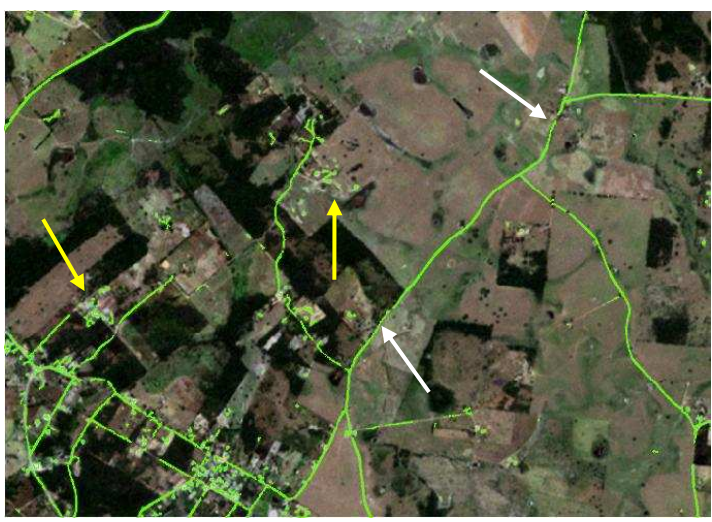
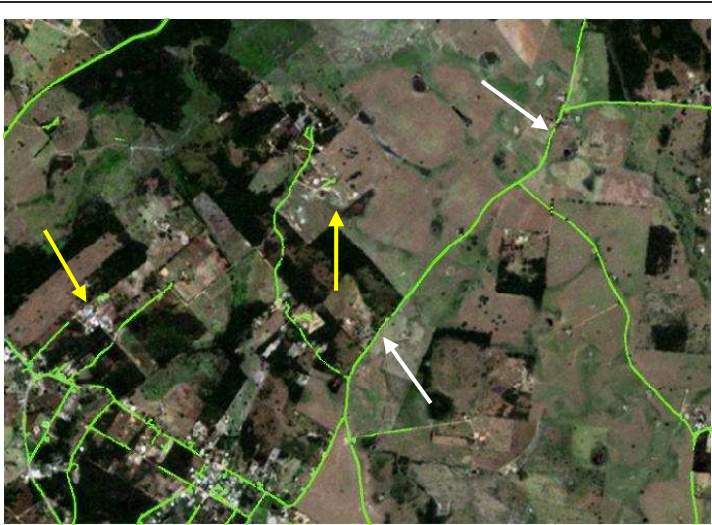
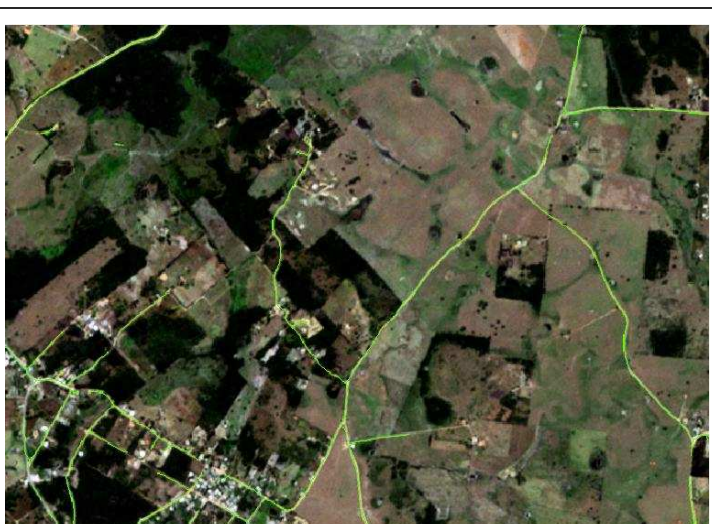
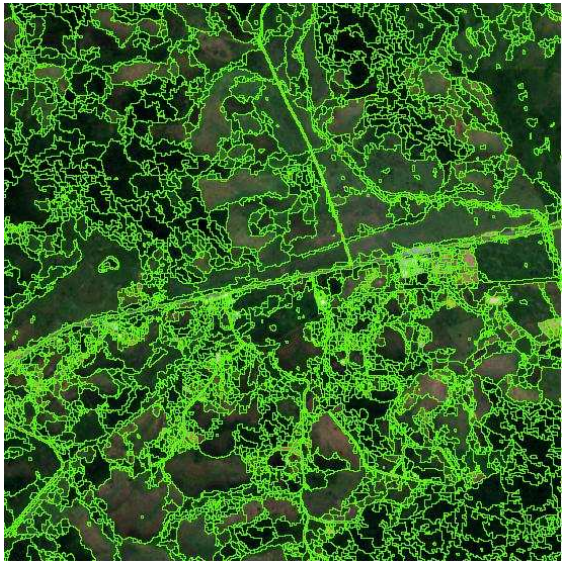
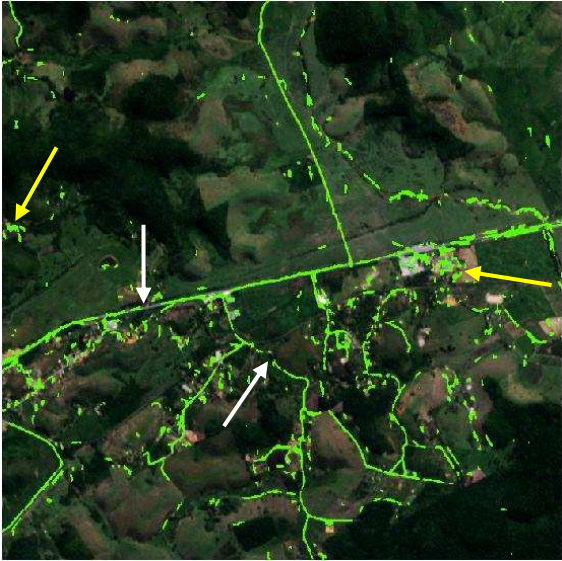
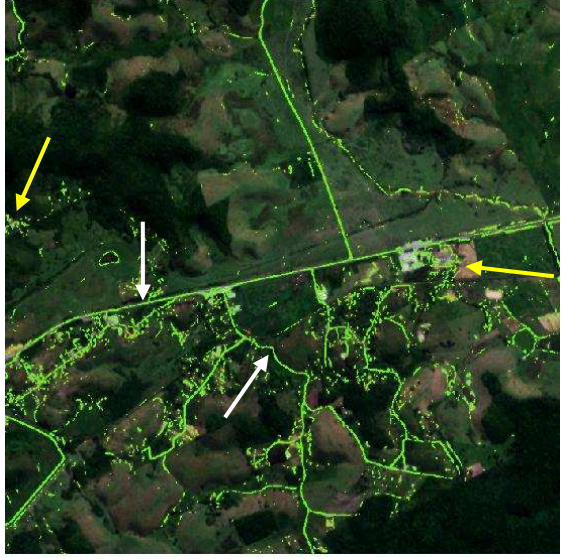
<p>Resultado da 1ª reconstrução morfológica, utilizada para recuperar as feições "perdidas" na classificação, além de eliminar alguns ruídos.</p> <p>Setas brancas: algumas falhas recuperadas.</p> <p>Setas amarelas: alguns ruídos eliminados.</p>	
<p>Resultado da 2ª reconstrução morfológica, onde foram eliminados alguns ruídos por meio da filtragem por abertura com rotações (indicados por setas amarelas) e recuperados pequenos detalhes da feição de interesse removidos neste processo (setas brancas).</p>	
<p>Malha viária extraída, após a seguinte sequência de operações de refinamento:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Dilatação com 3 iterações;</li><li>- Fechamento;</li><li>- Abertura por área (remoção de objetos menores que 10 pixels); e</li><li>- Afinamento morfológico até a convergência.</li></ul>	

Tabela 8 - Passos mais relevantes e respectivos resultados do processo de extração da malha viária para área teste 2.

<p>Etapa de segmentação, com resultados em cor verde.</p> <p>Ao fundo imagem da área 2 na composição colorida RGB321.</p>	
<p>Feições lineares extraídas através da classificação baseada em objetos.</p> <p>Da mesma forma que no caso anterior, também há algumas falhas e feições classificadas erroneamente (falso-positivos) / ruídos.</p> <p>Setas brancas: exemplos de falhas existentes.</p> <p>Setas amarelas: exemplos de falso-positivos / ruídos.</p>	
<p>Imagem com feições lineares resultantes da operação de top-hat por abertura seguida de limiarização com valor de corte 500.</p> <p>Também se observa a presença de muitos ruídos (setas amarelas), mas boa detecção das feições lineares (setas brancas).</p>	

Continua...

Continuação da Tabela 8:




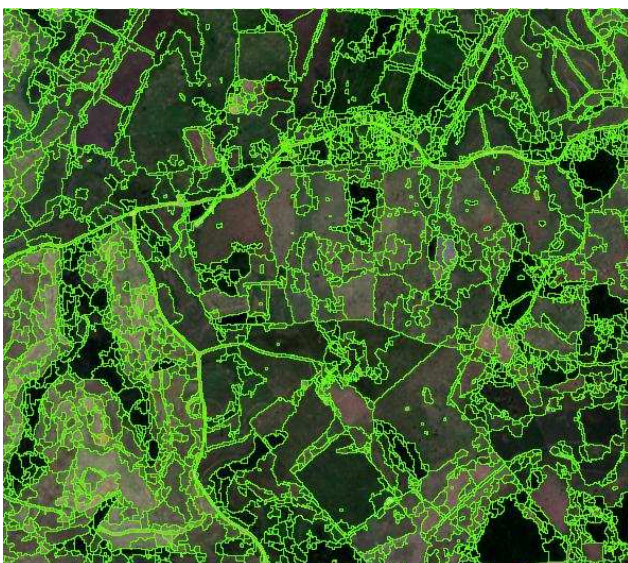
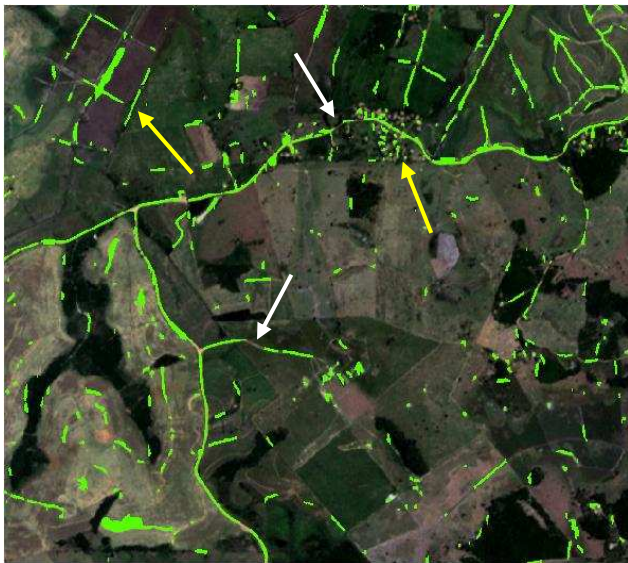
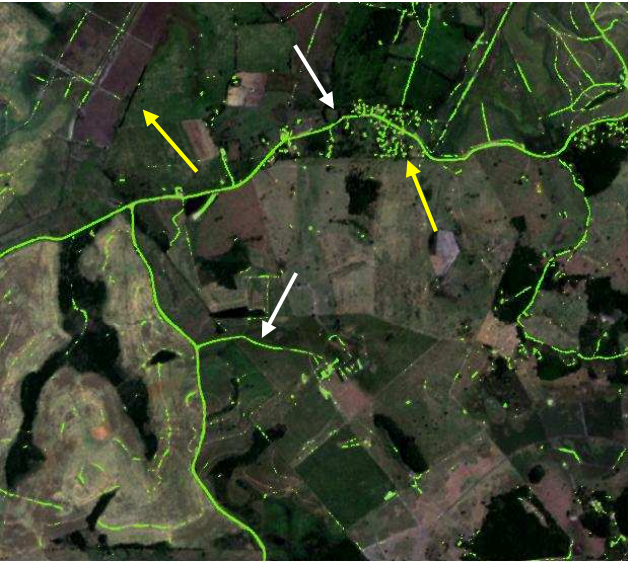
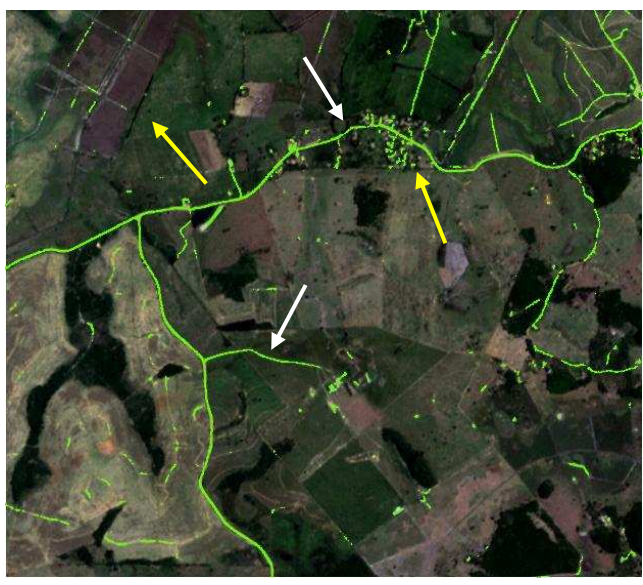
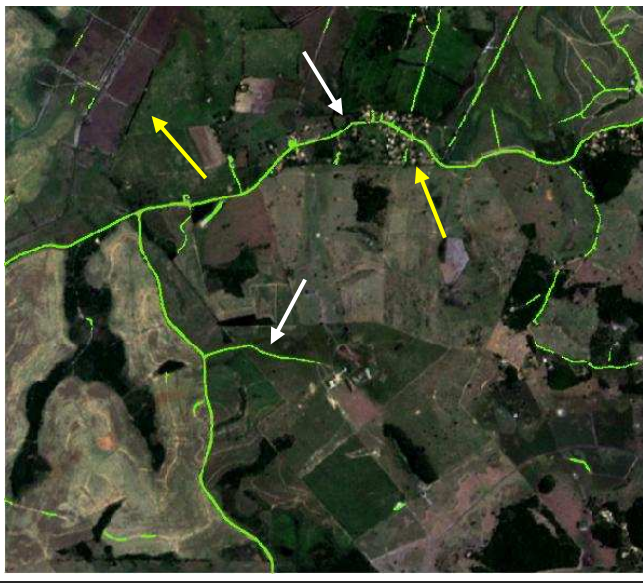

<p>Resultado da 1ª reconstrução morfológica, utilizada para recuperar as feições "perdidas" na classificação, além de eliminar alguns ruídos.</p> <p>Setas brancas: algumas falhas recuperadas.</p> <p>Setas amarelas: alguns ruídos eliminados.</p>	
<p>Resultado da 2ª reconstrução morfológica, onde foram eliminados alguns ruídos por meio da filtragem por abertura com rotações (indicados por setas amarelas) e recuperados pequenos detalhes da feição de interesse removidos neste processo (setas brancas).</p>	
<p>Malha viária extraída, após as seguintes operações de refinamento:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Dilatação com 2 iterações;</li><li>- Fechamento;</li><li>- Abertura por área (objetos menores que 100 pixels forma removidos); e</li><li>- Afinamento morfológico até a convergência.</li></ul>	

Tabela 9 - Passos mais relevantes e respectivos resultados do processo de extração da malha viária para área teste 3.

<p>Etapa de segmentação, com vetores resultantes, na cor verde, sobre a imagem da área teste3.</p>	
<p>Feições lineares extraídas através da classificação baseada em objetos.</p> <p>Neste caso, além das falhas na continuidade das feições de interesse, tem-se também maior quantidade de falso-positivos / ruídos em áreas agrícolas.</p> <p>Setas brancas: exemplos de falhas existentes na feição de interesse.</p> <p>Setas amarelas: exemplos de falso-positivos / ruídos.</p>	
<p>Imagem com feições lineares resultantes da operação de top-hat por abertura seguida de limiarização com valor de corte 1000.</p> <p>Também se observa a presença de muitos ruídos (setas amarelas), mas boa detecção das feições lineares (setas brancas).</p>	

Continua...

Continuação da Tabela 9:

<p>Resultado da 1ª reconstrução morfológica, utilizada para recuperar as feições "perdidas" na classificação, além de eliminar alguns ruídos.</p> <p>Setas brancas: algumas falhas recuperadas.</p> <p>Setas amarelas: alguns ruídos eliminados.</p>	
<p>Resultado da 2ª reconstrução morfológica, onde foram eliminados alguns ruídos por meio da filtragem por abertura com rotações (indicados por setas amarelas) e recuperados os pequenos detalhes da feição de interesse removidos no processo (setas brancas).</p>	
<p>Malha viária extraída, após as seguintes operações de refinamento:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Dilatação (sem iterações);</li><li>- Fechamento;</li><li>- Abertura por área (objetos menores que 100 pixels foram removidos); e</li><li>- Afinamento morfológico até a convergência.</li></ul>	

Conforme pode ser observado, os parâmetros utilizados na segmentação das imagens proporcionaram uma boa delimitação das feições de interesse e objetos mais homogêneos. Entretanto, nas áreas com características de aglomerados rurais tiveram-se dificuldades em particionar as regiões, isto devido à confusão espectral dos alvos nesse ambiente e a própria resolução das imagens que não permitem distinguir com nitidez os mesmos (Figura 16).

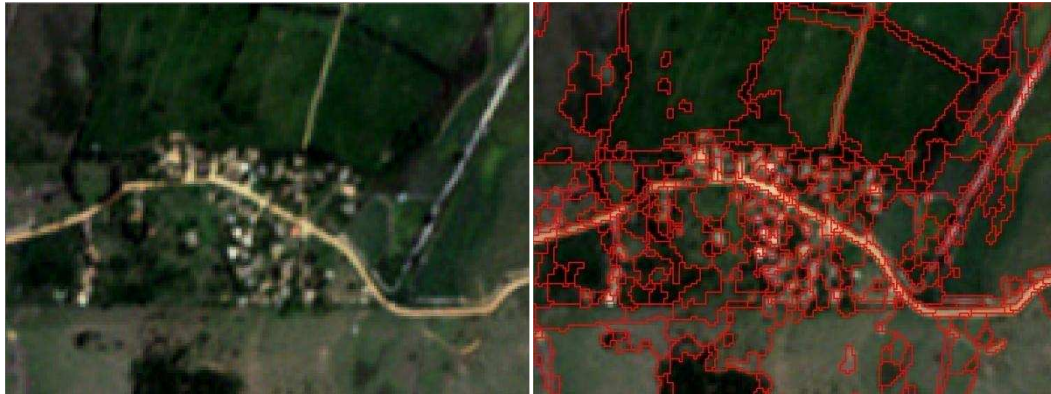


Figura 16 - Imagem parcial da área 3 com presença de aglomerado rural e respectiva segmentação (em vermelho), exemplificando as dificuldades em delinear os objetos nesse meio em imagens de média resolução.


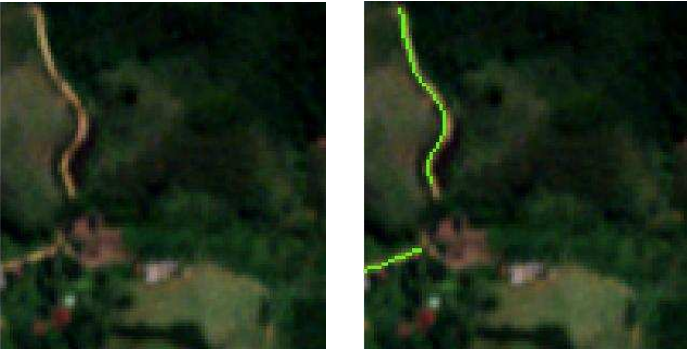

Por meio da classificação baseada em objetos, foi possível extrair trechos da malha viária presentes nas imagens, porém houve falhas e objetos classificados erroneamente (falso-positivos). Contudo, considerando as características das cenas em estudo, onde os objetos de interesse são muito fragmentados e ocorre confusão espectral entre os alvos, ainda assim, através do procedimento de classificação se conseguiu delinear os alvos de interesse satisfatoriamente.

As regras condicionantes criadas para a classificação e os atributos associados foram determinantes para delinear as vias de interesse. Nesse sentido, destaca-se o atributo customizado NDVI (obtido das bandas vermelho e NIR), que a partir das características deste índice propiciaram filtrar as áreas de vegetação do processo de extração das vias, mesmo nas cenas que apresentavam menor presença de cobertura vegetal (áreas 1 e 3), visto a sensibilidade deste índice de vegetação.

A inserção de operadores da morfologia matemática foi de fundamental importância, possibilitando recuperar as feições de interesse "perdidas" no processo de classificação por objetos, além de fornecer soluções para filtragem dos ruídos da classificação e refinamento da malha viária.

Uma desvantagem do método de extração proposto é a sensibilidade às obstruções totais ou parciais que ocorrem nas vias, como por exemplo, a existência de árvores e sombras. Nestes casos não se conseguiu extrair as feições de interesse (Tabela 10).

Tabela 10 - Exemplos de obstruções totais ou parciais nas cenas em estudo que limitaram o processo de extração das feições de interesse (em verde as vias extraídas).

<p><b>Área 1</b></p> <p>Obstrução parcial por vegetação à margem da via.</p>	
<p><b>Área 2</b></p> <p>Obstrução total por árvores sobre a via.</p>	
<p><b>Área 3</b></p> <p>Obstrução parcial por vegetação densa à margem da via.</p>	

De modo geral, aplicando a metodologia proposta às diferentes situações, obteve-se a uma malha viária extraída significativa, mesmo diante das dificuldades já mencionadas.

No entanto, ressalta-se que o processo de extração desenvolvido se adequa melhor às áreas rurais para as imagens trabalhadas, e que sua aplicação é condicionada aos parâmetros definidos pelo operador.

Os resultados mais significativos obtidos em áreas rurais são decorrentes da própria resolução espacial das imagens utilizadas, sendo nesse meio, onde as vias apresentam maior contraste com as feições adjacentes, e conseqüentemente as bordas são melhores detectadas.

Para áreas urbanas, de expansão urbana e/ou aglomerados rurais, onde ocorre grande confusão espectral entre os alvos, é necessário aprimorar os procedimentos apresentados neste trabalho. Por exemplo, inserindo outras técnicas de PDI e/ou dados auxiliares no processo de extração.

#### **4.2.1 Avaliação da qualidade por correspondência linear**

Para avaliação dos resultados obtidos através do processo de extração, foram utilizadas as métricas de correspondência linear, mencionadas no item 2.4.2, por meio do software CARTOMORPH.

As duas imagens de entrada fornecidas ao sistema, que contêm as feições lineares da malha viária extraída e de referência, são ilustradas na Figura 17. Na Tabela 11 são apresentadas as métricas e respectivos resultados obtidos da análise de qualidade do processo de extração.

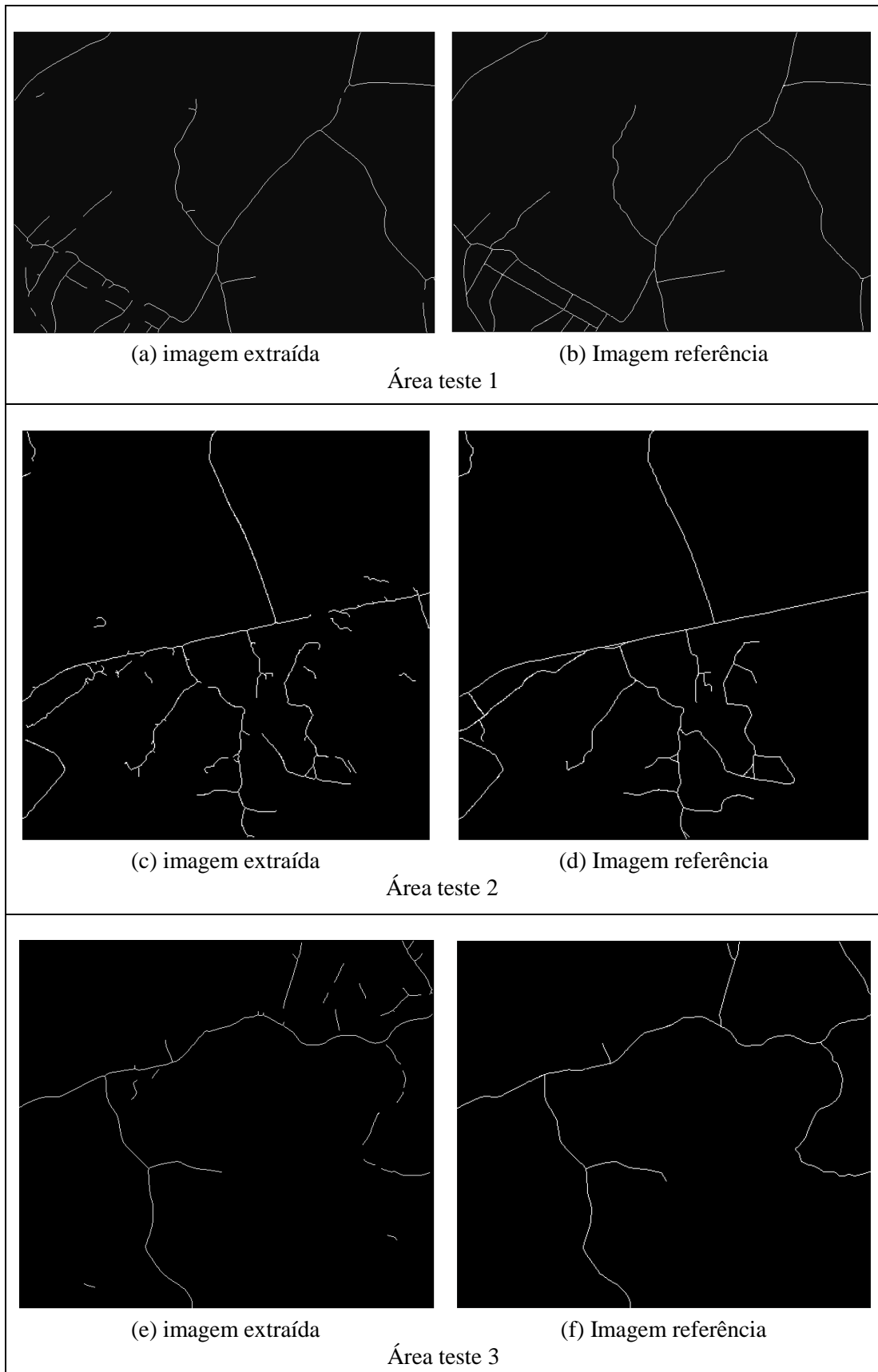


Figura 17 - Imagens de entrada para análise da correspondência linear no software CARTOMORPH. À direita as imagens com as feições lineares extraídas e à esquerda as imagens correspondentes de referência para cada área teste.

Tabela 11 - Métricas resultantes da análise comparativa entre a malha viária extraída e de referência por meio do software CARTOMORPH para cada área teste.

Áreas teste	Métricas (tamanho do buffer: 1 pixel = 5 m) (%)			
	Corretude	Compleitude	Qualidade	Redundância
1	92,23	85,15	79,40	- 0,45
2	79,16	81,06	66,74	- 0,62
3	82,05	92,22	76,68	- 1,06

A análise quantitativa dos resultados da extração, mostra que para a área teste 1 o valor alcançado para a completude foi em torno de 85% e corretude 92%, o que significa dizer que, 85% da malha viária foi extraída com sucesso, enquanto 92% foi extraída corretamente.

Da mesma forma para a área teste 2, por meio do método proposto 81,06% da malha viária foi extraída, sendo 79,16% das feições de interesse extraídas corretamente.

Já para a área teste 3, obteve-se 92,22% da malha viária extraída, onde 82,05% das vias foram extraídas corretamente.

Os valores da métrica qualidade evidenciam que os resultados obtidos no processo de extração foram mais satisfatórios para as áreas 1 e 3 (79,40% e 76,68%, respectivamente), pois apresentaram a maior concordância entre a malha viária extraída e a referência. Para a área 2, obteve-se que 66,74% das vias extraídas apresentaram concordância com as de referência.

Os resultados do processo de extração para as três áreas em estudo apresentaram valores baixos de redundância, os quais se aproximaram do valor ótimo de 0% para essa métrica. Embora, para todas as três situações o valor negativo indica que ocorreu redundância na correspondência de pixels extraídos na comparação da imagem referência.

Verifica-se que no processo de extração ocorreram algumas falhas, como trecho das vias não extraídas e excessos (falsos positivos e falsos negativos). A primeira, em função de obstáculos nas vias, sombras ou pouco contraste das feições de interesse nas imagens (como demonstra os valores estatísticos de completude). Já para o segundo caso, as vias extraídas em excesso são decorrentes dos alvos com resposta espectral similar as feições de interesse e que não puderam ser separados

pelo método proposto (estas situações são evidenciadas através dos valores de corretude).

Em um contexto geral, os valores estatísticos obtidos para as métricas de qualidade (utilizando como área de tolerância um (1) pixel ao redor das feições de interesse para a análise de correspondência linear), demonstram que os resultados obtidos no processo de extração da malha viária proposto foram satisfatórios.

No trabalho de Mayer et al. (2006), onde diferentes processos automatizados de extração de vias foram avaliados segundo métricas da correspondência linear e utilizando um buffer de tolerância similar ao empregado nesta pesquisa, os autores mencionam que os resultados de um processo de extração de vias começam a ter potencial para aplicações práticas quando os valores das métricas corretude e completude são superiores a 0,75 (75%) e 0,60 (60%), respectivamente.

Estes autores, ainda mencionam que o valor superior para a métrica corretude, pode ser explicado devido à maior dificuldade que se tem em melhorar, através de edição manual, as feições defeituosas resultantes de um processo de extração do que adquirir as vias a partir do zero.

Dessa forma, fazendo um paralelo entre os valores obtidos para as métricas corretude e completude através do processo de extração das vias desenvolvido nesse trabalho, com os valores sugeridos por Mayer et al. (2006), tem-se que a malha viária extraída em todas as três áreas estudadas são potencialmente úteis para aplicações práticas.

Cabe ressaltar ainda, que por meio da metodologia proposta foi possível extrair uma malha viária mista, ou seja, tanto vias pavimentadas quanto não pavimentadas foram extraídas das imagens RapidEye das áreas de estudo.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

De modo geral, com uso da abordagem proposta obteve-se êxito ao extrair a malha viária das imagens RapidEye, embora sejam reconhecidas as dificuldades encontradas e as possibilidades de melhorias.

As métricas empregadas, com uso de feições lineares, permitiram aferir sobre a qualidade posicional planimétrica das imagens RapidEye utilizadas, bem como da malha viária extraída pelo método proposto. No primeiro caso, por meio dos resultados obtidos da aplicação do método do Buffer Duplo, as imagens das três áreas de estudo foram classificadas, quanto ao Decreto-lei nº 89.817, como Classe A, escala 1:25.000.

Quanto a análise da qualidade do processo de extração da malha viária, os resultados alcançados foram, em termos das métricas de correspondência linear corretude e completude os valores de 92,23 % e 85,15 % para a área 1, os valores de 79,16% e 81,06% na área 2, e os valores de 82,05% e 92,22% para a área 3, respectivamente.

O desempenho observado ao aplicar o método proposto nas áreas testes, indica que a ferramenta pode ser muito útil como auxílio ao processo de extração de malha viária em imagens digitais, em especial para as vias não pavimentadas em áreas rurais (ambiente onde se verificou melhor detecção das feições de interesse).

É relevante ressaltar, que o uso dos resultados produzidos através da metodologia apresentada, para fins de compor ou atualizar uma base de dados cartográfica, ainda demandam tarefa de pós-edição manual da malha viária, como por exemplo, conversão para o formato vetorial, procedimentos de generalização cartográfica, verificação topológica e edição de atributos, necessárias para se adequar as feições viárias extraídas à base cartográfica de interesse.

Uma das principais dificuldades encontradas no processo de extração das vias pelo método proposto foi à busca por parâmetros e limiares para os atributos que fazem parte das regras de classificação. Salienta-se, que isto é decorrente, em parte, das limitações impostas pelas imagens utilizadas como insumo, visto as dificuldades que se tem em definir com clareza os alvos nessas imagens.

Vale destacar que o uso de operadores morfológicos foi de fundamental importância, pois possibilitaram recuperar os trechos de vias "perdidos" no processo

de classificação por objetos, além de fornecer soluções para filtragem dos ruídos da classificação e refinamento da malha viária.

A aplicabilidade da metodologia apresentada em processos que possam vir a atender grandes demandas de produção é condicionada à intervenção e conhecimento do operador, bem como à qualidade das imagens utilizadas e aos tipos de alvos presentes na cena.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugerem-se:

- i. Aplicar a metodologia proposta em imagens de outros sensores remotos e de diferentes resoluções;
- ii. Aprimorar a classificação baseada em objetos, com inserção de regras mais robustas e utilizar outras plataformas, tais como, eCognition, InterIMAGE etc;
- iii. Utilizar dados auxiliares e de outras fontes, que possam contribuir na extração das informações ou mesmo contornar limitações do método proposto. Como por exemplo, dados altimétricos, que parecem ser uma boa alternativa para contornar obstruções das vias por árvores e sombras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMINI, J.; SARADJIAN M. R.; BLAIS, J. A. R.; LUCAS, C.; AZIZI, A. Automatic road-side extraction from large scale imagemaps. **International journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, n. 4, p. 95-107. 2002

ANTUNES, M. A. H.; DEBIASI, P.; SIQUEIRA, J. C. S. Avaliação espectral e geométrica de imagens RapidEye e seu potencial para o mapeamento e monitoramento agrícola e ambiental. **Revista Brasileira de Cartografia**, nº 66/1, p. 101-109, 2014.

ARIZA, F. J. L..**Calidad En La Producción Cartográfica**. RA-MA, Madrid. 2002.

ATKINSON, A. D. J.; ARIZA, F. J. L. "Nuevo Enfoque Para El Análisis de La Calidad Posicional en Cartográfica Mediante Estudios Basados en La Geometría Lineal." In: **XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica**. Santander, Spain. 2002.

BACHER, U; MAYER, H. Automatic Road Extraction from Multispectral High Resolution Satellite Images. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Vienna. **Proceedings**, vol. 36, part. 3, p. 29 - 34, 2005.

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

BAUMGARTNER, A.; STEGER, C.; MAYER, H.; ECKSTEIN, W.; EBNER, H. Automatic Road Extraction in Rural Areas. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences** - Vol. XXXII , pp. 107-112, 1999.

BENTABET L.; JODOUIN S.; ZIOU D.; VAILANCOURT J. Road vectors update using SAR imagery: a snake-based method. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol 41, n. 8, p. 1785 -1803. 2003.

BLASCHKE, T.; STROBL, J. What´s wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. **GIS-Zeitschriftfür Geoinformations syteme**, n. 6, p. 12 - 17, 2001.

BLASCHKE, T.; GLÄSSER, C.; LANG, S. Processamento de Imagens num Ambiente Integrado SIG / Sensoriamento Remoto - Tendências e Consequências. In: BLASCHKE, T.; KUX, H. J. H. (Org.). **Sensoriamento remoto e SIG avançados - novos sistemas sensores: métodos inovadores**. São Paulo: Oficina de Textos, 2ª ed., 303 p., 2007.

BLASCHKE, T.; LANG, S.; HAY, G. J. (Eds). **Object-Based Image Analysis: Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications**. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 817 p, 2008.

BLASCHKE, T. Object based image analysis for remote sensing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, n. 65, p. 02 -16, 2010.

BLASCHKE, T.; HAY, G.J.; KELLY, M.; LANG, S.; HOFMANN, P.; ADDINK, E.; FEITOSA, R. Q.; van der MEER, F.; van der WERFF, H.; van COILLIE, F.; TIEDE, D.. Geographic Object-Based Image Analysis - Towards a new paradigm. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, n. 87, pp. 180–191, 2014.

BRASIL. **Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984.** Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 20 de jun. 1984.

BRASILEIRO, R.; ALMEIDA, P. M. M.; CRUZ, C. B. M. Avaliação do ajustamento geométrico e espectral de dados Rapideye e Landsat 8, visando a integração de dados multisensores. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 17, João Pessoa - PB.** Anais online. p. 2997 - 3004, 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0599.pdf>>. Acesso em: 15 Out. de 2015.

BRAZ, N. G. S.; MIURA, K. A. Utilização de Morfologia Matemática para extração de malha viária em imagens orbitais. In: **Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia (XXVI CBC), 2014.** Gramado - RS, p. 1 - 7, 2014.

CARDIM, G. P.; SILVA, E. A. Development of an algorithm to analyze cartographic features extraction methods in digital images. In: **35th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISPRS35), 35, Beijing, China.** p. 1755-1315, 2013. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/17/1/012219>>. Acesso em: 20 Jun. 2016.

CARDIM, G. P.; SILVA, E. A.; DIAS, M. A. Algorithm Development for Analysis of Statistical Accuracy of the Extraction of Cartographic Features in Digital Images. **Transactions on Machine Learning and Artificial Intelligence**, vol. 2, n. 2, p. 32-47, 2014.

CENTENO, J. A. S.; ANTUNES, A. F. B.; TREVIZAN, S.; CORREA, F. Mapeamento de áreas permeáveis usando uma metodologia orientada a regiões e imagens de alta resolução. **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 55, n. 1, p. 48-56, 2003.

CONCAR - COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA. **Especificação Técnica para a Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-EDGV).** Versão 2.1.3. Ed. DSG - Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. Brasília - DF, 2010.

CORREIA, J. D.; CRUZ, C. B. M.; MENEZES, P. M. L.; MARINI, S. S.; BARROS, R. S. Contribuição das imagens CBERS na Atualização do Mapeamento Sistemático Brasileiro na escala 1:100.000. In: **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005.** Goiânia - GO, p. 873 - 880, 2005.

COSTA, G. A. O. P.; PINHO, C. M. D.; FEITOSA, R. Q.; ALMEIDA, C. M.; KUX, H. J. H.; FONSECA, L. M. G.; OLIVEIRA, D. INTERIMAGE: uma plataforma cognitiva Open Source para a interpretação automática de imagens digitais. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro - RJ, n. 60 (4), p. 331-337, 2008.

DAL POZ, A. P.; AGOURIS, E. Extração Semi-Automática de Rodovias Usando Programação Dinâmica. In: **Anais do II Workshop Brasileiro de Geoinformática (GEOINFO), São Paulo - SP, 2000.**

DAL POZ, A. P.; ZANIN, R. B.; DO VALE, G. M. Extração Automática de Feições Rodoviárias em Imagens Digitais. **Revista de Controle & Automação**, v. 18, n. 1, p. 44-54, 2007.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Terminologias Rodoviárias Usualmente Utilizadas.** Diretoria de Planejamento e Pesquisa - Coordenação Geral de Planejamento e Programação de Investimentos. Brasília, 2007.

DSG - DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO BRASILEIRO. **Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geospaciais Vetoriais (ET-ADGV)**. Versão 2.1.3. Brasília - DF, 2011.

DSG - DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO BRASILEIRO. **Norma da Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geospaciais (ET-CQDG)**. 1ª Edição. Brasília - DF, 2016.

ENVI FX. Exelis Visual Information Solution, Boulder, Colorado, US. 2016. Disponível em: <<http://www.harrisgeospatial.com/docs/>> Acesso em maio de 2016.

FACON, J. **Morfologia Matemática: Teorias e Aplicações**. Curitiba: Editora Universitária Champagnat da Pontifícia Universidade Católica do Paraná. 1996. 320p.

FELIX, I. M.; KAZMIERCZAK, M. L.; ESPINDOLA, G. M. RapidEye: a nova geração de satélites de Observação da Terra. In: **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, RN, Brasil, p. 7619-7622, 2009.

FISHER, R.; SIMON. P.; WALKER A.; WOLFART, E. **Hypermedia Image Processing Reference (HIPR2)**. 2003. Disponível em: <[http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/hipr\\_top.htm](http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/hipr_top.htm)>. Acesso em: 25 Ago. 2016.

FRIGATO, R.; SILVA, E. A. Mathematical Morphology Application to Features Extraction in Digital Images. **Pecora 17 - The Future of Land Imaging...Going Operational**. Denver, Colorado, November, 2008.

GALLIS, R. B. de A. **Extração semi-automática da malha viária em imagens aéreas digitais de áreas rurais utilizando otimização por programação dinâmica no espaço objeto**. 169 p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – UNESP. Presidente Prudente, 2006.

GATO, H. E. R.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G. Uma Abordagem semi-automática para extração de feições cartográficas, **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, RJ, n. 53, p. 16-28, 2001.

GALO, M.; DAL POZ, A. P.; FERREIRA, F. M. O uso de feições no controle de qualidade em cartografia. **XIX Congresso Brasileiro de Cartografia**, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. 2001.

GOMES J., VELHO L. **Computação Gráfica: Imagem**. Série de Computação e Matemática. IMPA/SBM, Rio de Janeiro, 424p, 1994

GOODCHILD, M. F. “Foreword.” In: Principles of Modeling Uncertainties in Spatial Data and Spatial Analyses. CRC Press, 2010.

GRUEN, A.; LI, H. Road extraction from aerial and satellite images by dynamic programming. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 50, no. 4, p. 11-20, 1995.

HAY, G. J.; CASTILLA, G.. Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA): A new name for a new discipline. In: BLASCHKE, T.; LANG, S.; HAY, G. (eds.). **Object-Based Image Analysis - Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications**. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 817 p., 2008.

HENEGHAN, C.; FLYNN, J.; O'KEEFE, M.; CAHILL, M. Characterization of changes in blood vessel width and tortuosity in retinopathy of prematurity using image analysis. **Medical Image Analysis**, vol. 6, n.4, p. 407–429, 2002.

HEIPKE, C; MAYER, H.; WIEDEMANN, C.; JAMET, O. Evaluation of Automatic Road Extraction. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, 47–56. 1997.

HINZ, S.; BAUMGARTNER, A. Road extraction in urban areas supported by context objects. In: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing. Amsterdam. **Proceedings**, vol. 33, p. 405 - 412, 2000.

HOFMANN, P. Detecting informal settlements from Ikonos image data using methods of object oriented image analysis - an example from Cape Town (South Africa). In: Jürgens, C. (editor): **Remote Sensing of Urban Areas / Fernerkundung in Urbanen Räumen (Regensburger Geographische Schriften, Heft 35)**. Regensburg, Germany, p. 41-42. 2001.

IBGE - FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Glossário dos termos genéricos dos nomes geográficos utilizados no mapeamento sistemático do Brasil: base cartográfica contínua do Brasil na escala 1:250 000 - BC250**. Vol.2. Coordenação de Cartografia - IBGE, Rio de Janeiro- RJ, 2015.

ISHIKAWA, A. S.; SILVA, E. A.; NÓBREGA, R. A. A. Extração de Rodovias em Imagens Digitais de Alta Resolução com o uso da Teoria de Morfologia Matemática. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, RJ, n. 63/01, p. 131-140, 2010.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604 p.

JIN, H.; LI, Z.; FENG, Y. Enhancing digital road map with lane details extracted from large-scale stereo aerial imagery using object-oriented image analysis. In: **Proceedings of Surveying and Spatial Sciences**. Institute Biennial, Adelaide, Australia, 2009.

JIN, H.; MISKA, M.; CHUNG, E.; LI, M.; FENG, Y. Road Feature Extraction from High Resolution Aerial Images Upon Rural Regions Based on Multi-Resolution Image Analysis and Gabor Filters. **Remote Sensing - Advanced Techniques and Platforms**. Ed.: Dr. Boris Escalante, InTech. p. 387 - 414. 2014.

JIN, X.; S. PASWATERS. A fuzzy rule base system for object-based feature extraction and classification. In.: **Proceedings of SPIE: Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XVI**, vol. 6.567, p. 6567 - 65671. 2007.

KEPLER, AMS. **RapidEye Info**. 2011. Disponível em: < <http://www.amskepler.com/rapideye-info/> >. Acesso em: 20 de out. 2015.

LIU, B.; WU, H.; WANG, Y.; LIU, W. Main Road Extraction from ZY-3 Grayscale Imagery Based on Directional Mathematical Morphology and VGI Prior Knowledge in Urban Areas. **PLoS ONE**, vol. 10, n. 9, 2015: e0138071. doi:10.1371/journal.pone.0138071.

MACHADO e SILVA, A. J. F.; EDUARDO, B. F. S.; FAZAN, A. J. Avaliação da Qualidade Geométrica das Imagens RapidEye Ortoretificadas. In: **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, p. 1213 a 1220, 2013.

MAIA, J. L.; DAL POZ, A. P. Metodologia para Avaliação de Rodovias Extraídas Computacionalmente em Imagens Digitais. **Pesquisas em Geociências**, vol. 31, n. 1, p. 29 - 38, 2004.

MAYER, H.; HINZ, S.; BACHER, U.; BALTSAVIAS, E. A test of automatic road extraction approaches. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, vol. 36, part. 3, p. 209 - 214, 2006.

MEDEIROS, N. G. **Segmentação morfológica aplicada a cartografia**. 131 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" – UNESP. Presidente Prudente, 2003.

MOHAMMADZADEH, A.; TAVAKOLI, A.; ZOEJ, M. J. V. Road extraction based on fuzzy logic and mathematical morphology from pan-sharpened IKONOS images. **The Photogrammetric Record**, vol. 21, n. 113, p. 44–60. 2006.

NEVES, S. R. **Algoritmos para Segmentação de Imagens Infravermelhas**. 121 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica). COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil. 2003.

NOBREGA, R. A. A. **Deteção da malha viária na periferia urbana de São Paulo utilizando imagens de alta resolução espacial e classificação orientada a objetos**. 166 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2007.

PERKAL, J. **On the Length of Empirical Curves**. Michigan Inter-University Community of Mathematical Geographers, n. 10, p. 17 - 20, 1966.

PINHO, C. M. D. **Análise orientada a objetos de imagens de satélite de alta resolução espacial aplicada à classificação de cobertura do solo no espaço intra-urbano: o caso de São José dos Campos - SP**. 181 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), INPE, São José dos Campos, 2005.

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

RAPIDEYE. **Satellite Imagery Product Specifications**. Disponível em: <[blackbridge.com/rapideye/](http://blackbridge.com/rapideye/)>. Acesso em: 20 de out. 2015.

SANTOS, A. P. **Avaliação da Acurácia Posicional em Dados Espaciais com o uso de Estatística Espacial**. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Informações Espaciais). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 2010.

SANTOS, A. P. **Controle de Qualidade Cartográfica: Metodologias para Avaliação da Acurácia Posicional em Dados Espaciais**. 172 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Informações Espaciais). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 2015.

SANTOS, A. P.; MEDEIROS, N. G.; SANTOS, G. R.; RODRIGUES, D. D. Controle de Qualidade Posicional em Dados Espaciais Utilizando Feições Lineares. **Boletim de Ciências Geodésicas**. v. 21, n. 2, p. 233-250, 2015.

SARATH, T; NAGALAKSHMI, G. An Land Cover Fuzzy Logic Classification By Maximumlikelihood. In.: **International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT)**, vol.13, n. 2, p. 56 - 60, 2014.

- SERRA, J. **Image analysis and mathematical morphology**. London: Academic Press, 1982.610 p.
- SILVA, C. R. **Extração de Estradas Vicinais em Imagens Digitais e dados Laser Scanner usando abordagens automática e semi-automática**. 139 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas.) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 2008.
- SILVA, E. A.; LEONARDI, F. Extração de alvos cartográficos a partir do uso de técnicas de Morfologia Matemática. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, RJ, n. 61/02, p. 189-198, 2009.
- SILVA, E. A.; RODRIGUES, T. G.; LEONARDI, F. Morfologia matemática na detecção de feições cartográficas. **Revista Engenharia Civil - UM**. Braga, Portugal, n. 37, p. 37-46, 2010.
- SOILLE, P. **Morphological Image Analysis: Principles and Applications**. 2. ed. Berlin: Springer, 2003. 392 p.
- TAUBENBÖCK, H.; ESCH, T.; WURM, M.; DECH, S. Object-based feature extraction using high spatial resolution satellite data of urban areas. **Journal of Spatial Science**, v. 55, n. 1, p. 117-132. 2010.
- TEIXEIRA, A. J. A. **Construção de um índice de Interpretabilidade para Imagens orbitais: o caso da Bacia hidrográfica do rio São João**. 340 p. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.
- TONG, X.; SUN T.; FAN, J.; GOODCHILD, M. F.; SHI, W. A Statistical Simulation Model for Positional Error of Line Features in Geographic Information Systems (GIS). **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. Vol. 21 (0), p. 136 - 148, 2013. Disponível em: <doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2012.08.004>>. Acesso em: 15 Jun. 2016.
- TVEITE, H.; LANGAAS, S. An Accuracy Assessment Method for Geographical Line Data Sets Based on Buffering. **International Journal of Geographical Information Science**, vol. 13 (1). Taylor & Francis Group: p. 27–47, 1999.
- WALTER. V. Object-based classification of remote sensing data for change detection. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 58, p. 225 - 238, 2004.
- WANG, L.; QIN, Q.; DU, S.; CHEN, D.; TAO, J. Road Extraction from Remote Sensing Image Based on Multi-resolution Analysis. In: 31st. International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE), 2005, Saint Petersburg, Russian. **Proceedings**. Saint Petersburg, 2005.
- WANG, W.; YANG, N.; ZHANG, Y.; WANG, F.; CAO, T., EKLUND, P. A review of road extraction from remote sensing images. In. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, Vol. 3, n. 3, p. 271 - 282, 2016.
- WIEDEMANN, C., HEIPKE, C., MAYER, H., JAMET, O. Empirical evaluation of automatically extracted road axes. In: BOWYER, K.J., PHILLIPS, P. J. (Eds.), **Empirical Evaluation Methods in Computer Vision**. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos - California , p. 172–187. 1998.
- WIEDEMANN, C. External evaluation of road networks. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.34, part 3/W8, p. 93-98, 2003.

ZHANG, C., MURAI, S., BALTSAVIAS, E. P.. Road network detection by mathematical morphology. In: **Proc. ISPRS Workshop on 3D Geospatial Data Production: Meeting Application Requirements**, Paris, France, p. 185–200. 1999.