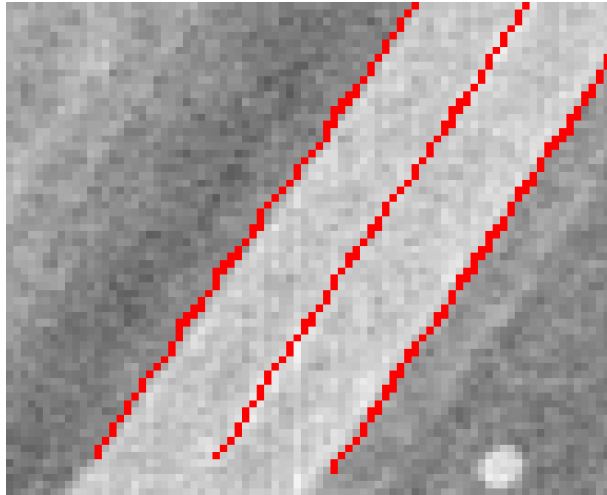


**UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO**



**Extracção Automática de Estradas a
Partir de Imagens Aéreas para Uso em
Sistemas de Informação Geográfica**

Henrique José Monteiro Oliveira
(Licenciado)

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Sistemas de Informação Geográfica

Orientador Científico: Prof. Doutor João Afonso Ramalho Sopas Pereira Bento

Constituição do Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Afonso Ramalho Sopas Pereira Bento

Vogais: Prof. Doutor Aurélio Joaquim de Castro Campilho

Prof. Doutor João Luís Gustavo de Matos

Novembro de 2000

Resumo

Nesta dissertação, apresenta-se um método para a extracção automática de objectos lineares (estradas), a partir de imagens aéreas digitais ortorectificadas de alta resolução, através do uso de técnicas de processamento digital de imagem e de visão por computador.

O método proposto tem duas fases distintas:

- a obtenção de contornos da imagem por meio de filtros lineares, com o correspondente emagrecimento à largura de um *pixel*, precedido de um agrupamento em listas de regiões conexas;
- a classificação dos contornos conexas obtidos em margens de um troço de estrada com o recurso a um reconhecedor estatístico, baseado na análise de um conjunto de propriedades geométricas e radiométricas do modelo de estrada, precedida do cálculo dos pontos correspondentes ao respectivo eixo da via.

Apresenta-se a construção teórica do método e os resultados experimentais em termos de desempenho computacional— tempos de execução típicos— e de análise dos objectos extraídos— confirmação dos resultados com imagens clássicas, robustez do processo em função de interrupções da estrada e de outros eventos espaciais.

Abstract

In this dissertation, a method is developed for the automatic extraction of linear objects (roads), from high resolution digital aerial imagery, with the use of digital image processing and computer vision techniques.

The proposed method has two distinct phases:

- the acquisition of edges in the image by linear filters, with the corresponding thinning to the width of one pixel, followed by grouping in lists of connected regions;
- the sorting of the connected contours of margins of a chunk of road through statistical pattern recognition, based in the analysis of a set of geometric and radiometric properties of the road model, followed by the calculation of the corresponding points of the respective axis of the road.

It is presented the theoretical construction of the method and the experimental results in terms of computational performance — typical times of execution — and the analysis of the extracted features — confirmation of the results with classical images, robustness of the process in function of occlusions of the road and other space events.



Palavras Chave

- Extracção de estradas a partir de imagens
- Objectos lineares em imagens
- Imagens aéreas digitais
- Extracção de propriedades
- Reconhecimento de padrões
- Sistemas de Informação Geográfica

Keywords

- Road extraction from images
- Linear objects in images
- Aerial digital imagery
- Feature extraction
- Pattern recognition
- Geographic Information Systems

Agradecimentos

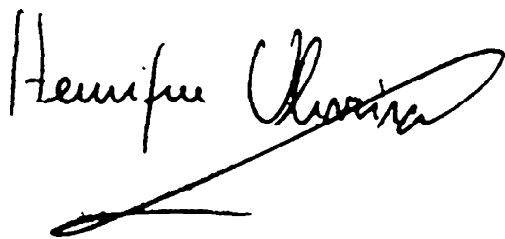
Ao Professor Catedrático João Pereira Bento do Instituto Superior Técnico, pela sua disponibilidade na orientação desta dissertação.

Ao Professor Adjunto José Caeiro da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja pela ajuda prestimosa que me concedeu, tanto a nível teórico como prático, durante todo o período da realização deste documento.

Ao Professor Adjunto Luis Miguel Tavares da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja pelas suas sugestões.

Ao Bacharel José Francisco Matos Parreira da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja pela disponibilidade e tempo gasto na instalação e manutenção de todo o *hardware* e *software* utilizado na realização do trabalho descrito nesta dissertação.

À minha mulher, pela compreensão e pelo apoio que me concedeu no decurso do trabalho, que absorveu grande parte da atenção que lhe era devida.

A handwritten signature in black ink, reading "Henrique Caeiro". The signature is written in a cursive style with a long, sweeping underline that extends to the left.



Conteúdo

Resumo	i
Abstract	iii
Palavras Chave	v
Keywords	v
Agradecimentos	vii
Conteúdo	ix
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Lista de Símbolos	xvii
1. Introdução	1
1.1. Objecto do Estudo	4
1.2. Trabalho Desenvolvido	5
1.3. Estrutura do Documento	6
2. Extracção de Objectos para Sistemas de Informação Geográfica	9
2.1. Sistemas de Informação Geográfica	11
2.2. Dados em Sistemas de Informação Geográfica	17
2.3. Extracção de Objectos Lineares	20
3. Detecção de Objectos Lineares a Partir de Imagens Aéreas	23
3.1. Visão por Computador e Processamento Digital de Imagem	25
3.2. Imagens Aéreas como Fonte de Dados para um SIG	27
3.3. Detecção de Estradas a partir de Imagens Aéreas	29
3.3.1. Extracção Automática a Partir de Imagens de Alta Resolução	31
3.3.2. Extracção Automática a Partir de Imagens de Baixa Resolução	36
3.3.3. Extracção Multi-Resolução	39
4. Extracção das Margens e do Eixo de Via das Estradas	43
4.1. Detecção Automática de Estradas	46
4.2. Características das Estradas	47
4.3. O Sistema de Reconhecimento de Estradas	57

4.4. Detecção de Pontos de Contorno para a Extração das Margens de uma Estrada	60
4.4.1. Detecção de Contornos por Meio de Filtros Lineares	60
4.4.2. Emagrecimento dos Contornos	66
4.5. Agrupamento dos Pontos de Contorno Emagrecidos	69
4.6. A Classificação de Contornos Conexos como Margens de uma Estrada . .	73
4.6.1. Caso Unidimensional de Classificação de Elementos Conexos . . .	76
4.6.2. Caso Multidimensional de Classificação de Elementos Conexos . .	78
4.7. Determinação do Eixo da Via	86
5. Resultados Experimentais	89
5.1. Características dos Conjuntos de Teste	91
5.2. Parâmetros do Método de Extração Automática	93
5.3. Resultados Obtidos	95
5.4. Análise dos Resultados Obtidos	120
6. Conclusões	127
A. Filtro Derivada da Gaussiana	131
A.1. Cálculo da Área de Influência do Filtro	132
A.2. Convolução	134
A.2.1. Caso Contínuo	134
A.2.2. Caso Discreto	136
B. Resultados Experimentais Adicionais	137
C. Ferramentas Utilizadas	151
Bibliografia	153

Lista de Figuras

1.1.	Diagrama de um processo de revisão de dados de um sistema de informação geográfica.	4
2.1.	Diagrama de funções de um sistema típico de informação geográfica. . . .	14
2.2.	Erros na representação de dados vectoriais adquiridos com recurso a uma mesa digitalizadora.	15
2.3.	Diagrama que ilustra uma classificação do processo de extracção de objectos a partir de imagens aéreas.	20
3.1.	Principais métodos de extracção de objectos lineares a partir de imagens aéreas de alta resolução.	32
3.2.	Principais métodos de extracção de objectos lineares a partir de imagens aéreas digitais de baixa resolução.	36
3.3.	Processo de detecção de estradas a partir de imagens digitais SPOT de baixa resolução.	38
3.4.	O diagrama da figura ilustra o processo de integração dos dados provenientes de imagens aéreas digitais de alta e baixa resolução.	40
3.5.	Processo de integração dos resultados obtidos a partir de imagens aéreas digitais de alta e baixa resolução, e respectivas condicionantes.	41
4.1.	Elementos geométricos que compõem a directriz de uma estrada.	48
4.2.	Exemplo de uma zona de cruzamento.	50
4.3.	Exemplo de uma zona de sombra parcial, que impossibilita a aquisição de alguns dados sobre os objectos da imagem aérea.	51
4.4.	Exemplo de uma zona de sombra total, que impossibilita a aquisição total de dados sobre os objectos da imagem aérea.	52
4.5.	Elementos existentes numa imagem aérea que modificam a tonalidade uniforme de um troço de estrada.	53
4.6.	Exemplo de zonas na imagem que apresentam um brilho semelhante ao das zonas da mesma que representam estradas.	54
4.7.	Zona rural	55
4.8.	Zona urbana	56

4.9. Diagrama de blocos que representa o método para a extracção automática de estradas proposto nesta dissertação.	58
4.10. Relação de perpendicularidade entre a direcção do gradiente e a direcção do contorno.	61
4.11. Variação do valor da função de imagem segundo a direcção do gradiente.	61
4.12. Imagem de uma estrada visível.	62
4.13. Varrimento horizontal da imagem.	63
4.14. Imagem de resultados.	65
4.15. Distribuição dos <i>pixel</i> referentes ao algoritmo de emagrecimento de linhas em referência.	68
4.16. Imagem de resultados.	70
4.17. <i>Pixel</i> adjacentes a um <i>pixel</i>	71
4.18. Diagrama de blocos que ilustra a estrutura do reconhecedor de padrões utilizado nesta dissertação.	74
4.19. Modelo probabilístico da classificação das características.	75
4.20. Descritização do bloco Classificador	83
4.21. Algoritmo para o cálculo da distância entre dois componentes conexos.	84
4.22. Faixas de pontos no interior da região definida por dois componentes conexos.	85
4.23. Cálculo dos pontos correspondentes ao eixo de via.	87
5.1. Imagem global relativa aos dados de entrada utilizados neste documento.	92
5.2. Imagem sobre a qual foi aplicada a metodologia descrita neste documento.	94
5.3. Imagem que representa o valor da componente do gradiente.	96
5.4. Imagem que representa o módulo da amplitude do gradiente.	97
5.5. Imagem binária.	98
5.6. Imagem de contornos	99
5.7. Imagem de Componentes Conexos	101
5.8. Representação final dos contornos obtidos e do eixo de via.	102
5.9. Imagem de um troço rectilíneo de uma estrada do tipo B	103
5.10. Imagem de um troço curvo de uma estrada do tipo B	104
5.11. Imagem de um troço misto (parte rectilíneo e parte curvo) de estrada do tipo B	105
5.12. Imagem de um troço rectilíneo de uma estrada do tipo A	106
5.13. Imagem de um troço misto (parte rectilíneo e parte curvo) de uma estrada do tipo A , com a presença de uma zona da imagem que apresenta um nível de intensidade semelhante ao do objecto a detectar, e um contorno paralelo.	107
5.14. Imagem de dois troços de estradas de diferentes larguras.	108
5.15. Gráficos definidores das regiões de decisão.	111
5.16. Região de decisão do classificador de cinzentos.	114
5.17. Imagem que revela a presença de veículos na faixa de rodagem.	115

5.18. Imagem de uma sombra parcial.	116
5.19. Imagem de uma sombra total.	117
5.20. Imagem de uma zona de cruzamento.	118
5.21. Imagem de uma zona de entroncamento.	119
5.22. Imagem de um troço misto (parte rectilíneo e parte curvo) de uma estrada do tipo B	121
5.23. Digitalização manual de um troço de estrada misto.	123
5.24. Digitalização manual de dois troços de estrada de diferentes larguras.	124
5.25. Detalhe das margens e do eixo de via de um troço de estrada, obtidos pela metodologia descrita neste documento.	125
A.1. Simetria da derivada parcial da função de Gauss.	132
A.2. Primeira derivada da função de Gauss <i>versus</i> função de Gauss.	133
A.3. Representação da razão $A(w, \sigma)/A_t = 95\%$ com as funções $A(w, \sigma)/A_t$	135
B.1. Imagem de um troço curvo de uma estrada do tipo B	138
B.2. Imagem de um troço rectilíneo de uma estrada do tipo B	139
B.3. Imagem de um troço misto (parte rectilíneo e parte curvo) de uma estrada do tipo B	140
B.4. Imagem de um troço misto (parte rectilíneo e parte curvo) de uma estrada do tipo B	141
B.5. Imagem de dois troços de estradas de diferentes larguras.	142
B.6. Imagem de um troço rectilíneo de uma estrada do tipo A	143
B.7. Imagem de um troço rectilíneo de uma estrada do tipo A	144
B.8. Imagem de dois troços de estradas de diferentes larguras.	145
B.9. Imagem de um troço rectilíneo de uma estrada do tipo B	146
B.10. Imagem de um troço misto (parte rectilíneo e parte curvo) de uma estrada do tipo A	147
B.11. Imagem de um troço rectilíneo de uma estrada do tipo A	148
B.12. Imagem de uma sombra parcial.	149



Lista de Tabelas

3.1. Tabela que identifica alguns dos métodos de extracção de estradas publicados nos últimos anos.	30
5.1. Características da imagem correspondente à Figura 5.1.	93
5.2. Tabela de resultados, com média e variância.	109
5.3. Tabelas de resultados obtidos com base nas características geométricas do modelo.	110
5.4. Tabela de resultados obtidos com base na característica radiométrica do modelo.	114



Lista de Símbolos

Símbolos	Significado
\in	pertença a um conjunto
$A \subseteq B$	A é um subconjunto de B
\mathbb{R}	conjunto dos números reais
$f(i, j)$	função que representa a imagem (coordenadas discretas)
$f(x, y)$	função que representa a imagem (coordenadas contínuas)
(OX, OY)	referencial ortonormado
∇	operador de gradiente
$*$	operador de convolução
\mathcal{C}	conjunto de classes de pertença



Não existe nenhuma linguagem mais universal e mais simples, mais isenta de erros e de obscuridades [...] mais válida para expressar as relações invariáveis dos elementos da natureza [do que a matemática]. Interpreta [qualquer fenómeno] através da mesma linguagem, como se confirmasse a unidade e a simplicidade do plano do universo e tornasse ainda mais evidente essa ordem invariável que preside a todas as causas da natureza.

Joseph Fourier, *Teoria Analítica do Calor*, 1982

1

Introdução

Conteúdo

1.1. Objecto do Estudo	4
1.2. Trabalho Desenvolvido	5
1.3. Estrutura do Documento	6

1. INTRODUÇÃO

Nas áreas da aeronáutica, da fotografia e da computação, assiste-se a um desenvolvimento tecnológico e científico muito rápido, desde o fim da década de cinquenta. Novos meios de aquisição e manipulação de dados de objectos, áreas ou fenómenos terrestres decorrem deste rápido desenvolvimento.

O aparecimento dos **Sistemas de Informação Geográfica (SIG)**¹ nos anos sessenta (DeMers 1997)², possibilita a integração de uma forma «arrumada» e precisa dos diferentes níveis de **dados multisectoriais**³ georeferenciados. Estes sistemas facilitam a procura de relações entre dados georeferenciados de origens diversas. As análises temáticas com base em SIG originam investigação científica, devotada à pesquisa de ferramentas computacionais que as executem eficazmente.

Os sistemas de informação geográfica englobam um conjunto de ferramentas para o armazenamento e o processamento de dados georeferenciados, e produzem cartografia temática que exprime visualmente o resultado das análises espaciais realizadas.

Os **dados** são um dos factores que determinam o sucesso no uso de um sistema de informação geográfica, e uma característica importante a ter em conta é a sua **qualidade**, (Aronoff 1995). Este autor refere um conjunto de nove componentes que constituem as características de qualidade dos dados integrados num SIG, identificando-se ainda os custos da sua aquisição, que estão relacionados com a qualidade dos mesmos.

O elevado aumento do volume dos dados armazenados e manipulados é uma tendência dos actuais sistemas de informação geográfica. Constata-se a dificuldade em manter: a qualidade dos dados; o desempenho eficaz das análises espaciais e o *hardware* associado.

A exactidão da posição e dos atributos dos dados, a sua consistência lógica, a integridade e o historial dos dados, só são possíveis através de uma revisão regular da base de dados dos sistemas de informação geográfica (English, Heipke, Reinhart, e Ebner 1996). Deste modo, o aumento das tarefas de revisão dos dados de um sistema de informação geográfica está directamente ligado ao aumento do volume da sua base de dados.

Esta dissertação, baseia-se num modelo de aquisição de dados para a actualização de sistemas de informação geográfica, com base em imagens obtidas por sistemas de detecção remota. Estes sistemas são cada vez mais utilizados como fonte de dados para um SIG (DeMers 1997) e (Davis 1996), produzindo imagens aéreas ou espaciais que cobrem com qualidade grandes áreas geográficas.

¹A nomenclatura inglesa é de uso corrente nesta área e, sobretudo, a utilização da sigla **GIS**—acrónimo do conjunto de palavras inglesas *Geographical Information Systems*.

²O espaço temporal indicado deve ser interpretado em termos da existência das tecnologias informáticas.

³O autor refere **dados multisectoriais**, como dados provenientes das mais diversas áreas do saber, nomeadamente da medicina, da agricultura, do ambiente, da economia, entre outras.

1.1. Objecto do Estudo

A revisão regular da base de dados de um sistema de informação geográfica é importante para a manutenção da qualidade dos dados ⁴ (English, Heipke, Reinhart, e Ebner 1996). Esta revisão é um tema estudado por investigadores e empresas. A **Laser-Scan** ⁵ é um exemplo de uma empresa que se dedica ao desenvolvimento de estratégias para a revisão de bases de dados geográficas de grande dimensão. O seu mercado decorre da tendência de aumento do volume de dados a tratar pelos sistemas de informação geográfica. A Figura 1.1 apresenta um diagrama de um processo de revisão dos dados de um SIG.

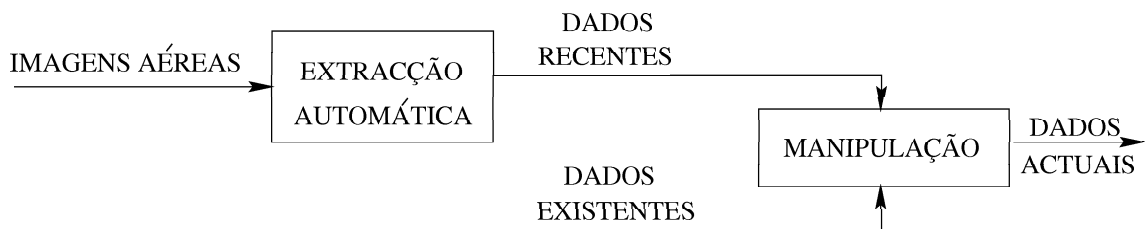


Figura 1.1.: O diagrama da figura esquematiza o processo de revisão dos dados de um sistema de informação geográfica. Nele pode observar-se os principais blocos existentes no processo de revisão da base de dados: geográfica ou de atributos. A redução do tempo de revisão da base de dados é conseguida através de um dos dois processos: automatização das tarefas de manipulação de dados recentes e dados existentes; automatização do processo de extracção de objectos a partir de imagens digitais (aéreas ou espaciais). Saliente-se que é dada ênfase à automatização do processo de extracção em virtude da presença do bloco intitulado **EXTRACÇÃO AUTOMÁTICA**, em substituição de um bloco mais geral intitulado **EXTRACÇÃO DE OBJECTOS**.

A qualidade dos dados existentes num SIG, pode ser caracterizada introduzindo o conceito de metadados ⁶, melhorando a gestão do processo de revisão da base de dados e que compreende tarefas de actualização e a introdução de nova informação no sistema.

Dada a tendência de aumento do volume de dados aumenta, proporcionalmente, o tempo usado no processo de revisão e, em consequência, a necessidade de automatização

⁴Informação extraída do site <http://www.photo.verm.tu-muenchen.de/roads/roads-extr.html> (Abril 1999). Este site apresenta um conjunto de tópicos, que se relacionam com o potencial das imagens aéreas para a revisão da base de dados de um SIG, e que se baseam na experiência adquirida com o sistema ATKIS - *Authorative Topographic-Cartographic Information System* da República Federal da Alemanha.

⁵Informação extraída do site <http://www.lsl.co.uk/papers/sdbupdate.html> (Maio 1999).

⁶Informação extraída do site <http://www.lsl.co.uk/papers/sdbupdate.html> (Maio 1999). Exemplos de definição de metadados: «Dados sobre dados» (Goodchild 1997); conhecimento estrutural e conhecimento semântico sobre os dados (Lagrange 1997).

deste. O recurso a técnicas utilizadas na visão por computador e no processamento digital de imagem por parte de um sistema de informação geográfica é uma estratégia promissora (Buttenfield e Mackaness 1991). O recurso a sistemas de extracção automática de dados para um SIG está a vulgarizar-se.

As imagens aéreas constituem uma fonte importante de informação para o processo de revisão. Estas imagens contêm uma grande quantidade de dados, abarcam zonas de dimensão razoável e são em geral actuais (Steger, Eckstein, e Wiedemann 1996), (Baumgartner, Steger, Mayer, Eckstein, Wiedemann, e Ebner 1996) e (English, Heipke, Reinhart, e Ebner 1996).

A integração dos dados existentes nas imagens aéreas, só é possível se estes forem extraídos de acordo com uma estrutura passível de ser interpretada pelos sistemas de informação geográfica. A extracção é hoje maioritariamente executada com base em processos semi-automáticos, ou seja, processos em que existe uma forte interacção entre o sistema informático de trabalho e o operador. A extracção automática— sem a interacção entre o sistema e o operador—, constitui o objectivo de desenvolvimento futuro dos sistemas de extracção automática de dados para SIG (Forlani, Malinervi, e Nardinchie 1996).

Este documento descreve um módulo de extracção automática, a partir de imagens aéreas, de um determinado tipo de dados— os objectos lineares—, para posterior integração em sistemas de informação geográfica. Permite a actualização automática deste tipo de dados espaciais, com base em imagens aéreas, recorrendo a **técnicas de visão por computador de baixo nível**⁷.

1.2. Trabalho Desenvolvido

Neste documento é desenvolvida uma metodologia para a extracção de estradas a partir de imagens aéreas de alta resolução com 256 níveis de cinzento, que se compõe em duas fases. A metodologia integra algum conhecimento sobre os objectos em causa, nomeadamente, conhecimento geométrico e radiométrico.

Neste texto a imagem é representada por uma função discreta $f(i, j)$, em que os argumentos i e j representam, respectivamente, as coordenadas num plano cartesiano caracterizado por um eixo OX ortogonal a outro eixo OY .

Na primeira fase do método determinam-se os pontos da imagem (os *pixel*) em que existe uma variação abrupta de tonalidade, e utiliza-se o processo de **detecção de contornos** com base no trabalho de (Canny 1986), que permite a determinação espacial dos pontos de contorno com o recurso a um conhecimento mínimo dos objectos a detectar, mantendo a interpretação da imagem num processo de conhecimento de baixo nível. Aprofunda-se a análise da **convolução** do gradiente da Gaussiana, generalizado para duas dimensões, respectivamente OX e OY , com a função de imagem, de modo a

⁷Entenda-se **técnicas de visão por computador de baixo nível**, as que em geral utilizam apenas informação directamente a partir das imagens digitais (Sonka, Hlavac, e Boyle 1993).

determinar correctamente a largura do filtro. Os contornos nas imagens dos conjuntos de teste são obtidos através da classificação dos pontos das mesmas, por meio da **operação de limiar** da amplitude do gradiente. A redução da largura dos contornos para um *pixel*, é realizada por um algoritmo de **emagrecimento de contornos**, precedido do seu agrupamento com o recurso a um algoritmo de marcação de componentes conexos

Os contornos resultantes da primeira fase do método proposto são classificados na segunda fase em margens de um troço de estrada com base num reconhecedor estatístico baseado num conjunto de características geométricas e radiométricas do modelo de estrada. Utiliza-se a classificação de máximo *a posteriori*.

Os pontos que representam os eixos de via, obtêm-se a partir dos pontos de contorno nas margens da estrada.

É, também, realizada uma pesquisa bibliográfica, de modo a estabelecer uma percepção do estado da arte, relativamente ao tema da **extracção de estradas a partir de imagens aéreas**.

1.3. Estrutura do Documento

Este documento tem como divisões principais seis capítulos e três apêndices.

No Capítulo 1 situa-se o tema da dissertação no conjunto das actividades relacionadas com o trabalho desenvolvido. Aborda, de forma geral, os sistemas de informação geográfica e a extracção automática de informação em formato adequado, a partir de imagens aéreas. Fica-se, portanto, com uma percepção global do assunto desenvolvido nos restantes capítulos do documento. É resumido no Capítulo 1 o conjunto do trabalho mais relevante realizado pelo autor e que é discutido, com mais pormenor, nos capítulos restantes. Finaliza este capítulo com a discussão da estrutura da tese.

No Capítulo 2 discute-se o problema da **detecção e extracção de objectos lineares em imagens digitais** no contexto dos sistemas de informação geográfica. A estrutura e o funcionamento de sistemas de informação geográfica abordam-se de um modo geral. Discutem-se os elementos constitutivos destes sistemas tendo, em conta a incorporação de informação obtida por processos automáticos e semi-automáticos, a partir de imagens digitais. O estado do conhecimento e exemplos de realização de sistemas deste género é aprofundado neste capítulo, extraíndo-se as conclusões mais relevantes para o trabalho desenvolvido.

É objecto do Capítulo 3 a apresentação do estado da arte, em termos de sistemas deste género e as realizações mais actuais na área da detecção de objectos lineares. Apresenta-se uma classificação de várias metodologias de detecção segundo vários prismas de análise. Justifica-se a escolha das várias classificações. Discute-se a opção pela metodologia adoptada. Relaciona-se a detecção de contornos com a **detecção de objectos lineares**. Definem-se os termos utilizados na área e, finalmente, enquadram-se os vários passos a utilizar no sistema desenvolvido ao longo do trabalho conducente a esta dissertação.

É objecto do Capítulo 4 a abordagem teórica da metodologia de extracção automática de estradas a partir de imagens aéreas de alta resolução que é estudada nesta dissertação. Enunciam-se as diversas classes de processos de extracção automática de objectos lineares. Caracterizam-se os métodos baseados em contornos, regiões e os métodos geométrico-probabilísticos. Identificam-se as categorias do conhecimento que se integram nos modelos de extracção automática de estradas e discute-se o conhecimento introduzido no modelo proposto. As opções assumidas no algoritmo de detecção proposto e as suas fases são descritas. Discute-se o detector de contornos de *Canny*, os métodos de emagrecimento dos contornos assim obtidos e as respectivas ligações dos seus pontos. O processo de classificação de componentes conexos, que permite obter as margens de um troço de estrada é apresentado. Os troços constituídos por componentes conexos sustentam o processo de reconhecimento de estradas que se desenvolve neste capítulo. Finda-se com a análise do processo que permite obter o eixo de via correspondente às estradas detectadas.

Os resultados experimentais apresentam-se no Capítulo 5. Os dados de entrada para o sistema de extracção de estradas, são imagens digitalizadas obtidas por meio de fotografia aérea. Estes dados são caracterizados na Secção 5.1, em termos: da sua origem; das características da sua discretização— resolução espacial e de níveis de cinzento—; do nível de ruído presente na imagem (de uma forma visual); das escalas e das distorções geométricas. Os objectivos a atingir com o sistema são, de novo, enunciados e relacionados com as medidas experimentais que se descrevem neste capítulo. Apresentam-se os resultados das estimativas realizadas num conjunto de figuras, gráficos e tabelas. Este conjunto de informação é, por sua vez, discutido e analisado.

As conclusões gerais do documento apresentam-se no Capítulo 6. As perspectivas globais de evolução do trabalho são, também, tema deste capítulo.

No Apêndice A desenvolve-se a convolução do gradiente da Gaussiana generalizado a duas dimensões, determina-se a sua área de influência, de modo a obter o melhor compromisso entre detecção e localização.

No Apêndice B exhibe-se um conjunto mais exaustivo de resultados experimentais.

No Apêndice C descreve-se todo o *hardware* e *software* utilizados na elaboração desta dissertação.

1. INTRODUÇÃO

A sociedade ocidental alterou-se, desde o tempo em que as economias e as culturas dependiam das indústrias pesadas, em geral baseadas na existência do petróleo e usando transportes pesados. Fábricas de enormes dimensões e operários semi-especializados eram a norma. Os tempos antigos estão a dar lugar aos tempos modernos, em que se assiste a um rápido desenvolvimento de tecnologias sofisticadas. Computadores e outros equipamentos electrónicos (como os satélites), são a «maquinaria» através da qual as economias e as culturas estão a ser de novo endereçadas e sustentadas. Dados e informação são a «moeda» da **Era da Informação**, e trabalhadores tecnologicamente especializados estão a constituir a mão de obra. Os SIG são uma parte importante da **Era da Informação**.

Bruce Davis, *GIS a Visual Approach*, 1996

2

Extracção de Objectos para Sistemas de Informação Geográfica

Conteúdo

2.1. Sistemas de Informação Geográfica	11
2.2. Dados em Sistemas de Informação Geográfica	17
2.3. Extracção de Objectos Lineares	20

2. EXTRACÇÃO DE OBJECTOS PARA SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

A extracção de objectos lineares para sistemas de informação geográfica é definida neste capítulo. A partir da noção de sistema de informação geográfica, objecto da escrita da Secção 2.1, e necessariamente geral, identifica-se os dados que o constituem e, em particular, os objectos lineares.

Estrutura-se este capítulo em três secções. A primeira descreve, de modo genérico, os sistemas de informação geográfica. Introduzem-se definições presentes na literatura sobre o assunto. A arquitectura destes sistemas é, também, abordada nas várias subsecções da Secção 2.1. Identifica-se, assim, o local em que é útil a extracção automática de dados.

Na Secção 2.2 aprofunda-se a discussão em torno dos dados, de modo a esclarecer a sua estrutura de entrada e de saída, em termos dos sistemas de aquisição de informação e dos sistemas de informação geográfica.

Finaliza este capítulo com a Secção 2.3, em que se discute concretamente a questão dos objectos lineares, tema central da dissertação. Contrasta-se, referindo a bibliografia sobre o assunto, os processos de extracção manual, semi-automática e automática de objectos lineares, a partir de sistemas de aquisição de dados.

2.1. Sistemas de Informação Geográfica

Definição

A definição de sistema de informação geográfica não é única. Um conjunto de mais de uma dezena de definições de sistema de informação geográfica, recolhidas a partir da literatura da área, pode ser observado em (Maguire 1991).

Algumas das razões desta diversidade provêm da grande variedade de aplicações dos SIG e a possibilidade de exploração de dados multi-sectoriais, de origens diversas e de natureza distinta. O debate em torno da identificação do núcleo central de um sistema de informação geográfica, *hardware* e/ou *software*, acrescenta outras variáveis à discussão.

As definições denotam um carácter genérico, cobrindo um vasto leque de assuntos e actividades. No entanto, é fácil observar que existe um tópico comum, que consiste na **análise de informação georeferenciada** (Casaca 1996). A informação geográfica processada por estes sistemas, é composta de **dados**¹ **espaciais**² relativos aos elementos geográficos representativos da realidade, e de **dados de atributos** que caracterizam os referidos elementos geográficos.

As dificuldades encontradas na definição de um sistema de informação geográfica conduzem à sua classificação com base num conjunto de propriedades que vão desde as suas funcionalidades (Maguire e Dangermond 1991), passando por áreas de aplicação, custo, dimensão e, até, ao tipo de estrutura de dados (Clark 1986).

¹Os conceitos de **dados** e **informação** são distintos. Entenda-se neste documento **dados** como sendo o conjunto de factos ou números traduzindo factos, e **informação** é o resultado da interpretação e análise dos dados (Davis 1996).

²**Dados espaciais** são dados que se encontram ligados a uma localização específica.

Os Sistemas de Informação Geográfica são caracterizados como um sub-conjunto dos sistemas de informação (Maguire 1991). Os SIG têm um conjunto de propriedades que não se encontram noutros sistemas: os Sistemas CAD ³; os Sistemas de Detecção Remota ⁴ ou os Sistemas de Gestão de Bases de Dados. A capacidade de integração de tipos diversos de informação espacial, constitui a principal característica diferenciadora (Aronoff 1995) em relação aos restantes sistemas de informação.

A capacidade de efectuar análises espaciais torna os modernos sistemas de informação geográfica um conjunto de tecnologia potente, permitindo a quem toma decisões, dispor de um tipo de informação que há algumas décadas atrás, não era de uso fácil, nem imediato. Um SIG torna-se, assim, um sistema de apoio à decisão (Cowen 1988). Os sistemas de informação geográfica são um reflexo da **era pós-industrial**, ou seja, da **era da informação** (Davis 1996).

Em conclusão, uma definição possível de um SIG deve englobar a panóplia de acções a desenvolver no sistema, desde a sua realização. Pode referir-se, por exemplo, que é um sistema constituído por *hardware*, *software* e *liveware* ⁵, com o fim de armazenar, processar, visualizar e analisar dados de natureza espacial (referenciados à superfície da Terra).

Funcionalidades e Componentes

Os sistemas de informação geográfica podem ser considerados, sob o ponto de vista da sua funcionalidade, como um conjunto de ferramentas para: a recolha; armazenamento; organização e selecção; transformação e representação de informação de natureza espacial do mundo que nos rodeia (Burrough 1991).

São exemplos de operações de análise num sistema de informação geográfica: as operações de sobreposição (*overlay*); as operações de análise de redes e determinação de área de influência (*buffer*).

Os componentes de um sistema de informação geográfica dividem-se em quatro grupos básicos: *hardware*; *software*; **dados** e *liveware*, de acordo com (Maguire 1991). Os dados não são apenas necessários durante o processo de implementação do sistema mas, também, após o mesmo, já que têm validade e é necessário efectuar com determinada frequência a sua actualização ⁶, para que as análises efectuadas pelo sistema produzam informação fiável.

A funcionalidade de um sistema de informação geográfica é definida como o conjunto de todas as operações de aquisição, armazenamento, processamento, análise e visuali-

³**CAD**— *Computer Aided Design* é a nomenclatura inglesa para a designação de **Desenho Assisted por Computador**.

⁴Um Sistema de Detecção Remota consiste num sistema de informação que tem por objectivo a obtenção de dados sobre uma cena, área ou fenómeno em estudo, através de um sensor que não está em contacto com a cena área ou fenómeno (Lillesand e Kiefer 1994).

⁵Entenda-se por *liveware* o conjunto humano que manipula o sistema.

⁶O intervalo de tempo da actualização dos dados, depende do tipo de dados e do objectivo que está por detrás da existência do sistema.

zação dos dados produzidas dentro do sistema. Apontam-se duas razões para justificar a descrição pouco clara e pouco compreensível das funcionalidades de um SIG: os SIG são uma disciplina pouco amadurecida e em rápida evolução; as aplicações dos SIG são múltiplas e variadas pelo que qualquer esquema tem de satisfazer um grupo muito heterogéneo de indivíduos (Maguire e Dangermond 1991).

Estrutura de um SIG

O diagrama funcional exibido pela Figura 2.1, representa uma divisão de funções num sistema típico de informação geográfica.

A cartografia em papel é o meio primário de aquisição de dados espaciais para um sistema de informação geográfica (Davis 1996). Para que a interpretação de tais dados se possa efectuar por estes sistemas, é necessária a sua digitalização de acordo com um dos formatos: *raster* ou vectorial. Outro tipo de dados de entrada são as imagens aéreas ou de satélite, que nem sempre se encontram em formato digital, como é o caso das imagens obtidas por sistemas de detecção remota baseados em película fotográfica. A sua digitalização é necessária e preferencialmente a partir dos seus negativos (Lillesand e Kiefer 1994).

O módulo funcional denominado **Digitalização *Raster*** ou **Vectorial**, representa o conjunto de funções que têm como objectivo transformar os dados espaciais — provenientes de fontes não digitais diversas —, para uma estrutura de dados interpretável por um SIG. O tipo de estrutura de dados, à saída deste módulo, é um ficheiro, cujo conteúdo representa os dados espaciais digitalizados. Os dados espaciais são, *grosso modo*, caracterizados por duas componentes: a classe ou dimensão física do fenómeno a que se reportam e a localização espacial do fenómeno que traduzem (Aronoff 1995). Exemplos da dimensão física de um fenómeno são a largura de uma estrada ou a população de uma cidade. A classe pode ser um tipo de rocha ou um tipo de vegetação. A localização espacial é sempre especificada em relação a um sistema de coordenadas comum, por exemplo, a latitude e a longitude. As tarefas relacionadas com esta última componente estão englobadas no módulo funcional denominado **Georeferenciação**, e têm como objectivo relacionar as posições em imagens *raster* ou em ficheiros vectoriais, com as zonas correspondentes à superfície da Terra.

O módulo denominado de **Estabelecimento de ligações**, representa o conjunto de funções que têm como objectivo, definir as ligações entre os elementos geográficos e os atributos. Este, é um dos módulos fundamentais de qualquer sistema de informação geográfica.

O conjunto de funções que têm como objectivo validar os dados adquiridos para o sistema de informação geográfica, está representado no módulo denominado **Validação**. A validação, para além da comparação dos dados introduzidos no sistema com os dados originais ⁷, compreende um conjunto de procedimentos para verificar a definição geo-

⁷A comparação compreende a procura de valores anormais.

2. EXTRACÇÃO DE OBJECTOS PARA SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

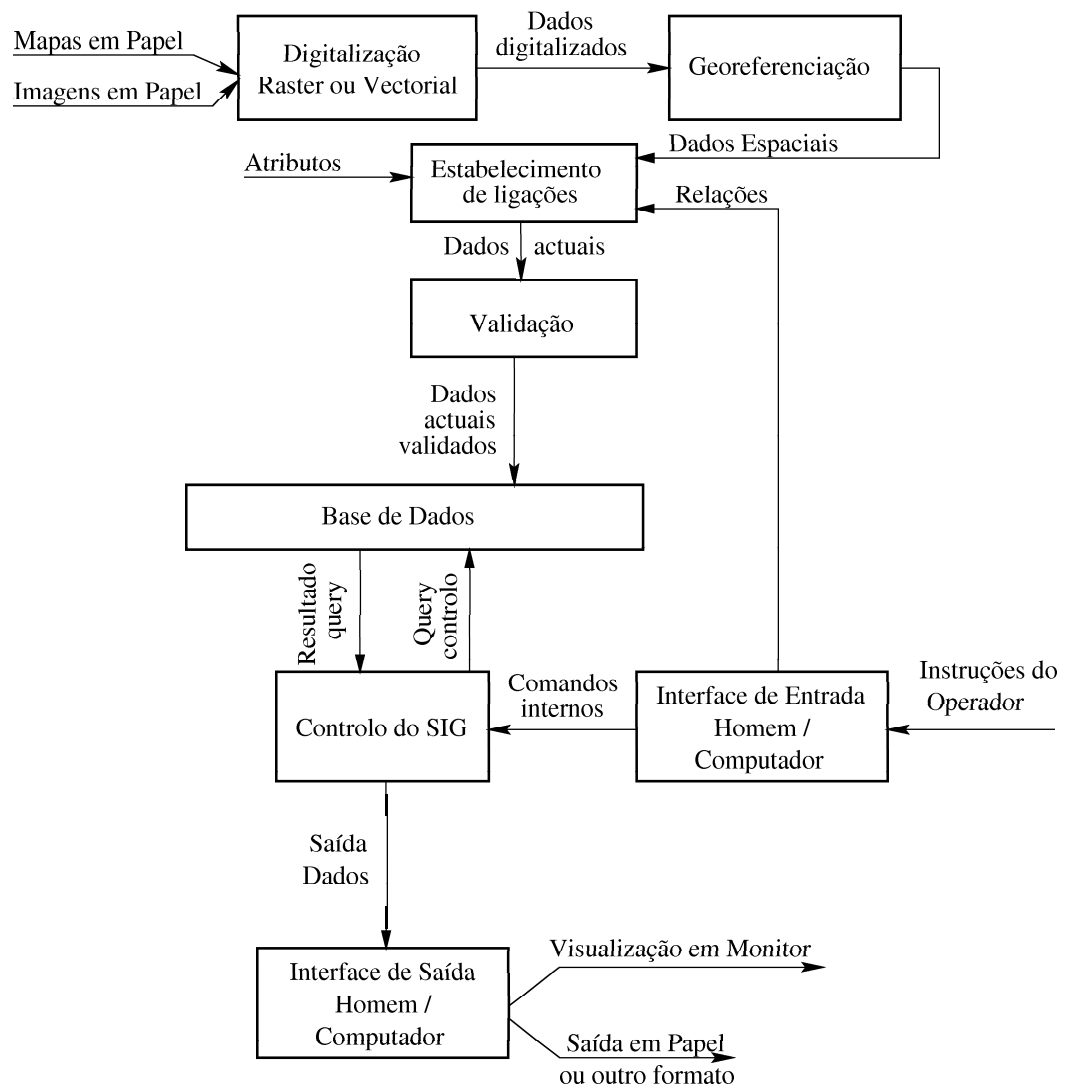


Figura 2.1.: A figura representa um diagrama de funções de um sistema típico de informação geográfica. Identificam-se os seus subsistemas principais e o fluxo de informação associado.

gráfica correcta dos elementos digitalizados. A relevância deste procedimento é maior no caso da estrutura de dados vectorial.

A Figura 2.2 enumera duas situações que necessitam de validação e de uma posterior edição: a situação **A** realça um desfasamento entre o ponto **1** e o ponto **2**, não permitindo a criação de uma topologia de polígonos, sendo necessário que os pontos anteriormente referidos coincidam geograficamente; a situação **B** realça um desfasamento entre o ponto **1** e o ponto **2**, inviabilizando uma construção correcta de uma topologia de rede, sendo necessário que os referidos pontos coincidam geograficamente. A grande maioria dos

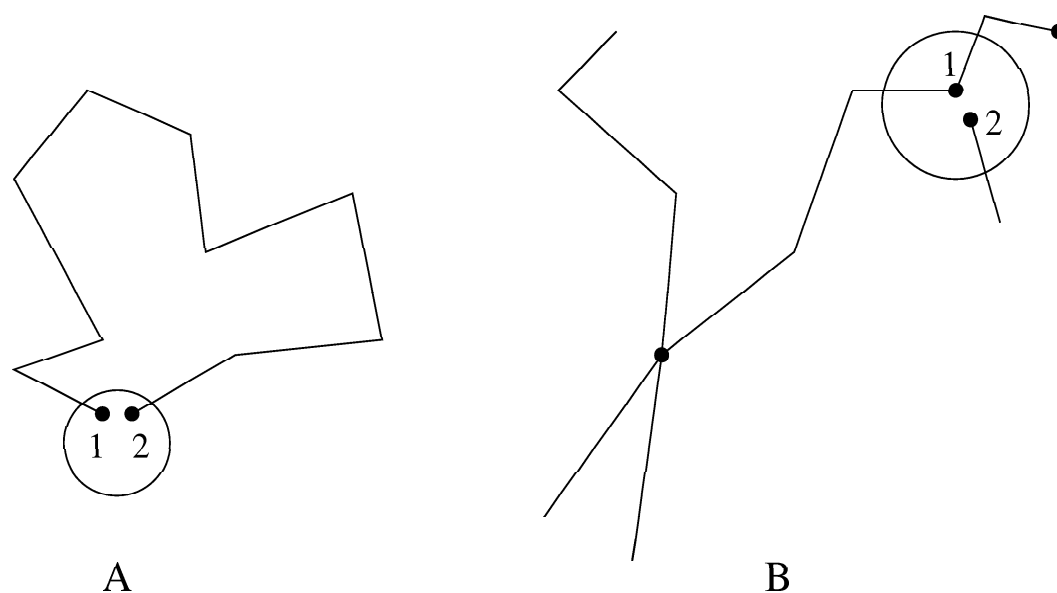


Figura 2.2.: Vários são os erros cometidos no processo de aquisição de dados espaciais para um sistema de informação geográfica. A figura mostra dois exemplos (**A** e **B**), de erros na representação vectorial de entidades geográficas, cometidos no processo de aquisição de dados espaciais, com recurso a uma mesa digitalizadora (dispositivo de *hardware* que possibilita a aquisição de dados segundo uma estrutura vectorial). O erro apresentado no exemplo **A**, inviabiliza a construção de uma topologia de polígono para a entidade geográfica representada. O erro apresentado no exemplo **B**, inviabiliza uma construção correcta de uma topologia de rede.

pacotes de *software* SIG existentes no mercado, incluem um conjunto de rotinas para validar os dados geográficos introduzidos. A validação dos dados geográficos implica a sua edição. Os sistemas de gestão de bases de dados são frequentemente empregues na validação e edição de atributos.

O módulo denominado **Base de Dados**, representa o sistema de gestão do conjunto dos dados do sistema de informação geográfica — espaciais e de atributos. A estruturação dos dados permite: um armazenamento mais eficaz e maior suporte de operações

analíticas (Maguire e Dangermond 1991). A importância atribuída ao projecto da estrutura da base de dados, é comprovada pela observação de que existe uma gestão pouco eficaz da representação simultânea das estruturas de dados vectorial e *raster*, apresentada pelos pacotes de *software* de SIG existentes no mercado.

O tipo de estrutura de dados armazenada determina o conjunto de funções que são usadas para o processamento e análise dos dados (Maguire e Dangermond 1991). A conversão de uma estrutura de dados vectorial para uma estrutura de dados *raster* ou vice-versa, apresenta as desvantagens de elevado consumo de tempo e da introdução de erros. As relações espaciais entre as entidades geográficas da estrutura de dados vectorial, estão também incluídas na base de dados ⁸.

As **Instruções do Operador**, são introduzidas no sistema e traduzidas para **Comandos internos**, que variam entre os diversos pacotes de *software* SIG existentes no mercado. A intervenção humana é traduzida pelo módulo **Interface de Entrada Homem / Computador**, para que se possa utilizar o conjunto de funções de análise espacial do SIG. A escolha de um pacote de *software* deve, para além do tipo de estrutura de dados, basear-se no tipo de funções de análise existentes. No entanto, é importante considerar a capacidade de criação de funções de análise adicionais pelo utilizador.

A capacidade de análise geográfica de padrões e relacionamentos, marca a diferença entre os sistemas de informação geográfica e congéneres, como os sistemas de detecção remota, os sistemas CAD e os sistemas de gestão de base de dados (Maguire e Dangermond 1991). O módulo **Controlo do SIG**, integra o conjunto de funções de análise realizadas num sistema de informação geográfica. De acordo com (Aronoff 1995), são quatro os conjuntos de funções de análise de um SIG: funções de manutenção e análise dos dados espaciais; funções de manutenção e análise de atributos; funções de análise integrada de dados espaciais e de atributos, e funções de formato de saída ⁹. Uma divisão mais simplista é apresentada em (Maguire e Dangermond 1991), e que assenta em dois grupos: *queries* ¹⁰ e análises. As *queries* podem assumir duas formas:

- obtenção de atributos a partir de dados espaciais;
- obtenção de dados espaciais a partir de atributos.

As análises permitem a obtenção de informação que está implícita na base de dados. A fronteira entre estes dois grupos não é, no entanto, estanque porque as análises podem basear-se na execução de *queries*. As análises e as *queries* espaciais envolvem operações de distância e de direcção. Uma operação de *query* simples é aquela que, por exemplo, permite obter o nome do proprietário de um parcela agrícola, mas uma operação de *query* mais elaborada permite, por exemplo, obter um conjunto de atributos de entidades que

⁸Ao processo que conduz à definição das relações espaciais entre os elementos geográficos de uma estrutura de dados vectorial, dá-se o nome de **criação de topologia**.

⁹Em (Aronoff 1995) pode observar-se a caracterização de cada um dos quatro grupos de funções referidos.

¹⁰É utilizada a palavra *queries* porque não há ainda uma tradução universalmente adoptada.

se encontram na zona de influência de outras entidades previamente seleccionadas. Os resultados das análises efectuadas pelo SIG também podem ser armazenados na base de dados. O resultado de tais análises é considerado como novos dados espaciais e de atributos.

Os resultados produzidos pelas análises realizadas num SIG são, em geral, visualizadas num monitor gráfico. É tarefa do módulo **Interface de Saída Homem / Computador** representar o conjunto de funções que permitem realizar saídas dos resultados. No caso da saída de resultados para alguns suportes, como o papel ou o suporte digital, recorre-se a periféricos capazes de executarem adequadamente tais funções. Em suporte digital podem existir vários formatos, por exemplo, ficheiros .DXF, ficheiros ArcInfo, etc.

2.2. Dados em Sistemas de Informação Geográfica

Modelos

De acordo com a sua estrutura, os dados armazenados e visualizados num Sistema de Informação Geográfica podem classificar-se de acordo com dois modelos: o modelo **raster** e o modelo **vectorial** (Aronoff 1995).

No modelo *raster*, a zona em estudo é subdividida numa grelha constituída por **células**, nas quais se regista a condição ou o tipo de objecto que existe na zona correspondente à célula, através de um símbolo que pode ter ou não significado matemático¹¹. A localização de um objecto geográfico é definida pela linha e coluna que a(s) célula(s) que lhe corresponde(m) ocupa(m) na grelha.

No modelo vectorial, a representação dos objectos na zona em estudo, é efectuada com o recurso a três tipos de dados espaciais: o ponto; a linha e o polígono. Neste modelo, a posição geográfica do ponto é definida pela sua abscissa e pela sua ordenada no sistema de coordenadas utilizado como referência. A posição geográfica da linha é caracterizada por dois pontos, e a posição geográfica do polígono é caracterizada pelas coordenadas dos seus vértices. É necessário efectuar o armazenamento das relações de vizinhança entre os dados espaciais (ponto, linha e polígono), processo a que se dá o nome de **criação da topologia**, que permite estabelecer ligações de conexão e de adjacência (Laurini e Thompson 1993). Após este procedimento, o sistema está em condições de identificar o conjunto de **nós** e **arcos** interligados, definindo-se os elementos geográficos a partir das ligações estabelecidas. Este tipo de estrutura de dados constitui a entidade matemática designada por **grafo de adjacências**.

Hoje é prática aceite a visualização dos dados em ambos os formatos, como é observável pela análise dos pacotes de *software* mais conhecidos do mercado. Confunde-se

¹¹O significado matemático de um valor associado à célula refere-se ao facto de que tal valor pode ser um identificador que permita extrair um registo na base de dados (valor sem significado matemático), ou pode corresponder ao valor de uma variável (valor com significado matemático) (Davis 1996).

por vezes o formato da visualização, com o formato utilizado no processamento dos dados. A distinção entre um SIG vectorial e um SIG *raster*, é feita sobre a capacidade que o mesmo tem ou não de efectuar certas análises com os dados (Goodchild 1991). Dois exemplos são apresentados. O primeiro refere-se à aplicação informática **AutoCAD**, pacote de *software* do tipo SIG vectorial ¹² e que tem a capacidade de visualizar dados em formato *raster*, mas que não permite a execução de análises espaciais com este tipo de estrutura de dados, pelo que não pode ser designado por SIG *raster* ¹³. O segundo exemplo escolhido é a aplicação informática **IDRISI**, que permite a visualização de dados usando o modelo vectorial e o modelo *raster*, mas apenas permite efectuar análises espaciais utilizando o segundo modelo, sendo classificado como SIG *raster*.

Aquisição de Dados

O processo de aquisição de dados, está relacionado com o tipo de modelo de dados que se pretende como entrada para o sistema. No entanto, é possível adquirir dados segundo o modelo *raster* para entrada num SIG vectorial e adquirir dados segundo o modelo vectorial para entrada num SIG *raster* (Davis 1996). A conversão de um modelo de dados noutro modelo de dados, obriga a dois processamentos designados respectivamente por **vectorização** e **conversão *raster***, que se realizam com o recurso a aplicações de *software* específicas, estando disponível no mercado um leque variado de produtos, disponibilizados por diversos fabricantes. A realização destes dois tipos de processamento pode, no entanto, introduzir erros (Davis 1996).

A aquisição de dados para um sistema de informação geográfica não é um processo fácil nem barato. É, pelo contrário, e embora as estimativas variem, possível apontar um custo de aquisição dos dados que excede em setenta por cento o custo de aquisição do *software* e do *hardware* (Rowley e Gilbert 1989). É também um processo moroso, porque o tempo de introdução dos dados num sistema chega a superar em cerca de sessenta a setenta por cento, o tempo de realização do mesmo (Davis 1996).

A fonte de dados primária é a cartografia em papel (Fisher 1991), mas para que seja possível a sua interpretação por um sistema de informação geográfica ¹⁴, esta terá de ser convertida para o formato digital. Vários são os equipamentos que permitem a conversão de dados em papel para o formato digital, sendo de destacar que os mais utilizados são

¹²Designa-se por SIG vectorial, um sistema de informação geográfica que realize análise espacial sobre um modelo de dados vectorial. Este é um caso de classificação de um SIG com base no tipo de estrutura de dados. Ver 2.1.

¹³Designa-se por SIG *raster*, um Sistema de Informação Geográfica que realiza a análise espacial sobre um modelo de dados *raster*. Este é, também, um caso de classificação de um SIG com base no tipo de estrutura de dados. Ver 2.1.

¹⁴Nos dias de hoje, é prática corrente referir um SIG como um sistema auxiliado por computador, que permite a gestão e análise de dados espaciais, dado o elevado desempenho protagonizado por tais equipamentos.

as **mesas digitalizadoras**¹⁵ e os **scanners**¹⁶.

As mesas digitalizadoras, possibilitam a aquisição de dados de acordo com o modelo vectorial, sendo as entidades geográficas representadas por pontos, linhas e polígonos, processo este referido como **digitalização manual** (Davis 1996). A digitalização manual de dados a partir de dados em papel é uma fonte de erros nos dados digitais correspondentes (Openshaw, Charlton, e Carver 1991) e (Walsby 1995). Os erros dos dados espaciais que são gerados durante a sua digitalização manual, por motivo de erros do utilizador, podem ser de certa forma minimizados pela digitalização automática. Além dos erros gerados pela digitalização manual, o problema pode ser ainda agravado, quando se contabilizam os erros do suporte dos dados (existência de deformações).

A identificação dos factores que conduzem aos erros produzidos pela digitalização manual dos dados, pode conduzir à definição de **margens de erro prováveis** para além do erro associado a cada mapa digitalizado e pode, também, melhorar a formação do pessoal que executa tal tarefa, já que a sua especialização é considerada como uma das formas de reduzir tais erros (Walsby 1995).

Os *scanners* possibilitam a aquisição de dados de acordo com o modelo *raster*, mas também podem adquiri-los segundo o formato vectorial, existindo desta forma a distinção entre *scanners raster* e *scanners* vectoriais (Burrough 1991). Estes últimos têm como objectivo a digitalização de linhas usando um dispositivo *raster*, sendo a estrutura vectorial restaurada a partir de um processamento computacional¹⁷. Este último procedimento apresenta a vantagem da rapidez na aquisição de linhas. É, no entanto, um processo que obriga a uma elevada intervenção de um operador especializado, obrigando-o a tomar algumas decisões durante a aquisição de linhas, de modo a que o feixe LASER progrida adequadamente. É necessária uma cópia em papel transparente do mapa original, tornando-se assim um processo inadequado se o mapa original apresentar uma elevada densidade de objectos, sem contar com o elevado custo de tais equipamentos (Davis 1996).

Os estudos da aquisição de dados a partir de um sistema de detecção remota têm aumentado. É considerado como um caso particular de aquisição de dados segundo o modelo *raster* (DeMers 1997), justificado quer pela analogia existente entre a estrutura de dados de um SIG *raster* e dos dados obtidos pelo processo em causa, quer pela possibilidade que oferece na cobertura de áreas de dimensões razoáveis. Esta fonte de dados, é mais útil se os mesmos forem obtidos electronicamente, já que no caso de aquisição de dados a partir de fotografia aérea baseada em película fotográfica, torna-se necessário efectuar a sua digitalização, processo este que necessita de equipamento especializado, sendo realizado com mais qualidade através da película e não através da impressão obtida em papel (Lillesand e Kiefer 1994). Saliente-se que a estrutura *raster* dos dados obtidos por detecção remota, não deve conduzir a decisão entre a

¹⁵Estes equipamentos adquirem dados espaciais segundo o modelo vectorial.

¹⁶Estes equipamentos podem adquirir dados espaciais segundo o modelo *raster* ou segundo modelo vectorial (Burrough 1991).

¹⁷Esta abordagem é desenvolvida por uma empresa inglesa denominada *Laser-Scan* (Burrough 1991).

implementação de um SIG *raster versus* SIG vectorial, mas tal decisão deve basear-se no tipo de base de dados que se pretende construir (DeMers 1997).

2.3. Extracção de Objectos Lineares

Os objectos lineares são um dos tipos de dados espaciais que um sistema de informação geográfica pode incorporar na sua base de dados. A sua aquisição pode ser efectuada por qualquer um dos processos referidos na Secção 2.2.

A Figura 2.3 apresenta uma classificação dos processos de extracção de objectos, a partir de imagens digitais obtidas de plataformas aéreas ou espaciais, em termos do grau de automatização.

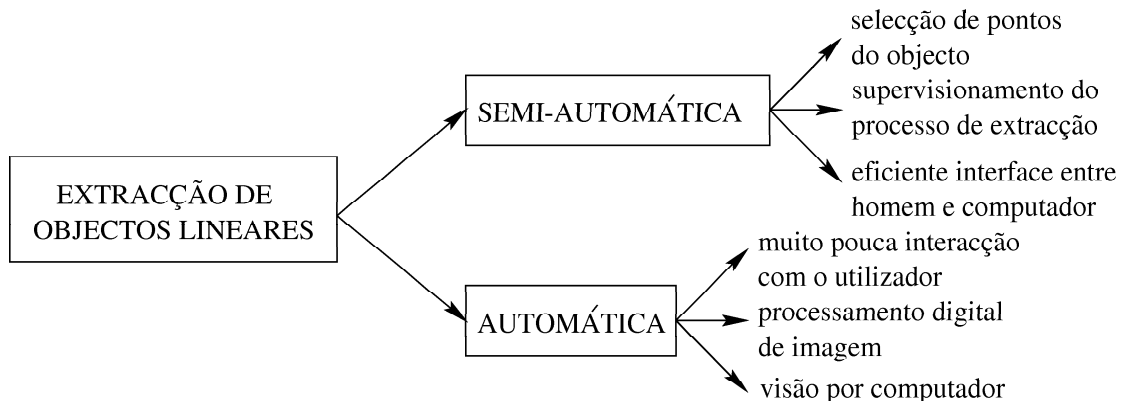


Figura 2.3.: O diagrama da figura mostra uma classificação do processo de extracção de objectos a partir de imagens digitais (aéreas ou espaciais), em termos do grau de automatização, ou seja, intervenção (extracção semi-automática) ou não (extracção automática) de um operador do sistema. Enunciam-se, sumariamente, as vantagens e desvantagens de cada uma das duas categorias.

Sendo as imagens — caracterizadas pelo modelo *raster* — uma das fontes de dados cada vez mais utilizadas para entrada num SIG (Lillesand e Kiefer 1994), a aquisição de objectos que apresentam um desenvolvimento linear para a representação de objectos reais a partir de tais imagens, como por exemplo as estradas ou rios, pode ser realizada, em geral, quer utilizando *software* de vectorização ¹⁸, quer recorrendo à vectorização a partir de uma mesa digitalizadora, quando a mesma se encontra impressa em papel (Buttenfield e Mackaness 1991).

Os processos referidos, obrigam à intervenção de um operador que deve estar familiarizado quer com o processo em curso, quer com o tipo de objectos com que irá lidar.

¹⁸No caso em que as imagens se apresentam no formato digital e após o processamento que conduz, em geral, à eliminação de distorções de escala, de *relief* e de *tilt* (Lillesand e Kiefer 1994).

Estes factores sendo desrespeitados conduzem à introdução de erros de posicionamento, para além dos erros atribuídos ao suporte dos dados (Walsby 1995) e (Fisher 1991).

Outra abordagem ao problema da aquisição de objectos lineares a partir de **ortofotos digitais**¹⁹, consiste na sua extracção automática recorrendo ao processamento digital da imagem. Este processo apresenta como vantagens principais: a não introdução de erros por parte do utilizador durante o processo de digitalização; o aumento de rapidez da extracção dos dados pretendidos e o aumento da precisão geométrica dos dados resultantes da imagem aérea (Steger, Eckstein, e Wiedemann 1996).

A maior valorização de um sistema de informação geográfica está a cargo dos dados que armazena (Maguire 1991), e para que os mesmos se tornem válidos é necessário proceder à sua actualização em termos da sua integridade, consistência e precisão (Locherbach 1995). Isto obriga à revisão periódica da base de dados do SIG, que abrange as acções de aquisição, edição, análise e visualização dos dados. No entanto, esta revisão é cada vez mais complexa, em virtude da tendência de aumento do volume que as bases de dados dos sistemas apresentam²⁰.

Arquitecturas sofisticadas ao nível do *hardware* e novos paradigmas ao nível do *software*, servem para acelerar o processo de revisão da base de dados de um sistema de informação geográfica, e para gerir as interdependências complexas existentes entre os elementos geográficos que representam, no sistema, as entidades à superfície da Terra. Exemplos destas arquitecturas de *hardware* são os sistemas de processamento paralelo e distribuído (Healey, Dowers, Gittings, e Mineter 1998). Exemplos dos novos paradigmas de *software* são as abordagens às estruturas de dados orientados por objecto (Arctur 1996), os algoritmos concorrentes, e as técnicas de inteligência artificial: técnicas evolutivas; redes neuronais e agentes.

No entanto, o aumento do desempenho do processo de revisão da base de dados de um sistema de informação geográfica, não depende apenas das arquitecturas e dos novos paradigmas acima descritos, mas também da automatização do processo de aquisição de dados, a partir de ortofotos digitais. A automatização conduz à redução do custo da aquisição de dados, quer calculado em termos financeiros, quer em termos temporais (Baumgartner, Steger, Mayer, Eckstein, Wiedemann, e Ebner 1996).

Apesar das vantagens já enumeradas, o processo automático de extracção de objectos a partir de ortofotos em formato digital deve ser cuidadosamente planeado, sendo necessário responder a um conjunto de questões que permitam definir adequadamente a estratégia a seguir, e enumerar um conjunto de parâmetros que caracterizem o conteúdo

¹⁹Entenda-se, a partir deste ponto no presente documento, **ortofotos digitais** como sendo o conjunto de dados obtidos electronicamente por um sistema de detecção remota relativamente a uma cena, área ou fenómeno em estudo sobre a forma de uma imagem, após sujeita ao processo denominado de rectificação diferencial, por forma a corrigir as distorções de escala, de *relief* e de *tilt* (DeMers 1997) e (Lillesand e Kiefer 1994). Em relação aos dados obtidos por sistemas de detecção remota baseados em película fotográfica, ressalta no entanto, a necessidade da sua digitalização, para que os mesmos possam ser manipulados num sistema informático (Lillesand e Kiefer 1994).

²⁰Informação extraída do site <http://www.lsl.oc.uk/papers/sdbupdate.html> (Maio 1999).

2. EXTRACÇÃO DE OBJECTOS PARA SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

da informação deste tipo de fonte de dados ²¹.

²¹Informação extraída do site <http://www.photo.verm.tu-muenchen.de/roads/road-extr.html> (Abril 1999). O assunto é discutido com maior ênfase no Capítulo 3, Secção 3.2, identificando-se também as diferentes questões.

Os dados provenientes de sistemas de detecção remota, podem ser agra-
davelmente empregues para melhorar a gestão dos recursos do nosso
planeta, quer a escalas locais, quer a escalas globais. Não nos devemos
esquecer que, a priori do desenvolvimento dos satélites de detecção remo-
ta orbitais, não existia conhecimento prático relativo ao armazenamento
oportuno de dados globalmente consistentes, cuja precisão poderia ser
verificada de uma forma significativa. Enquanto que alguns discutem
que tais dados continuam a não ser prestimosos, acreditamos que nos
aproximamos do tempo em que a sua utilização será rotineira.

J.E. Estes e T.R.Loveland: *Characteristics, Sources, and Management
of Remotely-Sensed Data* ^a, 1999

^aGeographical Information Systems: Management Issues and Appli-
cations, Volume 2

3

Detecção de Objectos Lineares a Partir de Imagens Aéreas

Conteúdo

3.1. Visão por Computador e Processamento Digital de Imagem	25
3.2. Imagens Aéreas como Fonte de Dados para um SIG	27
3.3. Detecção de Estradas a partir de Imagens Aéreas	29
3.3.1. Extracção Automática a Partir de Imagens de Alta Resolução	31
3.3.2. Extracção Automática a Partir de Imagens de Baixa Resolução	36
3.3.3. Extracção Multi-Resolução	39

3. DETECÇÃO DE OBJECTOS LINEARES A PARTIR DE IMAGENS AÉREAS

Este capítulo é dedicado ao estudo do processo de detecção e extracção de estradas, a partir de imagens aéreas digitalizadas. As estradas constituem um subconjunto dos objectos que se designam por objectos lineares. As características topológicas e geométricas das estradas, tornam possível a utilização de técnicas conhecidas do processamento digital de imagens e da visão por computador.

Neste capítulo, a Secção 3.1 é dedicada à aplicação do processamento digital de imagem e da visão por computador aos sistemas de informação geográfica. A Secção 3.2 estuda a utilização de imagens aéreas como fonte primária de dados para sistemas de informação geográfica. As técnicas de processamento digital de imagem aplicadas a este tipo de dados, permitem a redução dos tempos de actualização das bases de dados espaciais associadas aos sistemas de informação geográfica. A menor dependência dos dados extraídos em relação ao trabalho de operadores humanos reduz os custos e, porventura, os erros de posicionamento. A Secção 3.3 descreve alguns dos métodos mais comuns na extracção automática de estradas a partir de imagens aéreas ou de satélite. Indica-se o tipo de método, os autores e a data do seu aparecimento. Caracterizam-se os objectivos a atingir por cada método e o tipo de dados de entrada. A importância da resolução, das oclusões, das sombras e de outros problemas resultantes da aquisição da imagem são abordados nesta secção.

3.1. Visão por Computador e Processamento Digital de Imagem

Os sistemas de informação geográfica são realizados, nos dias de hoje, em sistemas informáticos (Davis 1996). A extracção de dados a partir de imagens é, frequentemente, realizada por um operador humano para posterior introdução no sistema de informação geográfica. As tarefas de análise e compreensão de imagens, quando realizadas informaticamente, fazem parte do que se designa por **visão por computador**¹. Os sistemas de informação geográfica beneficiam da existência destes sistemas de visão por computador. À parte do sistema que usa a visão por computador cabe, neste contexto, a tarefa de duplicar a visão humana, utilizando uma base electrónica de percepção e compreensão de imagens, identificando a informação relevante e a forma como a mesma poderá ser extraída (Sonka, Hlavac, e Boyle 1993).

Um dos caminhos de evolução teórica e o desenvolvimento prático da visão por computador tem tido como base a compreensão dos métodos pelos quais o cérebro extrai informação a partir de imagens e a identificação dos módulos funcionais do sistema humano de visão (de Sousa 1996).

É importante para os sistemas de informação geográfica o **processamento digital**

¹O **reconhecimento de padrões** é uma das técnicas usadas na visão por computador para a análise e compreensão de imagens

de imagem ², que aparece como “sub-área” do **processamento digital de sinal multi-dimensional**, e que tem como objectivo transformar uma imagem numa outra que apresenta novas propriedades, de acordo com o pretendido. Alguns dos exemplos de técnicas de processamento digital de imagem são: a detecção de contornos; a análise de texturas e a reconstrução tridimensional, etc. (Jensen 1986).

Os sistemas de visão por computador utilizam a informação de imagens processadas digitalmente. Há, portanto, uma intersecção do conjunto de temas estudados em visão por computador e do conjunto de temas estudados em processamento digital de imagem. A compressão de imagens digitais é um exemplo de técnicas de processamento digital de imagem que não contribuem para a visão por computador. A classificação contextual — muito utilizada na extracção automática de estradas para sistemas de informação geográfica — faz parte das técnicas de visão por computador, não tendo relação directa com a imagem (caso do processamento digital de imagem).

A existência de sistemas de informação geográfica baseados em sistemas informáticos, aumentou significativamente a dependência do processamento digital de imagem, em virtude da capacidade destes sistemas permitirem a sobreposição de diferentes níveis de informação, adquiridos sob a forma de imagem digital e relativos à mesma área geográfica. A combinação de dados com multi-resolução correspondentes a uma mesma área geográfica, é o exemplo de uma aplicação do processamento digital de imagem realizada no contexto de um SIG (Lillesand e Kiefer 1994, Plate 14) ³.

A integração dos sistemas de processamento digital de imagem com as operações realizadas pelos sistemas de informação geográfica está a aumentar, sendo mais frequente o aparecimento de sistemas integrados de análise espacial (Lillesand e Kiefer 1994), ou seja, com a incorporação de ferramentas de processamento digital de imagem em sistemas de informação geográfica, sendo o *software* IDRISI (Clark University) um claro exemplo.

No processamento digital de imagem, as imagens são representadas por uma função bidimensional f de duas variáveis x e y que representam coordenadas cartesianas planas, função esta que resulta da projecção de uma cena tridimensional, cujos valores correspondem à medida de uma característica da imagem em cada ponto (x, y) , como por exemplo, uma medida do brilho, ou uma quantidade física como seja a cota do terreno, a temperatura, etc.. No caso do brilho, a cada posição (x, y) da imagem, a função f apresenta um valor que pode ser binário ⁴ (para imagens a preto e branco), um nível de cinzento, ou um vector com medidas de cor (para imagens **policromáticas** ⁵) (Jensen

²O processamento de imagens em computador necessita que as mesmas se apresentem em formato digital, sendo para tal necessário realizar a sua digitalização e seguidamente o seu armazenamento num sistema informático. O seu armazenamento é em geral matricial, cujo elemento mais pequeno se designa por *pixel*.

³Combinação de uma imagem multiespectral SPOT (Système Pour l’Observation de la Terre) de 20m de resolução espacial, com uma imagem pancromática SPOT de 10 m de resolução espacial.

⁴É corrente o uso da terminologia de **imagem binária**, quando o valor associado ao *pixel* é de um *bit*.

⁵As imagens **policromáticas** apresentam um vector associado a cada *pixel* que corresponde a uma

1986).

É com o recurso às técnicas de processamento digital de imagem para visão por computador, que se efectua neste documento a detecção de objecto lineares. A obtenção de uma lista de pontos a partir de uma imagem, passando por uma detecção de contornos, é um método da fronteira entre estas duas áreas, pois cabe ao processamento digital de imagem os procedimentos quer de detecção de contornos, quer de detecção de linhas. Estes procedimentos podem servir de base para a extracção do traçado validado de objectos lineares nas imagens aéreas (Steger, Glock, Eckstein, Mayer, e Radig 1995). A classificação da lista de pontos obtida em termos de corresponder a uma directriz ou às margens de uma estrada, cabe às técnicas de visão por computador ⁶.

O processo de extracção de estradas a partir de imagens aéreas, pode passar por uma detecção de contornos com base numa imagem de alta resolução, seguida de uma detecção de linhas com base numa imagem de baixa resolução da mesma área geográfica, para a obtenção de uma primeira aproximação do eixo de via da estrada. A validação do traçado final da directriz é obtida através do conhecimento de que a mesma é uma linha paralela às margens das estradas obtidas por detecção de contornos na imagem de alta resolução, e localizada a igual distância das mesmas (Steger, Glock, Eckstein, Mayer, e Radig 1995).

3.2. Imagens Aéreas como Fonte de Dados para um SIG

O uso de **fotografias aéreas** ⁷ tem sido corrente para a aquisição de dados para os sistemas de informação geográfica. A **Fotogrametria** é a área de conhecimento que se ocupa do estudo destas fotografias com o objectivo da extracção dos dados essenciais à definição das formas, dimensões e posições dos objectos nelas contidos (Matos e Baio 1997).

A produção e actualização da cartografia topográfica é um bom exemplo de aplicação das técnicas da Fotogrametria. A Fotogrametria é aplicável a todas as situações que dependem de medições geométricas credíveis de quantidades físicas que se encontrem quer num estado fixo, quer num estado transitório (Moffitt 1967).

Mais recente é o recurso à **Fotogrametria Digital** ⁸ para a actualização de sistemas de informação geográfica, em virtude do aparecimento dos ortofotos digitais, permitindo assim obter alguma automatização no processo de revisão ⁹.

composição das três cores da banda do visível do espectro electromagnético, o azul, o verde e o vermelho.

⁶O reconhecimento de padrões é uma das técnicas que se refere, e é utilizada neste documento.

⁷Entenda-se **fotografias aéreas** como imagens aéreas baseadas em película fotográfica.

⁸Designa-se por **Fotogrametria Digital** a Fotogrametria assente em imagens digitais, obtidas directamente por câmaras digitais ou através da digitalização das películas fotográficas (Lillesand e Kiefer 1994).

⁹Informação extraída do site <http://www.photo.verm.tu-muenchen.de/roads/road-extr.html>

O uso de ortofotos digitais para a aquisição de dados para sistemas de informação geográfica, no entanto, não pode ser encetado sem antes se ponderar um pouco sobre alguns tópicos. Em (English, Heipke, Reinhart, e Ebner 1996) identificam-se um conjunto de questões para as quais é necessária uma resposta antes de se proceder a uma tarefa de revisão de uma base de dados de um sistema de informação geográfica, como por exemplo:

- Que tipo de informação sobre os objectos a integrar no SIG, (sua posição, sua forma, seus atributos, etc...) pode ser extraída a partir das imagens?
- Qual a frequência média com que os dados devem ser actualizados?
- Qual é a relevância económica da informação?
- A resolução espacial das imagens permite a sua extracção?
- As imagens terão as características radiométricas adequadas à extracção de um determinado objecto?

O problema passa, portanto, pela identificação correcta do tipo de informação que se quer actualizar nos objectos integrados no sistema de informação geográfica e se esta é passível de ser extraída a partir dos ortofotos. No caso concreto estudado nesta dissertação— os objectos lineares que são as estradas—, pode extrair-se o seu traçado a partir de um ortofoto que as contenha, através da determinação do seu *eixo de via*¹⁰, mas pode não ser possível determinar, sem informação prévia, alguns dos seus atributos, como por exemplo: se é uma **Estrada Nacional** (EN); se é um **Itinerário Principal** (IP) ou quais são as características de qualidade do seu piso (ex: bom, médio ou mau).

Outra questão, tem a ver com a necessidade de revisão apresentada pelos objectos em SIG. Os estudos referentes à revisão das bases de dados de sistemas de informação geográfica indicam duas estratégias: uma estratégia contínua e uma estratégia periódica¹¹. A implementação de uma estratégia contínua é útil para aplicações em **tempo real**, como é o caso de um sistema que permita efectuar a monitorização de um fenómeno atmosférico em ocorrência, ou gerir o tempo de actuação da sinalização semafórica numa cidade¹². A estratégia periódica, recomenda a revisão da base de dados do sistema em intervalos de tempo constantes.

A questão do valor económico dos dados é também considerada relevante¹³. A revisão dos dados é um processo que envolve o custo da sua aquisição (entre outros).

(Abril 1999).

¹⁰Na nomenclatura usada em Engenharia Civil é corrente designar o eixo de via de uma estrada por **Directiz**. A Directriz corresponde, em planta, ao traçado do eixo da estrada.

¹¹Informação extraída do site <http://www.photo.verm.tu-muenchen.de/roads/road-extr.html> (Abril 1999).

¹²O projecto GERTRUDES é um exemplo.

¹³Informação extraída do site <http://www.photo.verm.tu-muenchen.de/roads/road-extr.html> (Abril 1999).

Além do custo da aquisição dos dados há também o custo de não ter informação, ou o de a ter mas não estar actualizada (Davis 1996). A ponderação deve ser feita por forma a encontrar o melhor compromisso que torne o sistema útil.

A aquisição de dados nem sempre é possível a partir de apenas uma imagem. A aquisição de dados para a elaboração de um **modelo digital de terreno**¹⁴, só pode ser executada com o recurso a duas **imagens estéreo**¹⁵. Os modelos digitais de terreno têm vindo a tornar-se uma componente importante para os sistemas de informação geográfica, nomeadamente em aplicações relacionadas com o ordenamento do território, no planeamento e na gestão de infraestruturas urbanas (Casaca 1997).

Outros parâmetros relacionados com os ortofotos digitais, nomeadamente, a sua resolução espacial, a existência de cor e o seu conteúdo devem ser tomados em conta, quando se fala em adequabilidade das imagens aéreas como fonte de dados para um sistema de informação geográfica (English, Heipke, Reinhart, e Ebner 1996).

3.3. Detecção de Estradas a partir de Imagens Aéreas

A extracção de estradas a partir de imagens aéreas digitais ou de satélite é realizada de acordo com métodos diversos, cujas diferenças são consequência dos diferentes objectivos que cada método pretende atingir, do suporte de informação que se apresenta disponível, e do nível de extracção que se pretende realizar e que está relacionado com o conhecimento existente sobre os objectos a extrair. Identificam-se na Tabela 3.1, algumas das propostas apresentadas nos últimos anos. As estradas fazem parte do conjunto de objectos lineares passíveis de extracção a partir de uma imagem aérea, e que podem ser modelados vectorialmente num sistema de informação geográfica. Ao nível da extracção automática, é frequente a escolha das estradas e dos rios.

Há projectos de investigação que têm como propósito a extracção de objectos *Man-Made*¹⁶ a partir de imagens aéreas, como por exemplo o projecto AMOBE¹⁷ conduzido pelo *Institute for Geodesy and Photogrammetry* da *Swiss Federal Institute of Technology (ETH)* em Zurich (Mason, Baltavias, e Stallmann 1994).

O processo de extracção de objectos lineares¹⁸, assenta fundamentalmente em duas

¹⁴Um **modelo digital do terreno**, é uma representação numérica e matemática do mesmo a partir de um conjunto discreto de pontos, cuja distribuição e características permitem calcular, por interpolação, a cota em todos os pontos com uma dada precisão (Aronoff 1995).

¹⁵São pares de imagens obtidas a partir de pontos de observação diferentes, mas que incluem a mesma área (Matos e Baio 1997). Em geral, para este tipo de processamento, as imagens devem apresentar uma sobreposição ao longo do desenvolvimento da fiada entre 55% a 65%, e uma sobreposição lateral entre 25% a 35% (Lillesand e Kiefer 1994).

¹⁶Esta designação de objectos, pretende definir os objectos do mundo real que são construídos pelo homem, como por exemplo as estradas, os edifícios, etc..

¹⁷*Automation of Digital Terrain Model and Man-Made Object Extraction from Aerial Images.*

¹⁸Entenda-se a partir deste ponto, a extracção de objectos lineares como extracção de estradas ou rios.

3. DETECÇÃO DE OBJECTOS LINEARES A PARTIR DE IMAGENS AÉREAS

Métodos	Autor	Data
Estimadores robustos	Netanyahu <i>et al.</i>	1997
Programação dinâmica	Zerubia e Merlet	1996
Abordagem geométrica diferencial	Steger	1996
Árvores de decisão	Geman e Jedynek	1996
Modelos estocásticos	Barzohar e Cooper	1996
Seguimento de estradas	McKeown and Denlinger	1988
Reconhecimento de padrões	Tavakoli e Bajcsy	1976

Tabela 3.1.: Tabela que identifica alguns dos métodos de extracção de estradas publicados nos últimos anos.

categorias, de acordo com a intervenção humana: processos semi-automáticos e processos automáticos (Steger, Glock, Eckstein, Mayer, e Radig 1995).

Os processos semi-automáticos são caracterizados por uma intervenção humana que tem como objectivo dar início à extracção, ou seja, o operador tem de seleccionar sobre a imagem um conjunto de pontos da estrada que pretende extrair e a direcção do seu desenvolvimento. Estes processos necessitam de interfaces homem e computador eficientes, por forma a minimizar o tempo de aquisição da informação, aumentando deste modo a extracção da informação a partir das imagens aéreas¹⁹. O operador tem assim um papel importante e de grande responsabilidade, já que tem de identificar os objectos que pretende extrair, estabelecer um conjunto de condições iniciais e supervisionar todo o processo²⁰. A optimização dos métodos semi-automáticos está, assim, mais orientada para a melhoria do mecanismo de interface entre o operador e o sistema. Um claro exemplo pode ser observado em (McKeown e Denlinger 1988) e (Vosselman e Knecht 1995), em que o operador do sistema selecciona, sobre a imagem, um conjunto de pontos e as respectivas direcções de desenvolvimentos das estrada a detectar. Recorre-se ainda ao algoritmo F^* (Merlet e Zerubia 1996) para a optimização do traçado a extrair, quando são seleccionados mais do que um ponto da estrada. A selecção de inúmeros pontos permite uma detecção mais supervisionada, conduzindo a melhores resultados do processo de detecção, principalmente em zonas das imagens aéreas de maior complexidade.

Os métodos semi-automáticos podem, no entanto, derivar para métodos automáticos, desde que o próprio sistema seja capaz de identificar, nas imagens aéreas, os pontos iniciais para o processo de detecção. Um exemplo da abordagem referida é observado em (Cooper, Cohen, Barzohar, e Ziskind 1997), estimando-se os pontos iniciais para o processo de detecção, com base no cálculo de histogramas dos valores de tonalidade de

¹⁹Informação extraída do site <http://www.photo.verm.tu-muenchen.de/roads/road-extr.html> (Abril 1999).

²⁰Exemplos da extracção semi-automática de estradas podem ser lidos recorrendo à bibliografia indicada em (Steger, Glock, Eckstein, Mayer, e Radig 1995).

cinzento.

Os processos automáticos de extracção de estradas são caracterizados por uma menor intervenção humana. Recorre-se às técnicas de processamento de imagem e às metodologias da visão por computador, para classificar e interpretar a informação existente nas imagens aéreas. Os resultados obtidos pelos processos automáticos nem sempre produzem resultados satisfatórios, obrigando, por vezes, a uma posterior edição por parte do operador do sistema. A optimização do processo, em contraste com os métodos semi-automáticos está, desta forma, mais orientada para a melhoria dos algoritmos utilizados, quer em termos de tempo de processamento, quer em termos da qualidade dos resultados obtidos.

O processo de extracção automática de estradas é influenciado por vários factores, dos quais destaca-se a resolução da imagem (English, Heipke, Reinhart, e Ebner 1996). A resolução da imagem ²¹ está em proporção inversa da dimensão entre dois *pixel*, ou seja, uma imagem de alta resolução apresenta uma dimensão reduzida do *pixel*, enquanto que uma imagem de baixa resolução apresenta uma dimensão elevada do *pixel*. Este facto influencia o método de aquisição dos objectos que se pretendem extrair da imagem.

Uma estrada numa imagem com uma resolução de 0,25m entre dois *pixel*, é uma região relativamente homogénea, apresentando uma diferença de brilho significativa em relação às regiões envolventes. Numa imagem com uma resolução de 2m entre dois *pixel*, a mesma estrada é vista como uma linha (Steger, Eckstein, e Wiedemann 1996).

3.3.1. Extracção Automática a Partir de Imagens de Alta Resolução

As imagens de alta resolução ²², permitem obter informação de grande qualidade e detalhe. No entanto, aumentam consideravelmente os tempos de processamento e obrigam a um estudo cuidadoso dos processos de raciocínio de alto nível, aplicados à informação resultante do processamento de imagem de baixo nível. A Figura 3.1 ilustra os diferentes métodos de extracção de objectos a partir de imagens aéreas digitais de alta resolução.

As abordagens utilizadas para a extracção de estradas a partir de imagens aéreas digitais de alta resolução, adoptam, em geral, uma estratégia em duas fases. A primeira fase consiste na determinação automática de pontos ou pequenos troços de estradas, tal como se os mesmos fossem seleccionados, sobre a imagem aérea, pelo operador do

²¹A resolução de uma imagem é caracterizada pela distância entre dois *pixel*, dimensão essa que é traduzida em unidades de comprimento relativamente à área sobre a qual foi adquirida a imagem. Por exemplo, uma imagem de uma área à superfície da Terra com uma resolução de 0,5m entre dois *pixel*, significa que a formação do *pixel* da imagem integra informação de uma zona quadrada da área em estudo, com uma dimensão no solo de 0,5m por 0,5m.

²²Embora não exista uma referência específica no que diz respeito à classificação de imagens aéreas digitais em termos da sua resolução, adopta-se a seguinte classificação (Baumgartner, Steger, Mayer, Eckstein, e Ebner 1999): imagens de alta resolução cuja distância entre *pixel* é inferior a 0,5 metro; imagens de baixa resolução cuja distância entre *pixel* é superior a 2 metros.

3. DETECÇÃO DE OBJECTOS LINEARES A PARTIR DE IMAGENS AÉREAS

sistema. Em geral recorre-se, nesta fase, a métodos que se baseiam em reconhecimento de padrões e em contornos, utilizando essencialmente conhecimento geométrico e radiométrico elementar: paralelismo e distância entre os contornos; comprimento dos troços; análise do perfil da região da imagem na perpendicular ao desenvolvimento da estrada. Com base nos resultados obtidos na primeira fase, a segunda fase do processo de extracção baseia-se fundamentalmente em métodos de seguimento de estradas ou contornos activos (*snakes*). São exemplos da metodologia referida os trabalhos realizados por (McKeown e Denlinger 1988), (McKeown 1990) e (Ruskoné 1996). Para além do

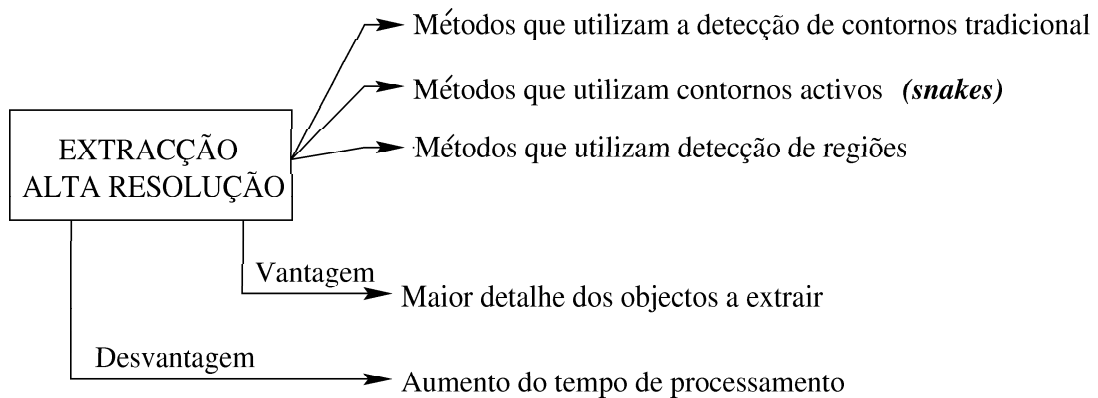


Figura 3.1.: O diagrama da figura resume os principais métodos de extracção de objectos lineares a partir de imagens aéreas digitais de alta resolução. Enunciam-se também a principal vantagem e a principal desvantagem da abordagem referida.

conhecimento geométrico e radiométrico integrado no processo de detecção de estradas a partir de imagens aéreas digitais de alta resolução, a utilização de MDT's ²³ é cada vez mais assumida nas metodologias mais recentes (Steger e Eckstein 1996). A integração de informação topográfica com os resultados obtidos pelos processos automáticos de detecção de estradas, tem-se revelado uma metodologia algo eficaz na eliminação das falsas hipóteses para troços de estradas, principalmente em imagens urbanas, eliminando-se as primeiras hipóteses para troços de estradas quando a diferença de cotas exceder, na zona do troço, um determinado limiar.

A informação contextual contida numa imagem aérea de alta resolução revela-se também importante, (Baumgartner, Steger, Mayer, e Eckstein 1997), (Mayer, Laptev, Baumgartner, e Steger 1997) e (Hinz, Baumgartner, Steger, Mayer, Eckstein, Ebner, e Radig 1999). Em (Hinz, Baumgartner, Steger, Mayer, Eckstein, Ebner, e Radig 1999), por exemplo, definem-se três grupos de contexto para o processo de extracção de estra-

²³Sigla portuguesa para **modelo digital de terreno**. É também utilizada outra designação com o mesmo objectivo: **modelo numérico de terreno** ou **modelo numérico topográfico**. Para ambas as designações utiliza-se a sigla **MNT**.

das: contexto urbano; contexto rural e contexto florestal. Em cada contexto utilizam-se diferentes estratégias e métodos de detecção.

Métodos que Utilizam Detecção de Contornos Tradicional

No modelo de extracção automática de estradas a partir de imagens aéreas de alta resolução utilizado em (Steger, Eckstein, e Wiedemann 1996), as mesmas são entendidas como zonas da imagem que apresentam uma diferença de brilho acentuada em relação às áreas que a envolvem, sendo utilizado um algoritmo de detecção de contornos para a extracção das linhas definidoras dos seus limites, baseado no algoritmo modificado de (Lanser e Eckstein 1992), que é derivado do método proposto por (Canny 1986). Os limites obtidos são posteriormente melhorados através da **supressão de não-máximos**. Alguns dos contornos extraídos são depois eliminados por **aproximação poligonal** (Sonka, Hlavac, e Boyle 1993) com recurso ao algoritmo descrito em (Ramer 1972). O método passa então para a identificação da relação de paralelismo entre os contornos processados, já que se introduz o conhecimento de que os limites das estradas são em geral paralelos. Após a determinação dos contornos que apresentam a relação de paralelismo, identificam-se de seguida aqueles que delimitam uma região de intensidade constante.

A detecção de contornos é utilizada para a extracção das margens de uma estrada. Canny propõe em 1983 uma abordagem à detecção de contornos que otimiza os três critérios propostos pelo autor, para variações abruptas da função imagem, (Sonka, Hlavac, e Boyle 1993, Secção 4.3.5) e (Canny 1986). Deriche apresenta em 1990 uma modificação à abordagem realizada por Canny, aumentando o desempenho computacional à base de filtros digitais recursivos (Deriche 1990). Em 1992, Lanser e Eckstein concluem os trabalhos que conduzem a uma modificação da abordagem realizada por Deriche. Esta nova abordagem elimina erros sistemáticos existentes no cálculo da amplitude dos contornos ²⁴, e que dependem da direcção dos mesmos, (Lanser e Eckstein 1992) e (Caeiro e Piedade 1995).

Métodos que Utilizam Contornos Activos

Uma outra forma de atacar o problema da extracção de estradas a partir de imagens aéreas digitais de alta resolução, são os métodos baseados em *snakes*. As *snakes*, também designadas por *Active Contour Models* (Sonka, Hlavac, e Boyle 1993), foram introduzidas em (Kass, Witkin, e Terzopoulos 1987) como abordagem do processo de extracção de contornos, tirando partido do conhecimento introduzido pelo utilizador do sistema sobre a posição aproximada e a forma do contorno que se pretende obter. Uma das vantagens apontadas às *snakes* em relação a outros métodos de extracção de objectos lineares, é que as propriedades geométricas dos elementos a detectar podem ser introduzidas no processo de procura do contorno de modo a conduzir o processo de extracção. A

²⁴O cálculo da amplitude dos contornos é efectuado com o recurso ao gradiente da função imagem.

introdução destas propriedades é feita no modelo, sobre a forma de restrições. As *snakes* são, no entanto, utilizadas não só para a extracção dos limites das estradas, mas também para a extracção dos seus eixos de via²⁵. Em (Fua e Leclerc 1990) pode observar-se um exemplo de aplicação de *snakes*, quer para a delineação de limites de estradas, quer para a obtenção dos seus eixos de via.

Para além das restrições geométricas passíveis de serem introduzidas e utilizadas nas *snakes* durante o processo de extracção de objectos lineares, e que podem ser por exemplo, as variações de curvatura de uma estrada ou as variações de largura das mesmas, podem introduzir-se, também, as restrições fotométricas. Neste caso, as *snakes* são forçadas a seguir linhas que apresentem um elevado valor do gradiente da imagem, assumindo um valor máximo no ponto de passagem da *snake* (Fua e Leclerc 1990).

Os métodos de extracção de estradas baseados em *snakes* podem, de uma certa forma, ser encarados como métodos automáticos para a extracção de estradas. No entanto, não o são. Considerando-se que os métodos baseados em *snakes* necessitam de menos parâmetros iniciais para o início do processo de extracção, em relação aos métodos semi-automáticos de extracção de estradas (Mayer, Laptev, Baumgartner, e Steger 1997), os primeiros classificam-se, por vezes, como um processo automático. A redução da complexidade inicial do procedimento de extracção é apenas conseguida recorrendo a uma abordagem modificada dos métodos baseados em *snakes* tradicionais, e que se denominam de *ziplock snakes* (Fua, Kubler, Newenschwander, e Székely 1995). Em (Mayer, Laptev, e Baumgartner 1998), permite-se que o processo de extracção se inicie apenas com a selecção de dois pontos extremos da estrada, extraídos a partir de uma imagem aérea.

As vantagens apontadas aos métodos de extracção de estradas baseados em *snakes*, são a reduzida complexidade do algoritmo que os mesmos apresentam relativamente a outros métodos, já que a detecção apenas se centraliza na obtenção de contornos paralelos (Mayer, Laptev, e Baumgartner 1998), não sendo necessária informação sobre a superfície das estradas.

Os métodos baseados em *snakes* não efectuem uma análise localizada da superfície de uma estrada. Deste modo, a extracção de **estradas não visíveis**²⁶ é efectuada introduzindo restrições — geométricas²⁷ e radiométricas²⁸ — no modelo, que auxiliam o processo de extracção. Tais restrições, podem conduzir à obtenção de soluções não exactas para o traçado validado de um troço de estrada (Fua e Leclerc 1990).

Por outro lado, os métodos tradicionais da detecção de contornos — o detector de

²⁵Em sistemas de informação geográfica, as estradas são modeladas pelos seus eixos de via, que são os tipos de dados espaciais que melhor as caracterizam dentro destes sistemas, por forma a que se possa realizar sobre elas análises de redes, após criada a topologia respectiva (Aronoff 1995).

²⁶Entenda-se **estradas não visíveis** como troços de estradas cujo traçado não está verdadeiramente perceptível devido, por exemplo, à existência de sombras.

²⁷São exemplos de restrições geométricas: baixa curvatura e largura constante.

²⁸A fixação de um valor para amplitude de um contorno — o valor do gradiente da função imagem — é um exemplo de uma restrição radiométrica.

contornos de Canny (Canny 1986) — extraem demasiados contornos irrelevantes (Fua e Leclerc 1990) e (Mayer, Laptev, e Baumgartner 1998), e apresentam também alguns problemas na extracção dos pontos que delimitam zonas da imagem que apresentem fraco contraste, conduzindo, por vezes, à extracção de troços lineares descontínuos, pois os métodos tradicionais não permitem a introdução das restrições geométricas e radiométricas, sendo necessário executar uma detecção localizada para diferentes níveis de limiar de aceitação (Mayer, Laptev, e Baumgartner 1998).

Os métodos baseados em *snakes* não resolvem automaticamente o problema da detecção de objectos lineares, pois estão dependentes de uma interação com o utilizador ²⁹, e de um elevado conhecimento geométrico e radiométrico dos objectos a extrair. Há ainda a necessidade de interagir com um processo de compreensão da imagem de alto nível ³⁰, e dispôr de informação relativa ao tempo e ao espaço associado aos dados a extrair da imagem (Sonka, Hlavac, e Boyle 1993).

Métodos que Utilizam Detecção de Regiões

Barzohar e Cooper (Barzohar e Cooper 1996), apresentam uma abordagem geométrico-estocástica para a realização de um modelo automático de extracção de estradas a partir de imagens aéreas. Este modelo ³¹, dá ênfase à extracção de estradas que podem apresentar variações consideráveis na sua curvatura, na sua largura, no valor do tom de cinzento e na amplitude do contorno. Considera, também, a existência de um separador central delimitador de vias.

A abordagem proposta pelos autores, conduz à construção de modelos geométrico-estocásticos para a representação de estradas, utilizando uma estimação probabilística de **máximo a posteriori (MAP)** ³² das margens de uma estrada, e de outras propriedades relevantes na imagem. A implementação computacional da estimação global MAP é realizada através do uso da técnica da programação dinâmica ³³. Utiliza-se a programação dinâmica para a identificação de *pixel* candidatos a estradas, dentro de pequenas janelas da imagem. A programação dinâmica é também utilizada com pequenas janelas para obter a estimação global.

Informação contextual pode ser integrada no modelo de modo a lidar-se com a panóplia de situações, existentes em diversas imagens. Um exemplo que traduz a necessidade de informação contextual, está relacionado com a detecção de troços de estrada de dimensões reduzidas, que facilmente se confundem com outros elementos, como é caso das coberturas.

²⁹Seleção de pontos da estrada na imagem.

³⁰Forte conhecimento das características geométricas dos objectos.

³¹O modelo descrito tem como base o trabalho anteriormente desenvolvido pelos mesmos autores (Barzohar e Cooper 1995).

³²Minimização do erro entre o valor estimado de uma variável e o valor real da mesma variável (Therrien 1992, Secção 6.3).

³³A programação dinâmica é um método de optimização baseado no **princípio da optimalidade** (Sonka, Hlavac, e Boyle 1993).

3.3.2. Extracção Automática a Partir de Imagens de Baixa Resolução

A literatura científica refere também a detecção de estradas a partir de imagens aéreas digitais de baixa resolução. Neste tipo de imagem, as estradas interpretam-se como estruturas lineares que apresentam de certa forma uma intensidade constante e diferente da área que as rodeia, pelo que os métodos que executam a sua extracção têm diferenças significativas dos já anteriormente referidos, vidé a Figura 3.2.

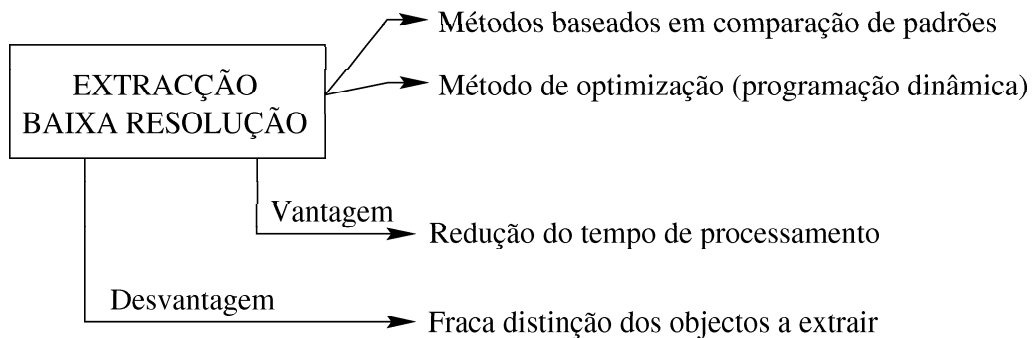


Figura 3.2.: O diagrama da figura resume os principais métodos de extracção de objectos lineares a partir de imagens aéreas digitais de baixa resolução. Enunciam-se também a principal vantagem e a principal desvantagem da abordagem referida.

Salienta-se de imediato, que a redução de detalhe que as imagens apresentam, pode levar, à partida, a concluir que a extracção de estradas a partir deste tipo de imagens pode ser desvantajosa, já que um rio, por exemplo, apresenta a mesma forma de uma estrada, e um algoritmo que execute a extracção de objectos lineares irá extrair os dois objectos (Merlet e Zerubia 1996).

Determinada informação que é tida em conta no processo de extracção de estradas em imagens de alta resolução torna-se aqui irrelevante, já que em imagens cuja resolução espacial seja de, por exemplo, 2m entre dois *pixel*, uma estrada pode apresentar uma largura inferior a quatro *pixel* (Steger, Glock, Eckstein, Mayer, e Radig 1995) sendo neste caso impraticável a identificação dos limites da mesma.

Apesar dos pontos anteriormente focados, a grande vantagem da detecção de objectos lineares a partir de imagens aéreas de baixa resolução está associada à eliminação de um conjunto de problemas, que têm de ser tidos em conta na extracção de estradas a partir de imagens de alta resolução como, por exemplo, carros na estrada ou determinadas sombras parciais provocadas por árvores (Steger, Glock, Eckstein, Mayer, e Radig 1995). A abstracção de tais casos especiais conduzem assim a um menor processamento computacional, fazendo com que os algoritmos se tornem menos complicados, sendo assim possível obter resultados num tempo mais curto (Meyer e Steger 1996).

Métodos Baseados em Comparação de Padrões

Os algoritmos pioneiros de extracção de estradas a partir de imagens aéreas de baixa resolução, baseiam-se fundamentalmente em operações de limiar, em que se pressupõe que as estradas apresentem um certo valor de tonalidade de cinzento, e se atribui aos *pixel* que se encontram dentro do intervalo respectivo o valor um, e zero aos restantes (o fundo).

As estradas são extraídas a partir de uma comparação entre os resultados obtidos por limiar e um conjunto de padrões previamente definidos e relativos a objectos lineares. Alguma correcção aos resultados é executada com base em considerações geométricas, como por exemplo, a introdução de conhecimento de que as estradas apresentam um determinado comprimento, o que conduz à eliminação de troços muito pequenos, e a algumas restrições relacionadas com curvaturas (Bajcsy e Tavakli 1976).

Programação Dinâmica

Em termos gerais, o processo de classificação de objectos a partir de imagens aéreas digitais de baixa resolução, realiza-se com base em dois grandes grupos de objectos (Fischler e Wolk 1981): o primeiro em que todos os objectos extraídos têm elevada probabilidade de serem classificados como estradas, não garantindo, no entanto, que todas as estradas da imagem sejam detectadas; o segundo grupo representando o conjunto de todos os objectos extraídos a partir da imagem aérea de baixa resolução, que tem uma elevada probabilidade de incluir todas as estradas da mesma, incluindo também objectos que não são estradas. Com base nos dois conjuntos obtidos determinam-se os custos associados ao processo de detecção, vide a Figura 3.3.

(Fischler e Wolk 1981) consideram no processo de classificação de objectos a partir de imagens de baixa resolução, um método de minimização de uma função de custo. Obtêm contornos com o operador de estradas **D**uda **R**oad **O**perator (DRO), com determinação automática do limiar de classificação. A função de custo é definida recorrendo ao nível de intensidade de cinzentos no caso de contornos classificados sem falsa detecção (erro do tipo II). No caso em que se consideram contornos classificados sem falso alarme (erro do tipo I) a função assume o valor zero. A minimização da função de custo é realizada através da programação dinâmica, ou seja, o algoritmo de **F*** encontra as linhas através da minimização desta função.

(Merlet e Zerubia 1996) Apresentam uma formalização matemática do algoritmo **F*** que permite estender a função de custo à configuração de mais de dois pontos (para lidar com o contraste), e vizinhança de dimensão superior a um para lidar com a curvatura. Assim, toda a informação necessária (contraste, nível de cinzento e curvatura), é sintetizada numa função de custo única definida na imagem digital original ³⁴.

No entanto, a abordagem descrita não é considerada verdadeiramente automática, já que obriga à introdução de pontos na imagem para se dar início ao processo de detecção.

³⁴São utilizadas imagens SPOT com uma distância entre dois *pixel* de 10m

3. DETECÇÃO DE OBJECTOS LINEARES A PARTIR DE IMAGENS AÉREAS

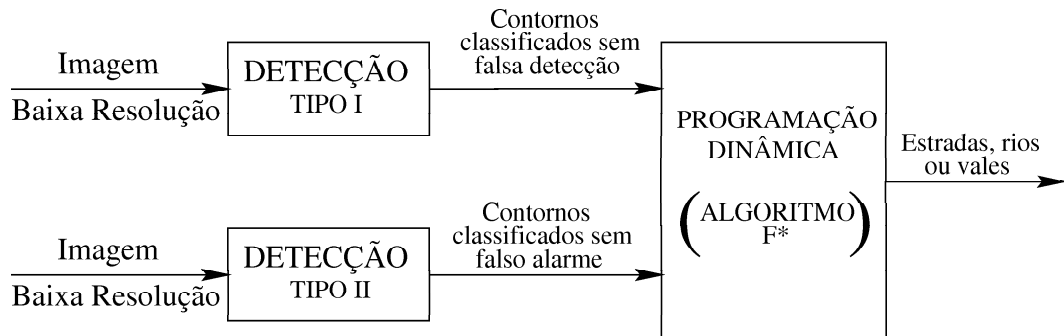


Figura 3.3.: O diagrama da figura exemplifica o processo de detecção de estradas a partir de imagens digitais SPOT de baixa resolução desenvolvido em (Fischler e Wolk 1981).

Após a identificação dos pontos referidos, o algoritmo toma assim conhecimento de pontos da estrada a detectar e traça um caminho entre os mesmos. Adicionalmente, os pontos indicados no início do processo de detecção têm de ser do mesmo troço de estrada em que se está a operar, já que se assim não for, é obtido um traçado que não é o correcto.

Outros métodos

Uma abordagem mais recente está defendida em (Steger 1996), que considera uma representação local da imagem por meio de uma aproximação polinomial, estimando-se para cada *pixel* o valor dos coeficientes do polinómio de Taylor de segunda ordem, recorrendo à estimativa das derivadas parciais de primeira e de segunda ordem, obtidas pela convolução da imagem com máscaras gaussianas. Os pontos que correspondem à linha e que representam o traçado a extrair:

- apresentam uma derivada direccional perpendicular à direcção da linha;
- a direcção da linha é determinada a partir da matriz HESSIANA do polinómio de Taylor.

O método apresentado é verdadeiramente automático, mas não resolve o problema da conexão entre troços, problema este que se torna real para uma estrada que não é detectada na íntegra, em virtude da existência de zonas da imagem de pouca visibilidade ou fraco contraste provocadas, por exemplo por sombras, problema este que pode ser resolvido através da utilização de *snakes* (Mayer, Laptev, e Baumgartner 1998). Um outro exemplo da ligação entre troços, a partir da selecção, sobre a imagem aérea, dos pontos iniciais para o processo da detecção, pode ser observado em (Ruskoné 1996), utilizando-se restrições geométricas, nomeadamente de curvatura.

Uma outra metodologia para a detecção automática de troços de estradas está proposta em (Netanyahu, Philomin, Rosenfeld, e Stromberg 1997), recorrendo-se ao uso de estimadores robustos, para a detecção de troços de estradas a partir de imagens aéreas com elevado ruído. A determinação dos *pixel* que apresentam um desenvolvimento geométrico linear é efectuada recorrendo à utilização de um operador local não linear denominado por *Duda Road Operator* (DRO). A detecção dos troços que apresentam um desenvolvimento rectilíneo e a detecção dos troços que apresentam um desenvolvimento curvilíneo é distinta, e é realizada com o recurso às técnicas de estimação robusta, apenas utilizadas em (Mukherjee, Parui, Chaudhuri, e Rao 1994). O método mostra uma boa aplicabilidade, mas não resolve o problema da ligação entre os troços detectados.

Árvores de decisão são usadas em (Geman e Jedynak 1996) também para a detecção de estradas, a partir de imagens SPOT ³⁵ pancromáticas com uma resolução de 10 metros entre dois *pixel*. Apesar do sucesso demonstrado, não é no entanto um método automático, já que é necessário que o operador do sistema selecione um ponto de início da extracção ³⁶ e uma direcção de desenvolvimento da estrada a detectar.

3.3.3. Extracção Multi-Resolução

Refere-se na Secção 3.3.2, a extracção de estradas a partir de imagens digitais de baixa resolução como sendo caracterizada por uma modelação mais moderada, em virtude da ausência de influências perturbadoras, como por exemplo, presença de carros, determinadas sombras parciais, entre outras (Steger, Eckstein, e Wiedemann 1996). No entanto, a baixa resolução da imagem pode não permitir obter uma **precisão espacial** ³⁷ razoável. É grande a probabilidade de obter falsas hipóteses para o traçado de estradas ³⁸.

A base de informação para a extracção de estradas a partir de imagens aéreas digitais de alta resolução é bastante mais sólida, e apresenta como grande vantagem a obtenção de informação com uma maior precisão espacial. Por outro lado, torna-se necessário elaborar laboriosamente um algoritmo, que seja capaz de entrar em linha de conta com o maior número de pormenores existentes na imagem ³⁹.

Uma abordagem ao problema da extracção de estradas e que reúne algum consenso

³⁵ *Système Pour L'Observation de la Terre*. Satélite de detecção remota francês que opera em modo multiespectral ou pancromático, em que no primeiro modo detecta três bandas do espectro electromagnético (uma verde, uma vermelha e uma no infravermelho próximo, com uma resolução espacial de 20 metros), e no segundo modo permite obter apenas uma imagem com uma resolução espacial de 10 metros. Permite a obtenção de imagens estereoscópicas, em virtude da sua capacidade de direccionamento

³⁶ O ponto inicial a seleccionar tem de ser um ponto da estrada.

³⁷ A **precisão espacial** deve ser entendida como exactidão na posição geográfica de um objecto.

³⁸ O algoritmo apresentado em (Merlet e Zerubia 1996) não faz distinção entre a extracção de estradas e rios.

³⁹ O conceito de **abstracção** é muitas vezes empregue. Alguns pormenores existentes nas imagens aéreas digitais de alta resolução não devem ser tidos em conta pelo algoritmo, ou seja, o algoritmo tem de ser capaz de os abstrair durante o processo de extracção.

3. DETECÇÃO DE OBJECTOS LINEARES A PARTIR DE IMAGENS AÉREAS

científico, consiste na integração dos resultados, quer obtidos a partir de imagens aéreas digitais de alta resolução, quer obtidos a partir de imagens aéreas digitais de baixa resolução, tal como se pode constatar em (Baumgartner, Steger, Mayer, Eckstein, Wiedemann, e Ebner 1996), (Steger, Glock, Eckstein, Mayer, e Radig 1995), (Mayer, Steger, Wiedemann, e Ebner 1995), (Baumgartner, Steger, Mayer, e Eckstein 1997), (Mayer, Laptev, Baumgartner, e Steger 1997) e (Mayer, Laptev, e Baumgartner 1998). Este conjunto de métodos designam-se por **multi-resolução**, vidé a Figura 3.4.

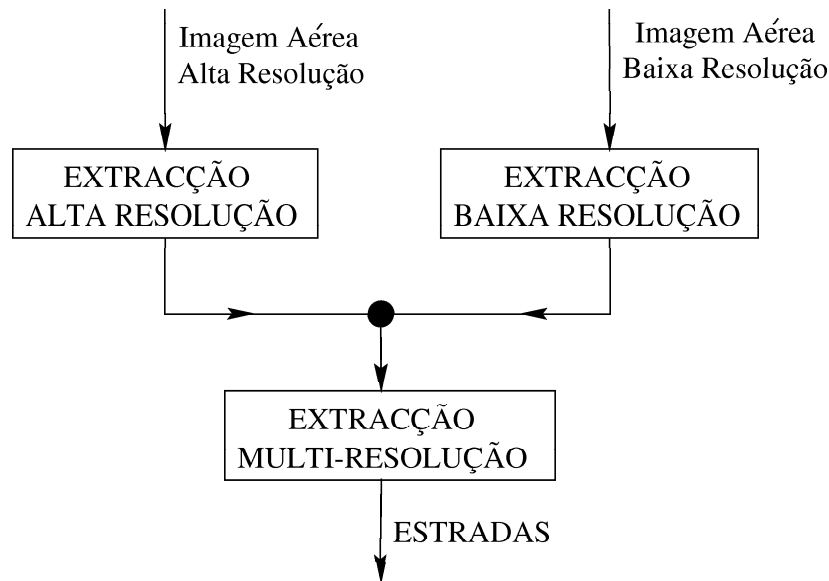


Figura 3.4.: A integração dos resultados obtidos a partir de imagens aéreas digitais de alta e baixa resolução é uma abordagem seguida por variados investigadores. A fusão dos dados tem como base o seguinte princípio: o resultado obtido a partir das imagens aéreas digitais de baixa resolução, é uma primeira hipótese para o eixo de via de um troço de estrada, a ser extraído a partir da imagem aérea de alta resolução.

A extração por multi-resolução aparece assim como uma forma de compensar os problemas obtidos na extração de estradas a partir de imagens aéreas digitais de alta e baixa resolução.

Deste modo, a partir de imagens aéreas digitais de baixa resolução obtém-se uma primeira hipótese para o traçado de eixos de via para as estradas a extrair, e a partir de imagens aéreas digitais de alta resolução obtém-se uma segunda hipótese do traçado das margens das estradas. A integração dos dois resultados obtidos vai conduzir à selecção de margens de troços de estrada obtidas a partir de imagens aéreas digitais de alta resolução que, de acordo com o diagrama da Figura 3.5:

- respeitem um importante tópico relativo ao conhecimento geométrico dos objectos

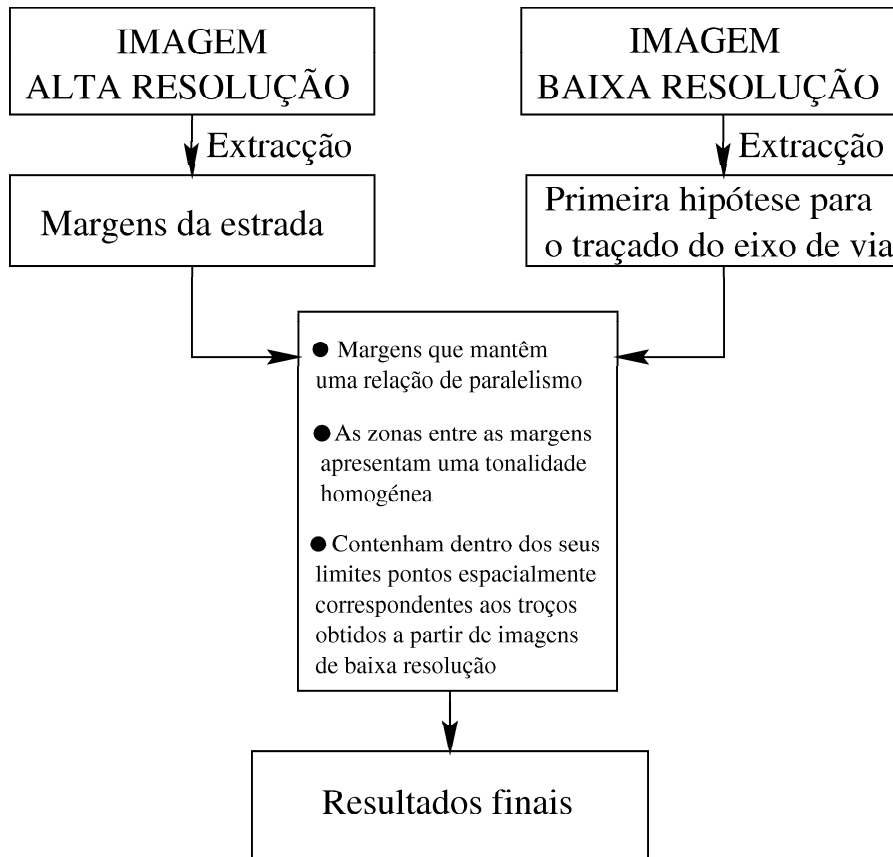


Figura 3.5.: Diagrama representativo do processo de integração dos resultados obtidos a partir de imagens aéreas digitais de alta e baixa resolução, e respectivas condicionantes.

a extrair, nomeadamente a relação de paralelismo existente entre duas margens de um mesmo troço de estrada extraído;

- respeitem também um importante tópico relativo ao conhecimento radiométrico dos objectos a extrair, nomeadamente, a existência de uma zona de tonalidade homogénea entre duas margens de um mesmo troço de estrada extraído;
- e que integrem dentro dos seus limites pontos espacialmente correspondentes aos troços obtidos a partir de imagens aéreas digitais de baixa resolução, ou seja, a utilização dos resultados obtidos a partir de imagens aéreas digitais de baixa resolução para o processo de classificação dos objectos obtidos a partir das imagens aéreas digitais de alta resolução.

A detecção das marcas ⁴⁰ existentes nas estradas é um ponto a ter em conta, já

⁴⁰As marcas em referência são traços contínuos ou interrompidos, separadores das vias na faixa de

3. DETECÇÃO DE OBJECTOS LINEARES A PARTIR DE IMAGENS AÉREAS

que as mesmas podem vir a desempenhar um papel relevante no que diz respeito à sua classificação (Baumgartner, Steger, Mayer, Eckstein, Wiedemann, e Ebner 1996).

rodagem.

Todos os eventos, mesmo aqueles que mercê da sua insignificância não parecem seguir as grandes leis da natureza, são o resultado desta tal como as revoluções do Sol. Na ignorância dos laços que unem tais eventos ao sistema inteiro do Universo, fizeram-se depender de causas últimas ou do azar, dependendo de como ocorrem e se repetem com regularidade, ou aparecem sem olhar à ordem; mas estas causas imaginárias têm regredido gradualmente com os limites que se alargam do conhecimento e desaparecem completamente ante a filosofia correcta, que observa nelas apenas a expressão da nossa ignorância das causas verdadeiras.

Pierre Simon de Laplace^a, No que se refere à Probabilidade

^aPierre Simon, Marquês de Laplace.

4

Extracção das Margens e do Eixo de Via das Estradas

Conteúdo

4.1. Detecção Automática de Estradas	46
4.2. Características das Estradas	47
4.3. O Sistema de Reconhecimento de Estradas	57
4.4. Detecção de Pontos de Contorno para a Extracção das Margens de uma Estrada	60
4.4.1. Detecção de Contornos por Meio de Filtros Lineares	60
4.4.2. Emagrecimento dos Contornos	66
4.5. Agrupamento dos Pontos de Contorno Emagrecidos	69
4.6. A Classificação de Contornos Conexos como Margens de uma Estrada	73
4.6.1. Caso Unidimensional de Classificação de Elementos Conexos	76
4.6.2. Caso Multidimensional de Classificação de Elementos Conexos	78
4.7. Determinação do Eixo da Via	86

4. EXTRACÇÃO DAS MARGENS E DO EIXO DE VIA DAS ESTRADAS

A realização de mapas a partir de imagens aéreas é muito demorada e, apesar da utilização cada vez mais frequente de suportes digitais, comporta elevados custos na fase concreta do mapeamento. Os erros realizados por operadores humanos têm, também, um impacto apreciável na qualidade da informação produzida, *vide* (Walsby 1995).

A investigação dos métodos de extracção automática e semi-automática de objectos, a partir de imagens obtidas de fotografias aéreas ou de satélite, tem dado origem à publicação de vários artigos científicos em revistas e conferências dedicadas ao processamento de imagem, visão por computador e aos sistemas de informação geográfica.

Nos métodos semi-automáticos de extracção de estradas, o operador humano indica à aplicação informática, em geral, alguns pontos iniciais da estrada e as direcções a partir desses pontos. Obtém-se, desta forma, um grande aumento da eficiência da classificação. Esta interacção entre o homem e a aplicação tem sido necessária devido à grande complexidade de muitas das imagens com estradas.

Porém, permanece o objectivo de construir aplicações que extraem, de modo totalmente automático, as estradas a partir de imagens. A sua concretização pode, por exemplo, diminuir o custo de realização e actualização de cartografia digital (uma das bases de informação de um sistema de informação geográfica), ou reduzir consideravelmente o tempo de aquisição de dados para um sistema de informação geográfica. A melhoria da qualidade da informação armazenada em sistemas de informação geográfica, é outra consequência directa da existência de métodos automáticos de extracção de estradas, dada a relação que existe entre a actualização dos dados e a sua qualidade.

A estrutura das imagens aéreas pode ser bastante complexa. A existência de marcações ¹ nas estradas conduz à obtenção de objectos lineares, que têm características geométricas semelhantes às margens de um troço de estrada. A presença de sombras projectadas por árvores ou edifícios torna difícil a extracção de uma ou de ambas as margens de um troço de estrada. A presença de veículos é também um factor prejudicial à extracção automática das margens. A existência de coberturas de edifícios é, em geral, confundida com pequenos troços de estradas ². A complexidade da estrutura das imagens assume ainda outras proporções com a existência de entroncamentos, cruzamentos e rotundas. Em (Bordes, Giraudon, e Jamet 1997) descrevem-se resultados da investigação sobre a influência que os objectos referidos têm no processo de extracção automática de estradas.

Neste capítulo, apresenta-se a realização de um método para a extracção automática das margens de um troço de estrada, e cálculo do respectivo eixo de via, a partir de imagens aéreas digitais de alta resolução (com 256 níveis de cinzento), bem como a sua fundamentação teórica. A Secção 4.1, enuncia as diversas classes de métodos de procura automática de estradas. Identificam-se e caracterizam-se, de uma forma geral, os

¹São em geral identificadas por objectos lineares de cor branca. O seu traçado pode ser contínuo ou interrompido.

²As imagens aéreas de zonas urbanas suscitam maior dificuldade na extracção automática de margens pois apresentam, em geral, maior número de pequenos troços de estradas, capazes de serem confundidos com as coberturas de edifícios.

métodos baseados em contornos, os métodos baseados em regiões, os métodos baseados em detectores de correlação e os métodos geométrico-probabilísticos. A Secção 4.2, descreve o conhecimento introduzido no modelo proposto nesta dissertação e relativo aos objectos em estudo, quer ao nível das suas características reais, quer ao nível das apresentadas numa imagem aérea digital de alta resolução, necessário para o processo de detecção. Identificam-se quatro categorias de conhecimento e caracterizam-se apenas as duas que integram o sistema de visão descrito nesta dissertação, para a extracção das margens de um troço de estrada a partir de imagens aéreas digitais de alta resolução com 256 níveis de cinzento. A Secção 4.3, enuncia as assunções admitidas pelo algoritmo de detecção proposto. O processo constitui-se em duas fases: a primeira em que se obtêm objectos lineares a partir da imagem aérea de alta resolução, com base num algoritmo de detecção de contornos por meio de filtros lineares, posteriormente reduzidos à espessura de um *pixel* e agrupados com base num algoritmo de marcação de componentes conexos; a segunda fase em que os contornos conexos obtidos são classificados, utilizando um reconhecedor estatístico, em duas classes:

- a classe dos conjuntos de pontos que são margem de um troço de estrada;
- a classe dos conjuntos de pontos que não são margem de um troço de estrada.

É objecto da Secção 4.4, a apresentação do detector de contornos de *Canny* que é utilizado nesta dissertação. Desenvolvem-se ainda os métodos de emagrecimento dos contornos obtidos. A ligação dos pontos daí resultante é desenvolvida na Secção 4.5, utilizando-se técnicas de seguimento de pontos de contorno. A Secção 4.6, descreve o processo de classificação de contornos conexos como margens de um troço de estrada, obtidos pela metodologia descrita na Secção 4.4, utilizando um reconhecedor estatístico baseado na análise de um conjunto de propriedades geométricas e radiométricas do modelo de estrada. A Secção 4.7, descreve o processo de obtenção do eixo de via dos troços de estradas detectados, através das suas margens.

4.1. Detecção Automática de Estradas

Na procura automática de estradas a partir de imagens digitais podem compreender-se algumas classes de métodos. Três grandes grupos de métodos locais para procura de estradas aparecem na literatura (Barzohar e Cooper 1996):

- seguimento de contornos;
- métodos de correlação de padrões;
- métodos baseados em regiões;
- métodos geométrico-probabilísticos.

Os métodos de seguimento de contornos utilizam a amplitude e o ângulo do contorno para cada ponto da imagem, e agrupam os contornos de acordo com um determinado critério (McKeown e Denlinger 1988). Outras abordagens baseadas em contornos encontram acolhimento no artigo publicado por (Mayer, Laptev, e Baumgartner 1998), em que se utilizam contornos activos, e por (Steger 1998). Este último autor propõe um método em que se detectam linhas espessas, com base num processo de detecção e seguimento de contornos. Realiza ainda aplicações para além da extracção automática de estradas (caso de imagens de ressonância magnética do cérebro). Os métodos baseados em contornos têm, em geral, várias fases características. A primeira concentra-se na detecção dos pontos do contorno das estradas através de métodos clássicos. A segunda fase é a ligação dos pontos de contorno detectados utilizando, em geral, técnicas de seguimento.

Os detectores de correlação baseiam-se no pressuposto de que existe um padrão, ou textura, na superfície da estrada. A sua utilização em conjunto com técnicas de ligação de contornos é sugerida por (McKeown e Denlinger 1988). Operadores dedicados à extracção de estradas também foram desenvolvidos, tais como o *Duda Road Operator*. Classificadores estatísticos e redes neuronais têm, também, sido usados.

Um método que assume intensidade constante numa região e no seu fundo é utilizado para o seguimento da estrada, usando informação proveniente de correlação de padrões. Este método é um exemplo da utilização de regiões.

Um método global para a extracção de estradas, através da definição do seu ponto inicial e do seu ponto final, é apresentado por (Fischler e Wolk 1981) e melhorado por (Zerubia e Merlet 1993) e por (Merlet e Zerubia 1996), recorrendo à técnica da programação dinâmica. Uma aproximação Bayesiana à estimação de fronteiras de baixo nível e subsequente reconhecimento de objectos é realizada por (Cooper e Sung 1983). No seguimento deste trabalho surge o método proposto por (Barzohar e Cooper 1996) em que se adopta um modelo geométrico-estocástico para a representação das estradas de uma imagem aérea. Utiliza-se uma estimação de *maximum a posteriori*, típica das aproximações Bayesianas.

4.2. Características das Estradas

Ao iniciar-se o estudo conducente à realização do modelo de extracção das margens de um troço de estrada, tem-se a fase da estruturação do conhecimento sobre os objectos a extrair, quer ao nível das suas características reais, quer ao nível das apresentadas numa imagem aérea.

Em (Steger, Glock, Eckstein, Mayer, e Radig 1995), o conhecimento integrado num sistema de visão para a extracção de estradas a partir de imagens aéreas está agrupado em quatro categorias: conhecimento geométrico, radiométrico, topológico e de contexto. De todas as categorias referidas, destacam-se as duas primeiras: geométricas e radiométricas.

Uma estrada é formada por um conjunto de alinhamentos rectos que são unidos por

alinhamentos curvos, sendo os alinhamentos curvos compostos por dois troços denominados clotóides³ e um troço circular⁴, em que as clotóides se dispõem uma à entrada e outra à saída do troço circular, vidé a Figura 4.1. Esta disposição de troços curvos evita uma transição brusca entre dois alinhamentos rectos, facto este que apenas é contrariado em cruzamentos e entroncamentos, verificando-se uma transição abrupta.

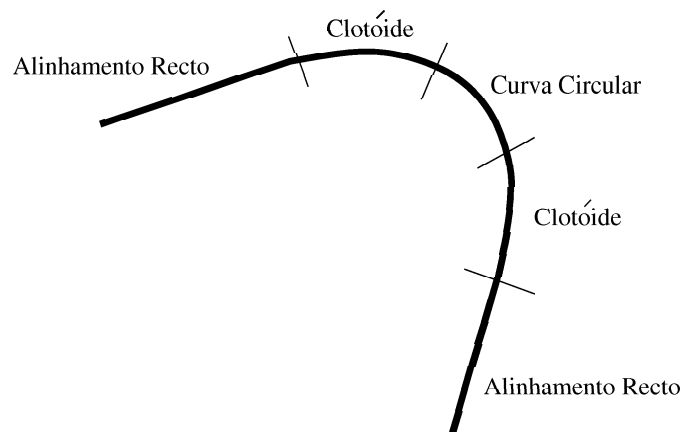


Figura 4.1.: Os elementos geométricos que compõem a directriz de um troço de uma estrada englobam-se em dois grupos: alinhamentos rectos e alinhamentos curvos. A concordância entre os alinhamentos rectos é realizada por alinhamentos curvos. Os alinhamentos curvos são de dois tipos: curva circular (raio constante) e clotóide (curva de raio variável). A figura ilustra a relação espacial, existente entre os elementos geométricos que compõem a directriz de um troço de estrada.

O conhecimento geométrico de estradas integrado no modelo descrito nesta dissertação sintetiza-se:

- as estradas são objectos na imagem que apresentam um desenvolvimento linear;
- as suas margens são paralelas;
- a sua largura é aproximadamente constante.

Algumas contradições ao exposto são observáveis em cruzamentos, entroncamentos, zonas de estacionamento, rotundas, etc.. Por exemplo, nas zonas de cruzamento o desenvolvimento linear da estrada é interrompido pelo aparecimento de um ou mais troços de estradas cujo traçado é, em geral, perpendicular ao referido desenvolvimento. Por

³Curvas de raio variável. O raio varia entre infinito e o valor do raio da curva circular que lhe é adjacente.

⁴Curvas de raio constante.

outro lado, as margens dos troços de estradas não se mantêm paralelas, e uma determinada margem de um troço de estrada passa a ser margem de outro troço de estrada que lhe é concorrente. Adicionalmente, uma margem de um troço de estrada apresenta um raio de curvatura muito pequeno na zona de cruzamento, quando comparado, por exemplo, com o raio de curvatura ⁵ de um troço de estrada curvo. A variação abrupta da distância entre duas margens de um mesmo troço de estrada na zona de cruzamento, é outro factor facilmente observável através da análise da Figura 4.2.

Deste modo, tais situações degradam a qualidade dos resultados obtidos da detecção automática das margens de um troço de estrada a partir de uma imagem aérea de alta resolução, tornando-se necessário introduzir conhecimento adicional ao conhecimento geométrico exposto anteriormente o que aumenta, também, a dificuldade da respectiva classificação.

Outra situação que contradiz o conhecimento exposto anteriormente, são as sombras provocadas por árvores ou edifícios, impedindo a determinação da localização correcta das margens de uma estrada. As sombras são parciais (vidé a Figura 4.3) ou totais (vidé a Figura 4.4), no que diz respeito à aquisição de dados sobre as margens de troços de estradas inseridos numa imagem aérea de alta resolução.

Uma sombra parcial impede o reconhecimento completo de uma das margens de um troço de estrada. Os pontos de contorno não detectados, mercê desta sombra, podem ser obtidos com base nos pontos da margem oposta à considerada, e que se apresentam a uma distância igual à largura do troço de estrada em causa.

No caso de uma sombra total, em que não é possível obter ambas as margens, obtêm-se troços de estrada distintos, que têm de ser unidos de acordo com métodos contextuais de junção de contornos.

Deste modo, estas situações degradam a qualidade dos resultados obtidos através da detecção automática das margens de um troço de estrada a partir de uma imagem aérea digital de alta resolução, tornando-se necessário introduzir conhecimento radiométrico adicional ao conhecimento geométrico exposto anteriormente, aumentando ainda mais a dificuldade da respectiva classificação.

Os diferentes materiais constituintes das superfícies das estradas, como por exemplo o asfalto, o betão e a terra batida ⁶, apresentam em geral propriedades espectrais diferentes, relativamente a outros materiais existentes à superfície da Terra. Tais propriedades constituem conhecimento radiométrico, integrado no modelo descrito neste documento:

- as estradas são objectos na imagem que apresentam um brilho aproximadamente constante na direcção do seu desenvolvimento em planta ⁷;
- em geral, o brilho é distinto em relação às zonas da imagem que rodeiam a estrada.

⁵Os raios de curvatura de um troço de estrada curvo são função da velocidade de circulação dos veículos, de acordo com a legislação em vigor.

⁶Destaque-se, como exemplo, as estradas florestais.

⁷Em Engenharia Civil, à direcção do desenvolvimento em planta de uma estrada dá-se o nome de **directriz**.



Figura 4.2.: Os cruzamentos introduzem situações que representam alterações das características geométricas de um troço de uma estrada. O troço de estrada que se desenvolve da parte inferior para a parte superior da imagem apresenta uma largura constante, excepto na zona de cruzamento. As linhas definidoras das margens do troço de estrada em referência apresentam-se paralelas, excepto na zona de cruzamento. Adicionalmente, as margens do troço de estrada referido, durante a transposição do cruzamento, passam a margens do troço de estrada que lhe é aproximadamente perpendicular, aumentando assim a complexidade da respectiva classificação. A imagem encontra-se ortorectificada e é um extracto da imagem ilustrada na Figura 4.7.

A presença de veículos, a existência de separadores centrais — nomeadamente em auto-estradas e algumas vias rápidas⁸ —, e de marcas⁹ na faixa de rodagem contradiz, no entanto, o conhecimento radiométrico de que as estradas são objectos na imagem que apresentam um brilho aproximadamente constante, vidé a Figura 4.5. A proximidade de objectos cujo brilho é semelhante ao de uma estrada, contraria o conhecimento radiométrico de que as estradas são objectos que apresentam um brilho distinto em relação

⁸São, em geral, estradas que não têm igual número de faixas de rodagem em relação às auto-estradas, mas que apresentam uma adequada delimitação das suas vias e encontram-se, geralmente, em bom estado. Em Portugal são vulgarmente designadas por IC's e IP's, respectivamente **I**terinários **C**omplementares e **I**terinários **P**incipais.

⁹As marcas em referência são traços interrompidos ou contínuos em geral de cor branca, delimitadores das faixas de rodagem e respectivas vias. Tais marcas são facilmente observáveis em imagens aéreas de alta resolução, vidé a Figura 4.5.



Figura 4.3.: As zonas de sombra nas imagens aéreas não possibilitam, em geral, a aquisição de dados sobre os objectos nela inseridos. Na imagem da figura, pode observar-se a existência de uma sombra provocada por uma árvore (zona central da imagem). A sombra cobre parcialmente o troço de estrada. Recorrendo, por exemplo, à detecção de contornos — uma técnica de processamento digital de imagem — para a extracção das suas margens, obtém-se duas linhas que na zona de sombra não são paralelas. A imagem encontra-se ortorectificada e é um extracto da imagem ilustrada na Figura 4.7.

aos que a rodeiam, vidé a Figura 4.6.

Outra situação a ter em conta no processo de extracção automática de estradas a partir de imagens aéreas de alta resolução, está relacionada com o contexto espacial em que tais objectos se inserem. Uma estrada existente num ambiente **não urbano**¹⁰ está em geral muito mais visível, do que quando integrada num **ambiente urbano**, vidé as Figuras 4.7 e 4.8. Os telhados de vivendas e edifícios — presentes em maior número em imagens urbanas — são, em geral, elementos na imagem que apresentam características geométricas e radiométricas sensivelmente idênticas às já apresentadas nesta secção, pelo que a presença de tais objectos, pode conduzir à obtenção de resultados menos fiáveis. A eliminação de tais interferências obriga à introdução de mais conhecimento no modelo *a priori*, de novo aumentando a sua complexidade matemática, sem a certeza de um aumento substancial de resultados exactos.

Exemplo do conhecimento adicional a integrar num modelo de extracção automática de estradas a partir de imagens aéreas urbanas de alta resolução, é a eliminação de resul-

¹⁰Refere-se, em geral, um ambiente **não urbano** como um **ambiente rural**.

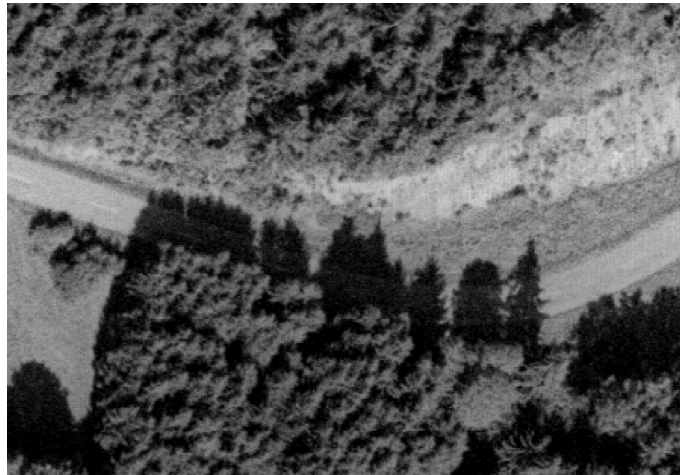


Figura 4.4.: A imagem da figura ilustra uma zona de sombra provocada por árvores, que cobre totalmente uma parte do troço de estrada. Nesta zona, a imagem não contém a informação necessária para o processo de extracção de dados que conduza à definição geométrica correcta das margens do troço de estrada. Na zona de sombra, a diferença de brilho entre os respectivos *pixel* é praticamente nula. A imagem encontra-se ortorectificada e é um extracto da imagem ilustrada na Figura 4.7.

tados que apresentem um comprimento reduzido. Mas a presença de troços de estrada de reduzidas dimensões é uma constante numa área urbana, pelo que o conhecimento exposto pode conduzir à eliminação de troços correctamente extraídos. Tais resultados correspondem, por exemplo, a troços de estrada extraídos a partir de uma imagem aérea urbana, que apresentem um comprimento inferior ao de um telhado (Mayer, Laptev, e Baumgartner 1998). Uma abordagem para a resolução do problema, consiste na integração de dados provenientes da topografia ¹¹ da zona em estudo, eliminando-se apenas os pequenos troços de estradas que apresentam variação de cota acentuadas, ou que a cota seja superior ou inferior que a um valor pré-estabelecido.

Constata-se, assim, que apesar das estradas serem objectos do mundo real que apresentam características em geral bem quantificáveis, o seu aspecto em imagens aéreas é distinto, em virtude das diferentes propriedades nelas existentes, como por exemplo a sua resolução ¹² e a presença de outros objectos, o que aumenta a complexidade da sua

¹¹Apresentando-se as imagens em formato digital, a informação topográfica digital a integrar em tais sistemas assume a forma de um modelo digital de terreno (vulgarmente designado por MDT, ou MNT — modelo numérico de terreno). Para uma melhor qualidade na decisão a tomar — é troço de estrada, ou não é troço de estrada —, o MDT deve ter a mesma resolução que a imagem aérea que contém os troços de estrada a detectar.

¹²A resolução de uma imagem aérea em paralelo com a sua complexidade, são as duas características mais relevantes para a definição de diferentes estratégias a adoptar no processo de extracção automática



Figura 4.5.: Alguns elementos existentes numa imagem aérea modificam a tonalidade uniforme apresentada pelas zonas da mesma que correspondem a um troço de estrada. A imagem da figura ilustra dois elementos que justificam tal afirmação: marcas delimitadoras das faixas de rodagem (zonas da imagem que apresentam um brilho maior que o correspondente ao pavimento do troço de estrada), e veículos (zonas da imagem que apresentam um brilho menor que o correspondente ao pavimento do troço de estrada). A imagem encontra-se ortorectificada e é um extracto da imagem ilustrada na Figura 4.7.

interpretação.

A extracção automática de estradas a partir de **imagens rurais** é em geral menos complexa ¹³, necessitando de menos conhecimento *a priori*, dos objectos em causa. A extracção automática de estradas a partir de imagens aéreas rurais, é o tema abordado neste documento.

A abordagem realizada nesta dissertação resolve a detecção das margens de troços de estrada visíveis ¹⁴ (rectos ou curvos), a partir de imagens aéreas rurais de alta resolução

de objectos (Mayer, Laptev, Baumgartner, e Steger 1997).

¹³A complexidade da extracção automática de estradas a partir de imagens aéreas rurais pode aumentar consideravelmente em zonas densamente povoadas por árvores, em virtude das sombras que as mesmas podem provocar.

¹⁴Ambas as suas margens não são ocultadas por sombras provocadas por árvores ou outros objectos na imagem.

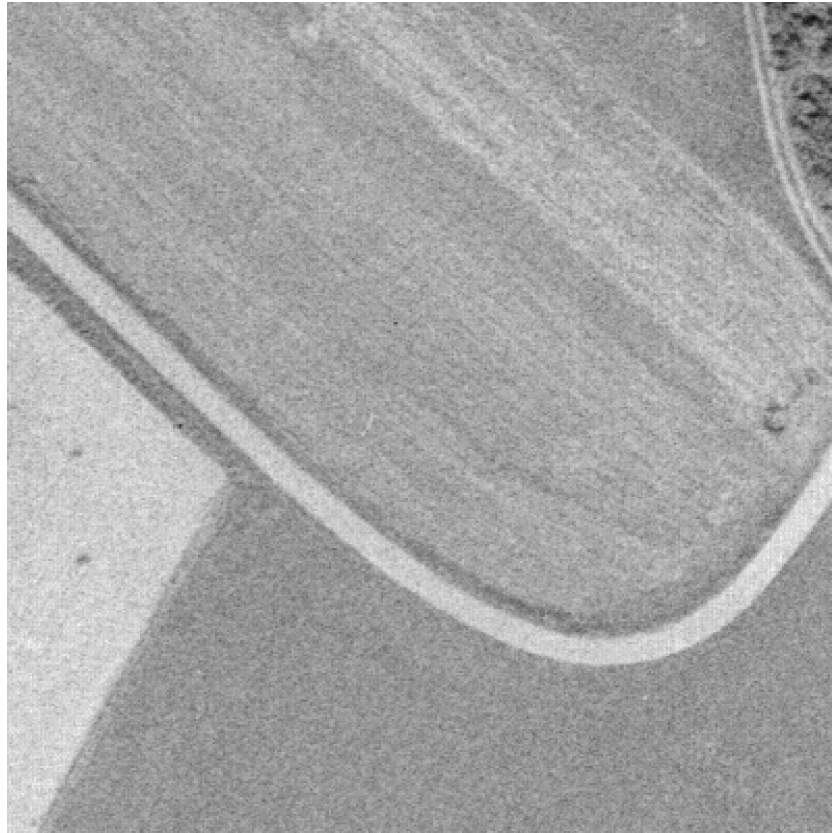


Figura 4.6.: Algumas imagens apresentam zonas de brilho semelhante ao das zonas que representam as estradas. Tais zonas de brilho semelhante podem, ou não, apresentar características geométricas distintas das que caracterizam as estradas, como por exemplo, largura constante, limites paralelos, desenvolvimento linear, etc.. A imagem da figura ilustra o exemplo de uma zona (lado esquerdo do troço de estrada) que apresenta um brilho homogéneo, com um dos seus limites paralelo ao troço de estrada, cujo contorno detectado pode indicar a existência de um falso troço de uma estrada, recorrendo a uma técnica de processamento digital de imagem, concretamente, a detecção de contornos. No entanto, não o é. A rejeição de tal hipótese realiza-se, por exemplo, recorrendo ao conhecimento de que os contornos da estrada a extrair distam de um valor que se situa no interior de um intervalo, traduzido por um valor máximo e um valor mínimo, e pela caracterização da intensidade do nível de cinzento na zona da imagem aérea digital definida pelo troço de estrada. A imagem encontra-se ortorectificada e é um extracto da imagem ilustrada na Figura 4.7.



Figura 4.7.: A imagem da figura ilustra uma zona rural. Nela pode observar-se a baixa complexidade que a mesma comporta, identificando-se com alguma facilidade, através de observação visual, os elementos nela contidos, como por exemplo, as estradas. É uma imagem com 256 níveis de cinzento encontra-se ortorectificada.



Figura 4.8.: A imagem da figura ilustra uma zona urbana. Nela pode observar-se a elevada complexidade que a mesma comporta, pois facilmente pequenos troços de estradas se confundem com, por exemplo, as coberturas dos edifícios. A extracção automática torna-se, deste modo, mais complexa, obrigando à introdução no modelo de um maior conhecimento dos objectos contidos na imagem. É uma imagem com 256 níveis de cinzento e encontra-se ortorectificada.

com 256 níveis de cinzento. A presença de veículos na faixa de rodagem é estudada, bem como a presença de zonas de brilho semelhante ao das zonas que representam os troços de estrada. Não se detectam as margens de troços de estrada ocultados por sombras (parciais ou totais) provocadas por árvores ou outros objectos na imagem aérea digital. O problema dos cruzamentos e entroncamentos não é convenientemente abordado.

4.3. O Sistema de Reconhecimento de Estradas

O método proposto nesta dissertação para a detecção de troços de estrada visíveis, a partir de imagens aéreas de alta resolução com 256 níveis de cinzento, tem duas fases distintas, observáveis através da análise da Figura 4.9: a obtenção de contornos da imagem com base no método baseado na detecção de contornos por meio de filtros lineares; a classificação dos contornos obtidos em margens de um troço de estrada, com recurso a um reconhecedor estatístico baseado na análise de um conjunto de propriedades geométricas e radiométricas do modelo de estrada.

As características radiométricas que os troços de estrada apresentam numa imagem aérea de alta resolução, dependem fortemente da sensibilidade espectral do sensor que as detecta. Dado que a maior parte da informação útil se encontra em imagens aéreas de níveis de cinzento, foi este o formato de imagem escolhido para o trabalho discutido nesta dissertação ¹⁵. As imagens aéreas estudadas pertencem à classe de imagens de alta resolução ¹⁶.

O ponto de partida para a caracterização do processo de extracção, consiste na sistematização do conhecimento sobre os objectos «estradas» contidos na imagem aérea de alta resolução e que se agrupam em duas categorias:

- conhecimento geométrico;
- conhecimento radiométrico.

Em ambas as fases do método proposto, é utilizado conhecimento geométrico e radiométrico relativo aos objectos a detectar, já referido na Secção 4.2. Escolhe-se um modelo probabilístico com as seguintes suposições:

1. a variância da largura da estrada é pequena e de baixo valor;
2. as estradas têm pequena probabilidade de ser curtas;
3. as variações do contraste entre a estrada e o fundo são elevadas;
4. o valor do nível médio de cinzento local da estrada é de variação lenta;

¹⁵As imagens utilizadas nesta dissertação, apresentam 256 níveis de cinzento (oito *bits* de resolução de intensidade), vide o Capítulo 6.

¹⁶As imagens aéreas utilizadas nesta dissertação, apresentam uma resolução espacial de 0,25m entre *pixel*, Capítulo 6.

4. EXTRACÇÃO DAS MARGENS E DO EIXO DE VIA DAS ESTRADAS

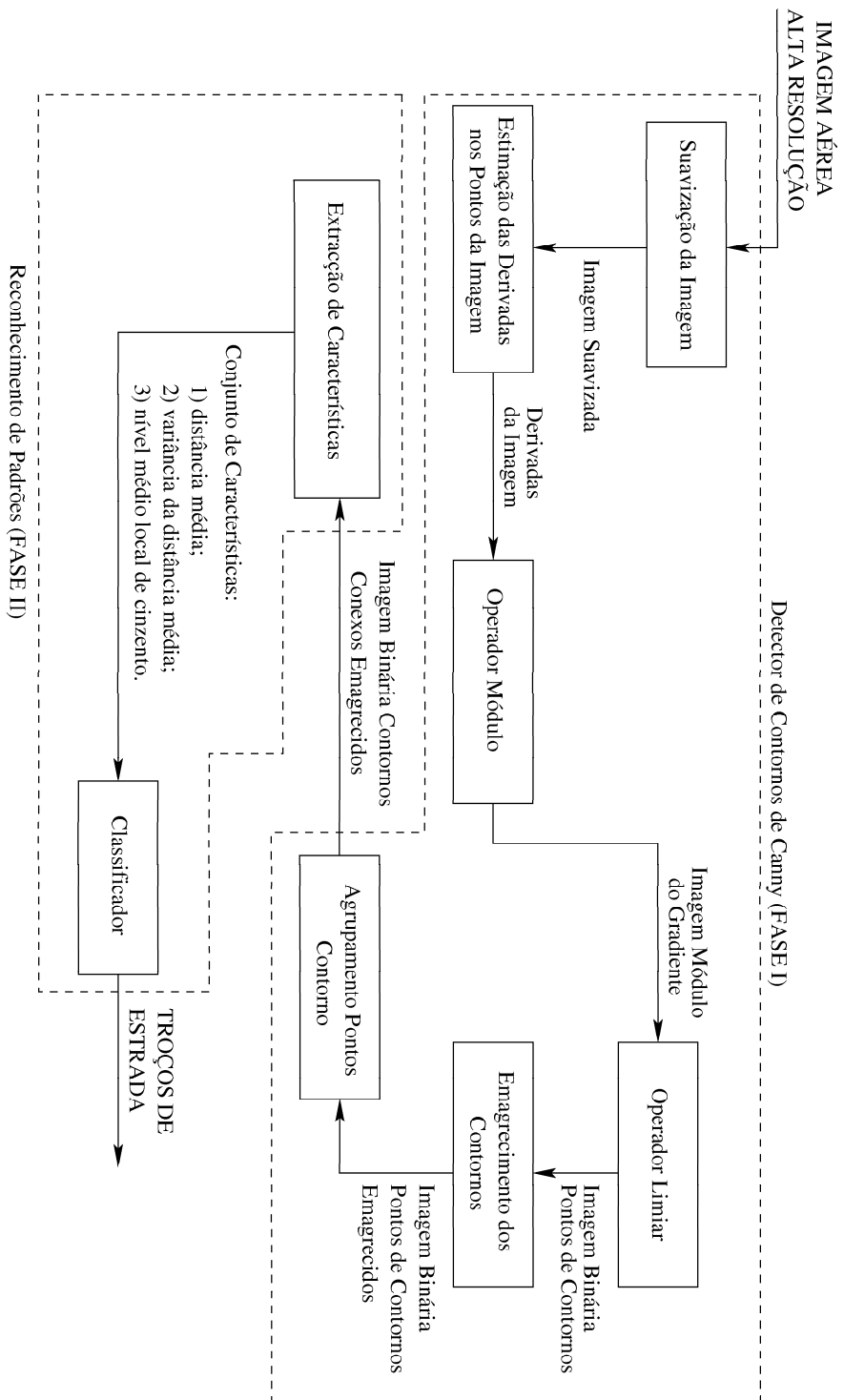


Figura 4.9.: Diagrama de blocos que representa o método para a extracção automática de estradas proposto nesta dissertação.

As suposições 1 e 2 dizem respeito ao conhecimento geométrico e as suposições 3 e 4 dizem respeito ao conhecimento radiométrico.

Em geral, o valor do nível médio de cinzento apresentado pelas estradas é distinto do das zonas que as rodeiam, pelo que se inicia a primeira fase do método proposto extraíndo-se os contornos com base num algoritmo de detecção de contornos por meio de filtros lineares. Pretende-se, deste modo, determinar os pontos da imagem que apresentam elevados valores da primeira derivada da função que representa a imagem. A fase de pré-processamento suaviza a imagem de modo a que as suas descontinuidades não perturbem a subsequente estimativa do gradiente. O estimador escolhido é justificado por Canny (Sonka, Hlavac, e Boyle 1993). A tabela do módulo das amplitudes do gradiente é processada através do recurso à operação de limiar, por forma a obter um conjunto de pontos de contorno com elevada probabilidade de o serem. O valor utilizado na operação de limiar é aquele que se considera mais adequado para a obtenção de pontos na imagem de elevado valor para a primeira derivada da função de Gauss.

A elevada resolução das imagens e os baixos níveis de ruído permitem uma definição muito precisa das fronteiras dos objectos. O conjunto de pontos de contorno obtidos são processados de modo a que as linhas de contorno tenham a espessura de um *pixel*. Os pontos de contorno conexos são, então, agrupados em conjuntos provavelmente correspondentes às margens das estradas. É nesta fase utilizada apenas a suposição 3. Termina assim a primeira fase da metodologia de extracção automática de estradas utilizada nesta dissertação, que é desenvolvida nas Secções 4.4 e 4.5.

Na segunda fase, analisam-se estes grupos de pontos de contorno conexos, de forma a detectar aqueles que formam parte dos limites de estradas, reconhecendo-se, assim, as estradas nas imagens de entrada. É utilizado um reconhecedor estatístico que se baseia na análise de três propriedades do modelo de estrada:

- a distância média entre cada um dos grupos de pontos de contorno conexos obtidos como resultado da primeira fase, que é geralmente constante;
- a variância da distância entre os grupos de pontos de contorno conexos, que é geralmente nula;
- e o nível médio local de cinzento entre os grupos de pontos de contorno, que é geralmente constante.

O reconhecedor estatístico utilizado nesta dissertação tem uma estrutura idêntica à estrutura clássica de um sistema de reconhecimento de padrões, cuja composição é caracterizada por dois blocos: **Extracção de Características** e **Classificador**. O assunto é desenvolvido na Secção 4.6. Recorre-se, nesta fase, às suposições 1, 2, e 4.

4.4. Detecção de Pontos de Contorno para a Extracção das Margens de uma Estrada

De acordo com o exposto nas Secções 4.2 e 4.3, assume-se que as estradas em ambientes rurais apresentam em geral um brilho constante e que contrasta com o brilho da área que a rodeia. As margens da estrada são, assim, contornos de uma região da imagem que apresenta, em geral, uma variação abrupta de tonalidade em relação à área que a rodeia.

Na extracção das margens das estradas, e de acordo com o exposto na Secção 3.3.1, identificam-se fundamentalmente dois métodos baseados em contornos: o método baseado na detecção de contornos por meio de filtros lineares e o método baseado em contornos activos¹⁷. Como se refere na Secção 3.3.1, ambos os métodos apresentam vantagens e desvantagens.

O método baseado na detecção de contornos por meio de filtros lineares, permite uma determinação espacial mais precisa dos mesmos, com o recurso a um conhecimento prévio mínimo dos objectos a detectar, mantendo a interpretação da imagem num processo de conhecimento de baixo nível (Sonka, Hlavac, e Boyle 1993), embora detecte um maior número de contornos irrelevantes (Fua e Leclerc 1990).

O método baseado em contornos activos, para que seja eficiente, exige um conhecimento prévio exacto das características radiométricas e geométricas dos objectos, características estas que vão ajudar na condução do processo de extracção (Sonka, Hlavac, e Boyle 1993), conduzindo o início do método de extracção para um processo de conhecimento de alto nível.

A imagem é representada por uma função discreta $f(i, j)$, em que os argumentos i e j representam as coordenadas num plano cartesiano. Os valores da função $f(i, j)$ correspondem ao brilho de cada ponto na imagem. A detecção de pontos de contorno, consiste na procura de *pixel* em que existe uma variação acentuada na função de imagem. Duas grandezas: a amplitude do gradiente, e a direcção de suporte do gradiente, vidé a Figura 4.10, são propriedades importantes para a detecção dos pontos de contorno¹⁸.

4.4.1. Detecção de Contornos por Meio de Filtros Lineares

A representação ideal e sem ruído da função imagem na vizinhança de um contorno está indicada na Figura 4.11. A Figura 4.13 mostra o varrimento horizontal da imagem da Figura 4.12, sensivelmente a um terço da sua altura total (a partir da sua base), permitindo observar a localização presumida da estrada segundo a direcção OX e a existência de algum ruído.

Os valores da amplitude do gradiente e da sua direcção, para o caso contínuo, são

¹⁷Vulgarmente designado na literatura científica de língua inglesa por *snakes*.

¹⁸A direcção do contorno é perpendicular à direcção do gradiente no ponto de contorno.

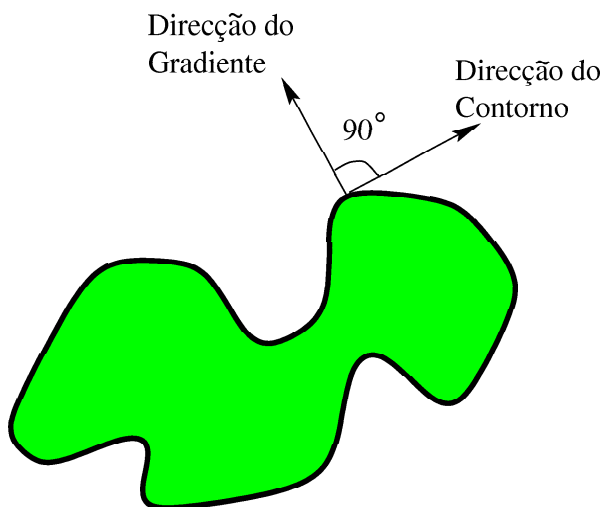


Figura 4.10.: A figura mostra a relação de perpendicularidade, existente entre a direcção do gradiente e a direcção do contorno. A zona a sombreado, representa uma hipotética região de uma imagem aérea, que apresenta um brilho distinto da zona que a rodeia. Para cada ponto do seu contorno (linha a preto que delimita a região) e que corresponde aos pontos de amplitude máxima do gradiente, determina-se a direcção da amplitude máxima do gradiente — direcção do gradiente. A direcção do contorno é perpendicular à do gradiente.

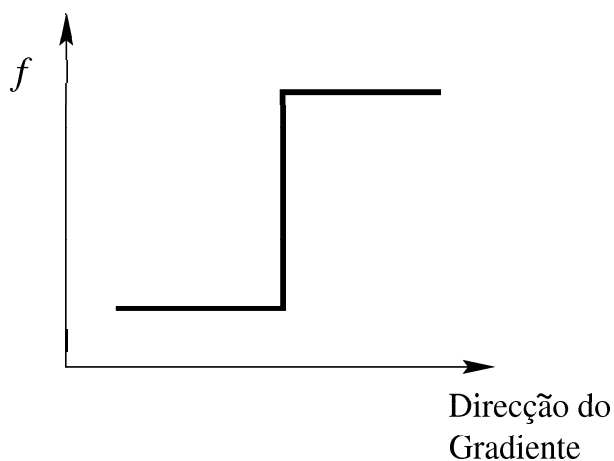


Figura 4.11.: A figura identifica a variação do valor da função imagem segundo a direcção do gradiente, ou seja, o perfil do contorno do tipo pulso, sem ruído. O ruído está sempre presente no processo de aquisição da imagem aérea, pelo que a figura apresentada exhibe uma situação ideal em que o ruído é nulo, e a função imagem é contínua por troços.



Figura 4.12.: A figura mostra, claramente, o desenvolvimento de uma estrada. É uma imagem aérea digital de níveis de cinzento com oito bits de resolução de intensidade e 870×1170 *pixel*, que apresenta uma resolução espacial de 0,25 metros.

obtidos recorrendo respectivamente às expressões 4.1 e 4.2:

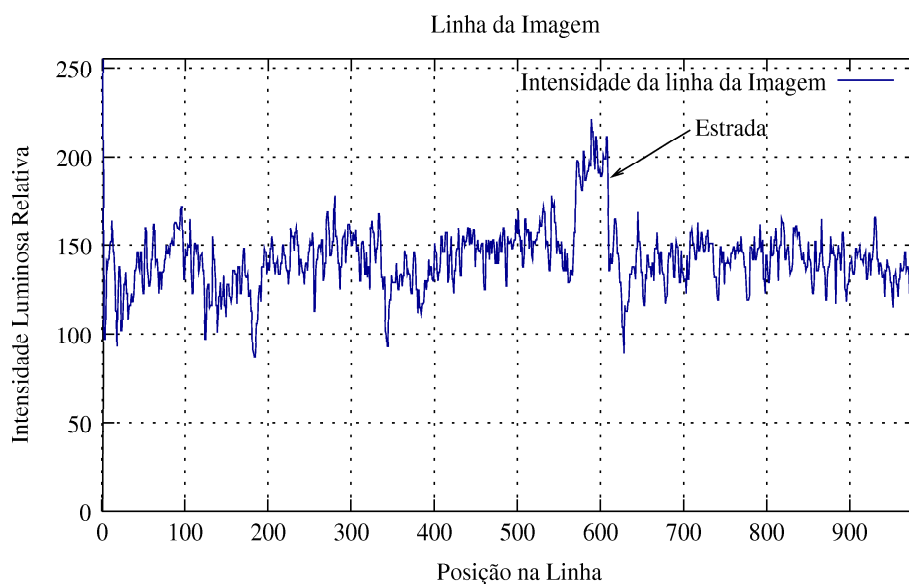
$$|\nabla f(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (4.1)$$

$$\theta = \arg\left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}\right), \quad (4.2)$$

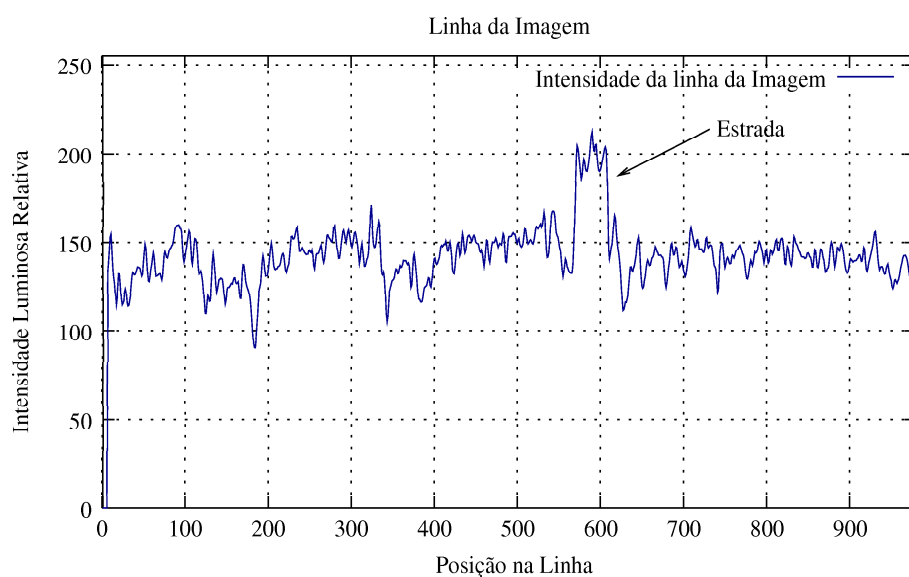
em que θ é o ângulo (em radianos) entre o eixo x do referencial da imagem e o ponto de coordenadas (x, y) .

A função de imagem $f(i, j)$ é discreta, pelo que o cálculo da expressão 4.1 é aproximado por diferenças finitas, pois que a derivada da função num ponto tem como condição necessária que a função seja contínua nesse ponto. Para a estimação do valor da derivada, há que efectuar anteriormente a «suavização» da imagem de modo a reduzir as suas descontinuidades (regularizar a função imagem). A análise da Figura 4.13, permite visualizar a aplicação, sobre a imagem da Figura 4.12, de um filtro de eliminação de ruído por média ponderada com a função de Gauss, para um determinado valor do factor

4.4. DETECÇÃO DE PONTOS DE CONTORNO PARA A EXTRACÇÃO DAS MARGENS DE UMA ESTRADA



(a) Linha de imagem sem suavização.



(b) Linha de imagem após a suavização.

Figura 4.13.: O varrimento horizontal da imagem revela a presença de ruído, e as transições de intensidade luminosa revelam a existência de vários objectos na cena. A figura indica o local onde se presume a existência de uma estrada, após o processamento. Em (a) visualiza-se o varrimento horizontal da imagem antes da realização da suavização, e em (b) visualiza-se o varrimento horizontal da imagem após a respectiva suavização, com recurso a um filtro para a eliminação de ruído por média ponderada com a função de Gauss, para um valor do factor de escala $\sigma = 2,0$.

de escala σ ¹⁹. Salienta-se, no entanto, que apesar da diminuição da distância vertical entre picos da linha de intensidade de luminosidade relativa da imagem, vidé a Figura 4.13(b), a localização da estrada continua perfeitamente identificável em comparação com a imagem inicial, vidé a Figura 4.13(a). Desta forma, a aplicação do filtro reduz as descontinuidades da imagem sem reduzir sensivelmente a informação nela contida.

No projecto de um filtro de detecção de contornos com suavização, três critérios devem ser respeitados (Canny 1986) e (Sonka, Hlavac, e Boyle 1993):

- o filtro deve ser plano na banda de passagem e reduzir acentuadamente o número de variações rápidas da função num instante «espacial», diminuindo deste modo as pequenas variações provocadas por ruído na imagem²⁰, mantendo no entanto a informação relativa aos pontos de contorno;
- o filtro deve ser isotrópico;
- a resposta do filtro deve ser única para um qualquer ponto do contorno. No caso de existirem duas respostas para um ponto de contorno, uma delas deve ser considerada como falsa.

A resposta em função dos critérios, deve ser observada no domínio do espaço e no domínio da frequência espacial, porque um valor óptimo na localização leva a uma má resposta no domínio desta frequência. A função que otimiza a resposta espacial do filtro de acordo com os critérios de Canny, é dada pelo filtro que resulta da primeira derivada da função de Gauss²¹ (Sonka, Hlavac, e Boyle 1993), (Torre e Poggio 1986) e (Canny 1986), função esta traduzida pela expressão 4.3:

$$g(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(r-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4.3)$$

em que σ representa um factor de escala, μ um desvio do ponto central do filtro e r é a distância de um ponto à origem do filtro. Na Figura 4.14, visualiza-se a influência do valor de σ nos resultados obtidos.

Uma das metodologias de detecção de pontos do contorno mais citada na literatura é proposta por (Canny 1986). É um filtro óptimo, de acordo com os critérios apresentados por Canny. Este detector de pontos de contorno, é formulado para uma dimensão espacial²² e caracteriza a posição do ponto de contorno. A direcção do contorno é obtida com a generalização do detector para duas dimensões²³, envolvendo a imagem com a

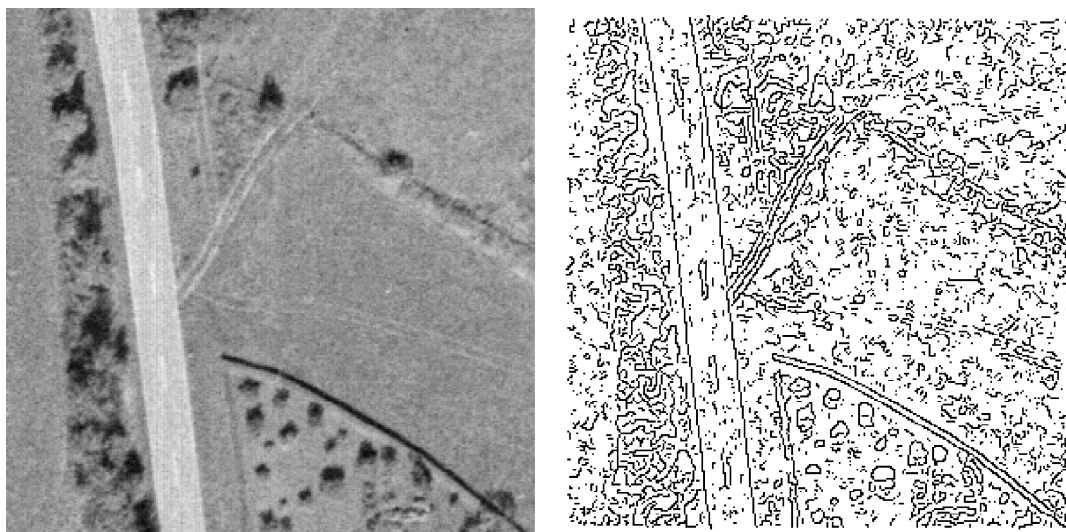
¹⁹Vidé a equação 4.3

²⁰Um filtro com estas características designa-se por **filtro passa baixo**.

²¹É corrente encontrar-se na literatura inglesa a sigla DOG — *Derivative of Gauss* — para referenciar a primeira derivada da função de Gauss (Ando 2000).

²²Uma dimensão é frequentemente referida pela sigla **1D**.

²³As duas dimensões são frequentemente referidas pela sigla **2D**.



(a) Imagem de entrada.

(b) $\sigma = 1,0$



(c) $\sigma = 2,0$

(d) $\sigma = 3,0$

Figura 4.14.: As figuras (b), (c) e (d), representam os resultados obtidos após o processamento relativo à detecção de contornos desenvolvido nesta dissertação, para diferentes valores de σ , e para o valor de $\mu = 0$ (vide o Apêndice A). Constata-se que a figura (c), obtida para um valor de $\sigma = 2,0$ apresenta uma melhor definição para as margens do troço de estrada da imagem da figura (a). Os contornos estão emagrecidos, de acordo com a metodologia descrita na Secção 4.4.2, usando a supressão de não-máximos seguida da binarização por histerese.

Gaussiana bidimensional e diferenciando em relação à direcção do gradiente (Canny 1986).

Nesta dissertação, desenvolve-se a convolução do gradiente da Gaussiana generalizado a duas dimensões, respectivamente OX e OY , com a função de imagem:

$$(\nabla g) * f \tag{4.4}$$

cujos resultados estão deduzidos no Apêndice A.

Após a determinação da forma óptima do operador, salienta-se o problema da determinação da sua área de influência, de modo a obter o melhor compromisso entre detecção e localização. Os respectivos cálculos apresentam-se, também, no Apêndice A.

A imagem binária correspondente aos pontos do contorno, é obtida através da selecção por um determinado limiar²⁴ dos pontos a que correspondem módulos do gradiente suficientemente elevados, para garantir a presença de um contorno.

4.4.2. Emagrecimento dos Contornos

Os contornos obtidos com o recurso à operação de limiar da amplitude do gradiente, e que pertencem aos limites de um objecto da imagem, apresentam uma largura que, em geral, é superior a um *pixel*. A redução da largura do contorno de um objecto da imagem para um *pixel*, é realizada por algoritmos de **emagrecimento de contornos**. Alguns operadores locais para emagrecimento de contornos, são tratados como casos especiais de operadores matemáticos morfológicos²⁵.

Supressão de Não-máximos

Outra técnica de emagrecimento de linhas, é designada por **supressão de não-máximos** e consiste em obter o máximo local da derivada na direcção perpendicular ao desenvolvimento do contorno, suprimindo quaisquer outras respostas localmente. A técnica de supressão de não-máximos utiliza, deste modo, o conhecimento sobre a orientação do contorno a emagrecer. As amplitudes do contorno e as respectivas direcções, utilizadas como dados de entrada, são obtidas por um operador de gradiente.

Seja \vec{n} o versor da direcção perpendicular ao contorno, estimado pela expressão,

$$\vec{n} = \frac{\nabla g(x_1, x_2) * f}{|\nabla g(x_1, x_2) * f|}, \tag{4.5}$$

²⁴A operação limiar, referenciada na literatura inglesa por *threshold* fixo, é um teste de hipóteses simples — verdadeiro ou falso —, pois como a imagem contém ruído, o processo de classificação de um ponto na imagem conduz a um processo estocástico, traduzido por uma variável aleatória, cujos seus componentes são a do valor e a do ruído. O valor adoptado para a operação de limiar é escolhido pelo utilizador, sendo aquele que conduz a melhores resultados experimentais.

²⁵O termo **morfologia**, advém do **estudo das formas** das plantas e animais. No contexto deste documento, a morfologia refere-se ao estudo da topologia ou estrutura dos objectos a partir das imagens em que os mesmos estão inseridos (Jain 1989).

em que $|\nabla g(x_1, x_2) * f|$ representa a intensidade do contorno. De acordo com (Sonka, Hlavac, e Boyle 1993), o máximo local é obtido através da resolução da Equação 4.6, convolvendo a segunda derivada da função de Gauss bidimensional, em ordem à direcção perpendicular ao desenvolvimento do contorno com a função imagem,

$$\frac{\partial^2}{\partial \vec{n}^2} g(x_1, x_2) * f = 0. \quad (4.6)$$

Para cada *pixel* da imagem são, assim, examinados dois *pixel* em sentidos opostos, segundo a direcção perpendicular à direcção do contorno, ou seja, a direcção do gradiente, vide a Figura 4.10. Caso um dos dois *pixel* de extremidade tenham uma amplitude superior à amplitude do *pixel* central, atribui-se o valor zero ao *pixel* central (Sonka, Hlavac, e Boyle 1993).

Outra forma de determinação do ponto de máximo local da amplitude do gradiente, consiste na procura, na vizinhança (de um ponto da imagem) determinada sobre a direcção perpendicular à direcção do contorno, do ponto de máximo, evitando, desta forma, o cálculo da segunda derivada e a realização de uma nova convolução, agora entre a função imagem e a segunda derivada da função de Gauss bidimensional. O cálculo do máximo local realizado, é independente da direcção do gradiente.

Binarização por Histerese

Após a supressão de não-máximos, é aplicado o operador de binarização por histerese. A eliminação de respostas espúrias quando da presença de um único contorno imerso em ruído, cria um efeito de interrupção da linha de contorno. Este problema é comum na detecção de contornos. O sinal de saída de um estimador da amplitude do gradiente é, em geral, submetido a um processo de classificação por meio de um limiar que permite decidir que pontos de contorno são importantes. A interrupção da linha de contorno é causada pelas flutuações na resposta do estimador originadas pelo ruído. Este efeito pode ser eliminado através de um processo de classificação com histerese. Se qualquer resposta do estimador estiver acima de um limiar elevado, estes *pixel* constituem seguramente parte da linha de contorno. As respostas individuais de fraca intensidade normalmente correspondem ao ruído, mas se estes pontos se encontram ligados a qualquer um dos pontos com resposta elevada, é natural que tenham maior probabilidade de pertencerem à linha de contorno. Estes *pixel* ligados consideram-se parte da linha de contorno se a sua estimativa da amplitude do gradiente estiver acima de um determinado limiar de baixo valor. Os limiares superior e inferior são escolhidos de acordo com a relação sinal-ruído do valor estimado da amplitude do gradiente.

Operadores Morfológicos

Outros algoritmos de emagrecimento de linhas, transformam um contorno num conjunto de pontos conexos que definem uma linha mediana do mesmo. A estrutura linear obtida

não é influenciada pelas inflexões do contorno inicial, ou seja, não há um desvio da linha média para o exterior de uma curva, em virtude de no seu interior existirem menos pontos. São eliminados os pontos de um contorno inicial, que têm mais do que um ponto vizinho, mas que não interrompem o contorno inicial. A estrutura linear obtida, define uma região conexa em que, quaisquer dois dos pontos do seu contorno, são unidos por uma curva que se integra totalmente na região, prevenindo que os pontos finais de arcos finos sejam eliminados (Jain 1989).

P3	P2	P9
P4	P1	P8
P5	P6	P7

Figura 4.15.: Distribuição dos *pixel* referentes ao algoritmo de emagrecimento de linhas em referência.

Suponha-se que P1 é o *pixel* a analisar, vidé a Figura 4.15. O *pixel* em causa é eliminado quando a condição,

$$\begin{aligned}
 &2 \leq NT01(P1) \leq 6 \\
 &\quad \wedge \\
 &\quad V1(P1) = 1 \\
 &\quad \wedge \\
 &((P2 \cdot P4 \cdot P8) = 0 \vee V1(P2) \neq 1) \\
 &\quad \wedge \\
 &((P2 \cdot P4 \cdot P6) = 0 \vee V1(P4) \neq 1)
 \end{aligned}$$

é verdadeira, em que:

- NT01(P1) é o número de transições de zero para não zero na sequência ordenada P2, P3, P4 ..., P9, e P2;
- V1(P1), V1(P2) e V1(P4) são respectivamente o número de vizinhos não zero de P1, P2 e P4.

O algoritmo termina quando não se verificam mais alterações na imagem (Jain 1989, pág. 382 e 383).

A técnica de emagrecimento dos contornos utilizada neste documento, consiste na supressão de não máximos seguida da classificação por histerese. Obtiveram-se, desta forma, bons resultados conforme se constata através da análise da Figura 4.16(c).

4.5. Agrupamento dos Pontos de Contorno Emagrecidos

Os pontos de contornos emagrecidos, são agrupados em listas utilizando o algoritmo clássico de marcação de pontos conexos. São estes grupos de contornos conexos, que servem como dados de entrada para o algoritmo de reconhecimento de estradas descrito na Secção 4.6.

A marcação de componentes conexos realiza-se sobre uma imagem binária, ou seja, os seus *pixel* estão rotulados com os valores **0** (zero) e **1** (um). Para imagens de níveis de cinzento, como é o caso das imagens utilizadas pela metodologia descrita nesta dissertação, supõe-se, *a priori*, a aplicação de um filtro para a remoção de ruído e a realização de uma operação de limiar. A marcação de pontos conexos consiste na identificação do conjunto de *pixel* da imagem rotulados com o valor **1** (um) e ligados entre si, que formam uma região ou segmento da mesma, sendo-lhes atribuído o mesmo identificador. Esta técnica de processamento de imagem transforma os seus *pixel* em regiões, capazes de serem caracterizadas por um vector de propriedades, ao contrário dos *pixel*, apenas caracterizáveis pela sua posição no referencial adoptado e pelo seu nível de cinzento ²⁶

Segundo (Haralick e Shapiro 1992, pág. 29), dois *pixel* **a** e **b** pertencem a um componente conexo **C** se existe a sequência de *pixel* $(p_0, p_1, p_2, \dots, p_n)$ de **C** em que $p_0 = \mathbf{a}$, $p_n = \mathbf{b}$ e p_i pertence à vizinhança de p_{i-1} para $i = 1, \dots, n$. Os *pixel* vizinhos do *pixel* **a** designam-se por **pixel adjacentes** ao *pixel* **a**. A vizinhança de um *pixel* é definida de acordo com dois critérios, vidé a Figura 4.17: **tetra-conexos** e **octo-conexos**.

Define-se também em (Haralick e Shapiro 1992, pág. 29-30) os **pixel de fronteira** de um componente conexo, como os *pixel* rotulados com o valor **1** (um), adjacentes aos *pixel* rotulados com o valor **0** (zero) e pertencentes ao sub-conjunto $\mathbf{F} \subset \mathbf{C}$, ou vice-versa. No entanto, no caso em que os contornos são emagrecidos à largura de um *pixel* *a priori* ao seu agrupamento, tal como se procede nesta dissertação, o conjunto **F** é o conjunto **C**.

Grande parte dos algoritmos para o agrupamento de *pixel* nas imagens processam linhas das mesmas, da esquerda para a direita e de cima para baixo, tomando como

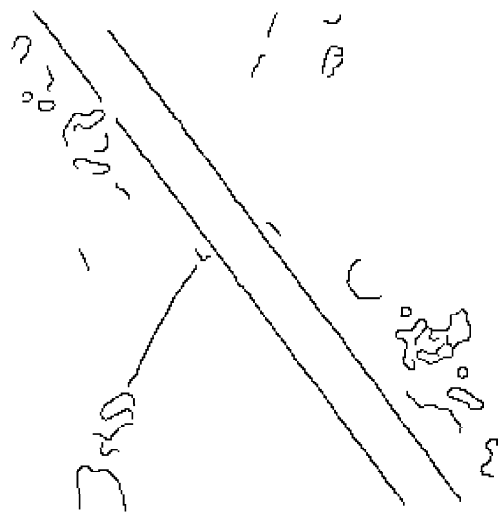
²⁶O reconhecimento de padrões, utiliza propriedades estatísticas sobre os valores de intensidade dos *pixel* das regiões, para inferir sobre o reconhecimento e a caracterização dos objectos presentes numa imagem.



(a) Imagem de entrada.



(b) Mapa de pontos de contorno resultantes do processo de detecção com emagrecimento por meio de operador morfológico.



(c) Mapa de pontos de contorno resultantes do processo de detecção com emagrecimento por meio de supressão de não máximos seguida de classificação por histerese.

Figura 4.16.: Os contornos do troço de estrada na figura (b) apresentam maior quantidade e dimensão de interrupções no desenvolvimento das linhas de contorno, comparativamente às linhas de contorno representadas na figura (c), embora existam mais objectos. Para ambos os casos utilizam-se: operação de limiar para o valor 100 e o factor de escala $\sigma = 2, 0$.

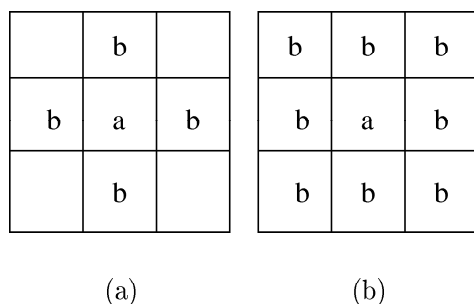


Figura 4.17.: **Pixel adjacentes** a um *pixel a*. Em (a), a vizinhança do *pixel a* está representada de acordo com o critério *tetra-conexos*. Em (b) a vizinhança do *pixel a* está representada de acordo com o critério *octo-conexos*.

referência o *pixel* colocado no seu canto superior esquerdo (Haralick e Shapiro 1992, pág. 31). O algoritmo desenvolvido nesta dissertação é deste tipo, e utiliza uma vizinhança octo-conexos. Para cada linha da imagem, analisam-se as transições dos valores dos *pixel* de **0** (zero) para **1** (um), da esquerda para a direita e de cima para baixo. Executam-se sobre a imagem duas passagens:

- na primeira passagem, atribuem-se rótulos aos *pixel* de acordo com as transições encontradas de **0** (zero) para **1** (um) e armazenam-se numa tabela as equivalências, obtidas quando um *pixel* se rotula através de dois ou mais identificadores, atribuindo-se ao *pixel* em causa o valor do menor rótulo na sua vizinhança **tetra-conexos** ou **octo-conexos**. As equivalências são posteriormente processadas de modo a determinar-se as classes de equivalências e os respectivos rótulos (Cormen, Leiserson, e Rivest 1996, pág. 488-493), traduzidos pelo menor valor existente na classe;
- na segunda passagem rotulam-se os *pixel* da imagem de acordo com o rótulo da respectiva classe.

Seja M uma imagem binária e M_1 a respectiva matriz após o primeiro processamento do algoritmo de agrupamento de *pixel*.

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

A matriz M_1 , de dimensão igual à matriz M , apresenta os valores **0** (zero) para as mesmas linhas e colunas que a matriz M , pois representam o fundo da imagem, ou seja, pontos da mesma que não correspondem aos contornos. Na primeira linha da matriz M o primeiro valor **1** (um) aparece na terceira coluna, pelo que ao elemento na primeira linha e terceira coluna da matriz M_1 atribui-se o valor **1** (um). O segundo ponto de contorno da primeira linha, está assinalado na sexta coluna e não tem pontos vizinhos rotulados, pelo que o respectivo rótulo na matriz M_1 é incrementado e tomará o valor **2** (dois). Admita-se uma vizinhança do tipo **octo-conexos**. O próximo ponto de contorno da primeira linha está assinalado na sétima coluna da matriz M , e tem um ponto vizinho à sua esquerda que já está rotulado com o valor **2** (dois), pelo que se atribui na matriz M_1 , respectivamente, o valor **2** (dois). Para a análise da segunda linha da matriz M , procede-se de igual forma. As duas primeiras colunas da matriz M_1 escrevem-se,

$$M' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Na análise da terceira linha da matriz M , o ponto correspondente à primeira coluna não tem vizinho rotulado pelo que o seu valor é incrementado, sendo-lhe atribuído o valor **3** (três). Para o ponto da segunda coluna, surgem dois rótulos possíveis: o valor **1** devido ao rótulo do ponto da segunda linha terceira coluna, e o valor **3** (três) devido ao rótulo do ponto da terceira linha e primeira coluna. Deste modo, atribui-se o rótulo **1** (o menor dos dois) ao ponto da terceira linha e segunda coluna da matriz M_1 e define-se a primeira equivalência, ou seja, **3=1**. Procede-se de igual forma para todos os pontos da matriz M , pelo que se apresenta a matriz M_1 , em que os valores assinalados por '□' representam os pontos para os quais se estabeleceram equivalências: **3=1** e **7=4**.

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ \boxed{3} & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 5 \\ 6 & 0 & \boxed{7} & 4 & 4 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 5 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Tem-se, deste modo, duas classes de equivalências cujos rótulos correspondem aos valores mínimos existentes em cada classe: **classe 1**:{1, 3} e **classe 2**:{4, 7}. Na segunda fase do algoritmo, identificam-se as equivalências na matriz M_1 e substituem-se os respectivos valores pelos rótulos das classes. O resultado final é representado pela matriz M_2 .

$$M_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 5 \\ 6 & 0 & 4 & 4 & 4 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 5 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

O algoritmo clássico pode apresentar uma vantagem diminuta na manipulação de imagens com um elevado número de *pixel* e elevado número de regiões nela contidas, em virtude da dimensão da tabela de equivalências (Haralick e Shapiro 1992, pág. 37). No entanto, nesta dissertação utilizam-se imagens de dimensão, em geral quadrada, inferior a mil *pixel* pelo que o problema referido não é de modo algum significativo.

Outros algoritmos para o agrupamento de *pixel* da imagem podem ser encontrados em (Haralick e Shapiro 1992, pág. 28-48) e que diferem no modo como rotulam os *pixel* que apresentam na sua vizinhança mais do que um identificador, na forma como armazenam as respectivas equivalências e na técnica utilizada para completar o processo, recorrendo à informação relativa às equivalências.

4.6. A Classificação de Contornos Conexos como Margens de uma Estrada

A segunda fase do método de detecção de estradas a partir de imagens aéreas de alta resolução com 256 níveis de cinzento, tem uma estrutura idêntica à estrutura clássica de um sistema de reconhecimento de padrões, e que de acordo com (Marques 1999, pág. 3) é composto por dois blocos: o primeiro — **extração de características** — que tem como objectivo extrair o conjunto de características relevantes para a tomada de decisão, com base nos dados de entrada, e que depende da natureza do problema; o segundo — **classificador** — que tem por objectivo escolher a classe que melhor corresponde às entidades do mundo real, com base no conjunto de características obtidas pelo primeiro bloco, e que em termos de arquitectura envolve processamento estatístico, sendo independente da natureza do problema, vidé a Figura 4.18.

As estradas nas imagens de entrada ²⁷, apresentam uma largura suficiente para a extração das suas margens, ou seja, pode escolher-se como modelo da estrada, a sequência m_{ij} , constituída pelo grupo de pontos conexos i e o grupo de pontos conexos j .

Utiliza-se um reconhecedor estatístico das estradas baseado na análise das seguintes características do modelo da estrada (Barzohar e Cooper 1996):

1. d_{ij} é a distância média entre cada um dos grupos de pontos de contorno i e j ;

²⁷As imagens de entrada apresentam uma resolução de 0,25m entre *pixel*.



Figura 4.18.: Diagrama de blocos que ilustra a estrutura do reconhecedor de padrões utilizado nesta dissertação.

2. s_{ij} é a variância da distância entre os grupos de pontos de contorno i e j ;
3. c_{ij} é o valor do nível médio de cinzento entre os grupos de pontos de contorno i e j .

As duas primeiras características são geométricas e a última radiométrica não se utilizando, presentemente, características topológicas. A variável aleatória d_{ij} representa o facto das estradas serem construídas, tendo em vista uma determinada largura antecipada. Os erros humanos de construção, fazem com que haja uma determinada variação desta largura. Assume-se, como primeira aproximação, que a função densidade de probabilidade para esta variável aleatória é normal com um valor médio μ_d e variância σ_d^2 .

A variável aleatória s_{ij} corresponde à verificação da regularidade na construção das estradas, o que permite distinguir estas de obras da natureza. Assume-se, também, e em primeira aproximação, que a função densidade de probabilidade é normal com um valor médio μ_s e variância σ_s^2 .

A variável aleatória c_{ij} indica que nas estradas o valor local de luminosidade reflectida tem pequena variação e que mesmo em troços relativamente mais compridos verifica-se, com alguma segurança, a mesma propriedade. De novo se supõe, como primeira aproximação, uma distribuição normal, com média μ_c e variância σ_c^2 . Assume-se a independência condicional, para facilidade de cálculo²⁸, entre cada uma destas propriedades e reescreve-se d_{ij} , s_{ij} e c_{ij} respectivamente por x_{1ij} , x_{2ij} e x_{3ij} .

Seja C o conjunto das classes de pertença admissíveis do modelo descrito neste documento. O conjunto C apresenta apenas dois elementos, pois um par de contornos conexos m_{ij} é **estrada** ou **não é estrada**. Designe-se por C_1 a classe de pertença **estrada** e por C_2 a classe de pertença **não estrada**:

$$C = \{C_1, C_2\}. \quad (4.11)$$

Seja X o conjunto finito das características discretas anteriormente descritas:

$$X = \{x_{1ij}, x_{2ij}, x_{3ij}\} \subset \mathbb{R}. \quad (4.12)$$

²⁸Embora a independência condicional destas variáveis aleatórias, seja apenas uma suposição de trabalho, verifica-se que mesmo assim o sistema de reconhecimento apresenta resultados aceitáveis.

O processo de extracção das características é realizado com base num modelo probabilístico em que se gera aleatoriamente, a montante do processo de classificação, uma classe $C_k \in C$, em que $k \in \{1, 2\}$, e cuja probabilidade $P(C_k)$ ²⁹ é conhecida, produzindo-se de seguida uma observação para $x_{nij} \in X$, em que $n \in \{1, 2, 3\}$, com distribuição dependente de C_k . Por fim, o classificador tem como função determinar a classe C'_k com base na observação x_{nij} anteriormente produzida³⁰, ou seja, identificar a classe que gerou a respectiva observação, vidé a Figura 4.19.

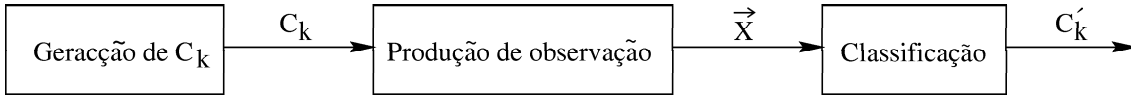


Figura 4.19.: Modelo probabilístico da classificação das características.

A obtenção da classe C_k é realizada, minimizando a probabilidade de erro de classificação de C_k , ou seja, maximizando a probabilidade de ocorrer a classe C_k dado que se observou a característica x_{nij} , ou seja, $P(C_k | x_{nij})$, vulgarmente designada por probabilidade *a posteriori* de C_k , visto que, em geral, apenas se consegue obter uma estimativa da classe C_k (Marques 1999).

Para cada uma das classes de pertença do conjunto C (vidé a Equação 4.11) tem-se $P(C_1 | x_{nij})$ e $P(C_2 | x_{nij})$. As características x_{nij} são distintas para os distintos pares de elementos conexos m_{ij} . Recorrendo à regra de Bayes calculam-se as probabilidades *a posteriori* $P(C_1 | x_{nij})$ e $P(C_2 | x_{nij})$,

$$P(C_1 | x_{nij}) = \frac{P(x_{nij} | C_1) \times P(C_1)}{P(x_{nij})} \quad (4.13)$$

$$P(C_2 | x_{nij}) = \frac{P(x_{nij} | C_2) \times P(C_2)}{P(x_{nij})}, \quad (4.14)$$

em que $P(C_1)$ é a probabilidade *a priori* de um par de contornos conexos ser **estrada**, e $P(C_2)$ a probabilidade *a priori* de um par de contornos conexos **não ser estrada**. O denominador $P(x_{nij})$ é um factor de normalização que não influencia a decisão.

Deste modo, um par de contornos conexos m_{ij} é estrada se

$$P(C_1 | x_{nij}) > P(C_2 | x_{nij}). \quad (4.15)$$

As probabilidades $P(x_{nij} | C_1)$ e $P(x_{nij} | C_2)$ podem ser traduzidas pelas respectivas funções de densidade de probabilidade, e que para um determinado ponto se escreve,

$$P(x_{nij} | C_1) = p(x_{nij} | C_1) \times (dx_{1ij} \cdot dx_{2ij} \cdot dx_{3ij}) \quad (4.16)$$

²⁹É designada por probabilidade *a priori*.

³⁰O modelo probabilístico apresentado está descrito genericamente em (Marques 1999).

$$P(x_{n_{ij}} | C_2) = p(x_{n_{ij}} | C_2) \times (dx_{1_{ij}} \cdot dx_{2_{ij}} \cdot dx_{3_{ij}}). \quad (4.17)$$

Substituindo-se o resultado obtido em 4.16 e 4.17 respectivamente nas Equações 4.13 e 4.14, as últimas escrevem-se,

$$P(C_1 | x_{n_{ij}}) = \frac{p(x_{n_{ij}} | C_1) \times (dx_{1_{ij}} \cdot dx_{2_{ij}} \cdot dx_{3_{ij}}) \times P(C_1)}{P(x_{n_{ij}})} \quad (4.18)$$

$$P(C_2 | x_{n_{ij}}) = \frac{p(x_{n_{ij}} | C_2) \times (dx_{1_{ij}} \cdot dx_{2_{ij}} \cdot dx_{3_{ij}}) \times P(C_2)}{P(x_{n_{ij}})}, \quad (4.19)$$

sendo válidas as Equações 4.20 e 4.21.

$$P(C_1) + P(C_2) = 1 \quad (4.20)$$

$$P(C_1 | x_{n_{ij}}) + P(C_2 | x_{n_{ij}}) = 1 \quad (4.21)$$

Reescrevendo a Equação 4.15 e substituindo o resultado traduzido pelas Equações 4.18 e 4.19 tem-se,

$$\frac{p(x_{n_{ij}} | C_1) \times (dx_{1_{ij}} \cdot dx_{2_{ij}} \cdot dx_{3_{ij}}) \times P(C_1)}{P(x_{n_{ij}})} > \frac{p(x_{n_{ij}} | C_2) \times (dx_{1_{ij}} \cdot dx_{2_{ij}} \cdot dx_{3_{ij}}) \times P(C_2)}{P(x_{n_{ij}})}. \quad (4.22)$$

Da observação da Equação 4.22, facilmente se constata que o volume elementar no espaço das observações ($dx_{1_{ij}} \cdot dx_{2_{ij}} \cdot dx_{3_{ij}}$) existe em ambos os seus termos, pelo que pode ser eliminado. Também a grandeza $P(x_{n_{ij}})$, existe em ambos os termos da equação e é um factor de normalização que não influencia a decisão, não dependendo do modelo da estrada. Deste modo, a probabilidade de um par de elementos conexos m_{ij} ser estrada é,

$$p(x_{n_{ij}} | C_1) \times P(C_1) > p(x_{n_{ij}} | C_2) \times P(C_2). \quad (4.23)$$

Analisa-se nas duas sub-seções seguintes, as classificações de elementos conexos para o caso unidimensional ³¹ e posteriormente o caso multidimensional ³², ambas com base na distribuição normal.

4.6.1. Caso Unidimensional de Classificação de Elementos Conexos

A procura de estradas numa imagem aérea de alta resolução com 256 níveis de cinzento, processo a que se propõe a metodologia descrita neste documento, e de acordo com a Equação 4.23, conduz ao cálculo da densidade de probabilidade $p(x_{n_{ij}} | C_k)$, utilizando

³¹A variável aleatória em estudo é escalar.

³²A variável aleatória em estudo é vectorial

isoladamente cada uma das três características referidas na Secção 4.6. Ou seja, a partir de uma imagem aérea detectam-se as estradas nela contidas utilizando apenas a característica x_{1ij} , repetindo-se a detecção para a característica x_{2ij} , e por fim procede-se de igual modo recorrendo apenas à característica x_{3ij} .

Deste modo, as funções de densidade de probabilidade para uma distribuição normal ou distribuição gaussiana relativas às classes de pertença definidas anteriormente, C_1 e C_2 , são traduzidas respectivamente pelas Equações 4.24 e 4.25,

$$p(x_{n_{ij}} | C_1) = \frac{1}{\sigma_{n_1} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_{n_{ij}} - \mu_{n_1})^2}{2\sigma_{n_1}^2}\right) \text{ com } x_{n_{ij}} \in \mathbb{R} \quad (4.24)$$

$$p(x_{n_{ij}} | C_2) = \frac{1}{\sigma_{n_2} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_{n_{ij}} - \mu_{n_2})^2}{2\sigma_{n_2}^2}\right) \text{ com } x_{n_{ij}} \in \mathbb{R}, \quad (4.25)$$

com $n \in \{1, 2, 3\}$, em que μ_{1_1} , μ_{2_1} e μ_{3_1} representam respectivamente os valores médios μ_{d_1} , μ_{s_1} e μ_{c_1} , e $\sigma_{1_1}^2$, $\sigma_{2_1}^2$ e $\sigma_{3_1}^2$ representam respectivamente as variâncias $\sigma_{d_1}^2$, $\sigma_{s_1}^2$ e $\sigma_{c_1}^2$, correspondentes aos pares m_{ij} classificados como **estrada**. Para os pares m_{ij} classificados como **não é estrada** estabelece-se a mesma correspondência, ou seja, μ_{1_2} , μ_{2_2} e μ_{3_2} representam respectivamente os valores médios μ_{d_2} , μ_{s_2} e μ_{c_2} , e $\sigma_{1_2}^2$, $\sigma_{2_2}^2$ e $\sigma_{3_2}^2$ representam respectivamente as variâncias $\sigma_{d_2}^2$, $\sigma_{s_2}^2$ e $\sigma_{c_2}^2$. Substituindo-se o resultado obtido pelas Equações 4.24 e 4.25, na Equação 4.23 tem-se,

$$\frac{1}{\sigma_{n_1} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_{n_{ij}} - \mu_{n_1})^2}{2\sigma_{n_1}^2}\right) \times P(C_1) > \frac{1}{\sigma_{n_2} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_{n_{ij}} - \mu_{n_2})^2}{2\sigma_{n_2}^2}\right) \times P(C_2), \quad (4.26)$$

cujos resultados podem ser reescritos face à eliminação da constante $\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$,

$$\frac{1}{\sigma_{n_1}} \exp\left(-\frac{(x_{n_{ij}} - \mu_{n_1})^2}{2\sigma_{n_1}^2}\right) \times P(C_1) > \frac{1}{\sigma_{n_2}} \exp\left(-\frac{(x_{n_{ij}} - \mu_{n_2})^2}{2\sigma_{n_2}^2}\right) \times P(C_2). \quad (4.27)$$

Aplicando-se logaritmos a ambos os termos da Equação 4.27, tem-se,

$$\log\left(\frac{1}{\sigma_{n_1}} \exp\left(-\frac{(x_{n_{ij}} - \mu_{n_1})^2}{2\sigma_{n_1}^2}\right) \times P(C_1)\right) > \log\left(\frac{1}{\sigma_{n_2}} \exp\left(-\frac{(x_{n_{ij}} - \mu_{n_2})^2}{2\sigma_{n_2}^2}\right) \times P(C_2)\right) \quad (4.28)$$

$$\begin{aligned} & -\log(\sigma_{n_1}) + \log\left(\exp\left(-\frac{(x_{n_{ij}} - \mu_{n_1})^2}{2\sigma_{n_1}^2}\right)\right) + \log(P(C_1)) > \\ & -\log(\sigma_{n_2}) + \log\left(\exp\left(-\frac{(x_{n_{ij}} - \mu_{n_2})^2}{2\sigma_{n_2}^2}\right)\right) + \log(P(C_2)) \end{aligned} \quad (4.29)$$

$$\begin{aligned}
 & -\log(\sigma_{n_1}) - \frac{1}{2} \left(\frac{x_{n_{ij}} - \mu_{n_1}}{\sigma_{n_1}} \right)^2 + \log(P(C_1)) > \\
 & -\log(\sigma_{n_2}) - \frac{1}{2} \left(\frac{x_{n_{ij}} - \mu_{n_2}}{\sigma_{n_2}} \right)^2 + \log(P(C_2)). \tag{4.30}
 \end{aligned}$$

Deste modo, relativamente à primeira propriedade descrita na Secção 4.6, que diz respeito à variável aleatória d_{ij} , ou seja, a distância média entre cada um dos grupos de pontos de contorno m_{ij} , recorre-se à Equação 4.30,

$$\begin{aligned}
 & -\log(\sigma_{d_1}) - \frac{1}{2} \left(\frac{d_{ij} - \mu_{d_1}}{\sigma_{d_1}} \right)^2 + \log(P(C_1)) > \\
 & -\log(\sigma_{d_2}) - \frac{1}{2} \left(\frac{d_{ij} - \mu_{d_2}}{\sigma_{d_2}} \right)^2 + \log(P(C_2)). \tag{4.31}
 \end{aligned}$$

Relativamente à segunda propriedade, que diz respeito à variável aleatória s_{ij} , ou seja, a variância da distância entre grupos de pontos de contorno m_{ij} , recorre-se também à Equação 4.30,

$$\begin{aligned}
 & -\log(\sigma_{s_1}) - \frac{1}{2} \left(\frac{s_{ij} - \mu_{s_1}}{\sigma_{s_1}} \right)^2 + \log(P(C_1)) > \\
 & -\log(\sigma_{s_2}) - \frac{1}{2} \left(\frac{s_{ij} - \mu_{s_2}}{\sigma_{s_2}} \right)^2 + \log(P(C_2)). \tag{4.32}
 \end{aligned}$$

Finalmente, e para a terceira propriedade, que diz respeito à variável aleatória c_{ij} , ou seja, o nível médio de cinzento entre os grupos de pontos de contorno m_{ij} , a Equação 4.30 reescreve-se,

$$\begin{aligned}
 & -\log(\sigma_{c_1}) - \frac{1}{2} \left(\frac{c_{ij} - \mu_{c_1}}{\sigma_{c_1}} \right)^2 + \log(P(C_1)) > \\
 & -\log(\sigma_{c_2}) - \frac{1}{2} \left(\frac{c_{ij} - \mu_{c_2}}{\sigma_{c_2}} \right)^2 + \log(P(C_2)). \tag{4.33}
 \end{aligned}$$

4.6.2. Caso Multidimensional de Classificação de Elementos Conexos

A procura de estradas numa imagem área de alta resolução com 256 níveis de cinzento é realizada, neste caso, calculando a densidade de probabilidade utilizando simultaneamente as três características $x_{1_{ij}}$, $x_{2_{ij}}$ e $x_{3_{ij}}$ referidas na Secção 4.6.

Deste modo, não é possível o recurso à Equação 4.30, na medida em que ela utiliza uma função de distribuição em que a variável aleatória $x_{n_{ij}} \in \mathbb{R}$. A classificação de

contornos conexos como margens de uma estrada utilizando simultaneamente as três características, requer que a variável aleatória a considerar seja um vector constituído por três componentes reais, em que se represente as propriedades $x_{1_{ij}}$, $x_{2_{ij}}$ e $x_{3_{ij}}$. Deste modo seja \vec{X} o vector aleatório representativo das referidas propriedades,

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} x_{1_{ij}} \\ x_{2_{ij}} \\ x_{3_{ij}} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3, \quad (4.34)$$

em que $x_{1_{ij}}$, $x_{2_{ij}}$ e $x_{3_{ij}}$ são as componentes reais que representam, respectivamente, as propriedades relativas à distância média, variância da distância e o nível médio de cinzento entre os grupos de pontos de contorno m_{ij} .

O vector aleatório \vec{X} é caracterizado, em primeira aproximação, pela função de densidade de probabilidade Normal ou Gaussiana multi-dimensional, que para um vector aleatório real apresenta a seguinte forma (Schalkoff 1992, pág. 39) e (Therrien 1992),

$$p(\vec{X} | C_k) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N}{2}} |\text{cov} \{ \vec{X} \}_k|^{\frac{1}{2}}} \exp \left(-\frac{1}{2} (\vec{X} - \vec{m}_k)^T \text{cov} \{ \vec{X} \}_k^{-1} (\vec{X} - \vec{m}_k) \right), \quad (4.35)$$

em que N é a dimensão de \vec{X} . Esta função de densidade de probabilidade é completamente caracterizada pelo vector médio \vec{m}_k e pela matriz de covariância $\text{cov} \{ \vec{X} \}_k$ associada à classe k , e é a generalização da função de densidade Gaussiana unidimensional para variáveis aleatórias reais (Therrien 1992),

$$f_x(X) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{X - m}{\sigma_x} \right)^2 \right). \quad (4.36)$$

O vector médio associado à classe k , \vec{m}_k , é dado por,

$$\vec{m}_k = \begin{bmatrix} \mu_{1_k} \\ \mu_{2_k} \\ \mu_{3_k} \end{bmatrix}, \quad (4.37)$$

em que μ_{1_k} , μ_{2_k} e μ_{3_k} são respectivamente os valores médios das variáveis aleatórias d_{ij} , s_{ij} e c_{ij} associados à classe k , e a matriz de covariância, assumindo-se a independência condicional de cada uma das propriedades referidas na Secção 4.6, é dada por,

$$\text{cov} \{ \vec{X} \}_k = \begin{bmatrix} \sigma_{1_k}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{2_k}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{3_k}^2 \end{bmatrix}; \quad \text{cov} \{ \vec{X} \}_k^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{1_k}^{-2} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{2_k}^{-2} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{3_k}^{-2} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

em que $\sigma_{1_k}^2$, $\sigma_{2_k}^2$ e $\sigma_{3_k}^2$ são respectivamente as variâncias das variáveis aleatórias d_{ij} , s_{ij} e c_{ij} associadas à classe k . Escreva-se a Equação 4.35 de uma forma mais simplificada,

$$p(\vec{X} | C_k) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N}{2}} |\text{cov} \{ \vec{X} \}_k|^{\frac{1}{2}}} \exp(A), \quad (4.39)$$

em que A é dado por

$$A = -\frac{1}{2} \left(\vec{X} - \vec{m}_k \right)^T \text{cov} \left\{ \vec{X} \right\}_k^{-1} \left(\vec{X} - \vec{m}_k \right). \quad (4.40)$$

Determine-se assim o valor de A ,

$$\begin{aligned} A &= -\frac{1}{2} \left(\left[\vec{X} - \vec{m}_k \right]^T \times \begin{bmatrix} \sigma_{1_k}^{-2} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{2_k}^{-2} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{3_k}^{-2} \end{bmatrix} \times \left[\begin{bmatrix} x_{1_{ij}} \\ x_{2_{ij}} \\ x_{3_{ij}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mu_{1_k} \\ \mu_{2_k} \\ \mu_{3_k} \end{bmatrix} \right] \right) \\ &= -\frac{1}{2} \left(\left[\vec{X} - \vec{m}_k \right]^T \times \begin{bmatrix} \sigma_{1_k}^{-2} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{2_k}^{-2} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{3_k}^{-2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} (x_{1_{ij}} - \mu_{1_k}) \\ (x_{2_{ij}} - \mu_{2_k}) \\ (x_{3_{ij}} - \mu_{3_k}) \end{bmatrix} \right) \\ &= -\frac{1}{2} \left(\left[[x_{1_{ij}} \quad x_{2_{ij}} \quad x_{3_{ij}}] - [\mu_{1_k} \quad \mu_{2_k} \quad \mu_{3_k}] \right] \times \begin{bmatrix} \sigma_{1_k}^{-2} (x_{1_{ij}} - \mu_{1_k}) \\ \sigma_{2_k}^{-2} (x_{2_{ij}} - \mu_{2_k}) \\ \sigma_{3_k}^{-2} (x_{3_{ij}} - \mu_{3_k}) \end{bmatrix} \right) \\ &= -\frac{1}{2} \left(\left[(x_{1_{ij}} - \mu_{1_k}) \quad (x_{2_{ij}} - \mu_{2_k}) \quad (x_{3_{ij}} - \mu_{3_k}) \right] \times \begin{bmatrix} \sigma_{1_k}^{-2} (x_{1_{ij}} - \mu_{1_k}) \\ \sigma_{2_k}^{-2} (x_{2_{ij}} - \mu_{2_k}) \\ \sigma_{3_k}^{-2} (x_{3_{ij}} - \mu_{3_k}) \end{bmatrix} \right) \\ &= -\frac{1}{2} \left[\sigma_{1_k}^{-2} (x_{1_{ij}} - \mu_{1_k})^2 + \sigma_{2_k}^{-2} (x_{2_{ij}} - \mu_{2_k})^2 + \sigma_{3_k}^{-2} (x_{3_{ij}} - \mu_{3_k})^2 \right] \\ &= -\frac{1}{2} \sum_{t=1}^{N=3} \left(\frac{x_{t_{ij}} - \mu_{t_k}}{\sigma_{t_k}} \right)^2. \quad (4.41) \end{aligned}$$

Seja $\left| \text{cov} \left\{ \vec{X} \right\}_k \right|$ o valor do determinante da matriz de covariância,

$$\left| \text{cov} \left\{ \vec{X} \right\}_k \right| = \begin{vmatrix} \sigma_{1_k}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{2_k}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{3_k}^2 \end{vmatrix} = (\sigma_{1_k} \sigma_{2_k} \sigma_{3_k})^2. \quad (4.42)$$

Recorrendo-se aos resultados obtidos pelas Equações 4.41 e 4.42, reescreve-se a Equação 4.35,

$$p \left(\vec{X} \mid C_k \right) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_{1_k} \sigma_{2_k} \sigma_{3_k}} \exp \left(-\frac{1}{2} \sum_{t=1}^{N=3} \left(\frac{x_{t_{ij}} - \mu_{t_k}}{\sigma_{t_k}} \right)^2 \right). \quad (4.43)$$

A expressão 4.23 pode ser reescrita para o caso multidimensional de classificação de componentes conexos, substituindo-se a variável aleatória $x_{n_{ij}} \in \mathbb{R}$ pelo vector aleatório $\vec{X} \in \mathbb{R}^3$,

$$p \left(\vec{X} \mid C_1 \right) \times P \left(C_1 \right) > p \left(\vec{X} \mid C_2 \right) \times P \left(C_2 \right). \quad (4.44)$$

Aplique a função logaritmo à Equação 4.44,

$$\begin{aligned} \log \left(p \left(\vec{X} \mid C_1 \right) \times P \left(C_1 \right) \right) &> \log \left(p \left(\vec{X} \mid C_2 \right) \times P \left(C_2 \right) \right) \\ \log \left(p \left(\vec{X} \mid C_1 \right) \right) + \log \left(P \left(C_1 \right) \right) &> \log \left(p \left(\vec{X} \mid C_2 \right) \right) + \log \left(P \left(C_2 \right) \right). \end{aligned} \quad (4.45)$$

Aplique-se, também, a função logaritmo à Equação 4.43,

$$\begin{aligned} \log \left(p \left(\vec{X} \mid C_k \right) \right) &= \log \left(\frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_{1_k} \sigma_{2_k} \sigma_{3_k}} \exp \left(-\frac{1}{2} \sum_{t=1}^{N=3} \left(\frac{x_{t_{ij}} - \mu_{t_k}}{\sigma_{t_k}} \right)^2 \right) \right) \\ &= \log \left(\frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_{1_k} \sigma_{2_k} \sigma_{3_k}} \right) - \frac{1}{2} \sum_{t=1}^{N=3} \left(\frac{x_{t_{ij}} - \mu_{t_k}}{\sigma_{t_k}} \right)^2 \\ &= -\log \left((2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_{1_k} \sigma_{2_k} \sigma_{3_k} \right) - \frac{1}{2} \sum_{t=1}^{N=3} \left(\frac{x_{t_{ij}} - \mu_{t_k}}{\sigma_{t_k}} \right)^2 \\ &= -\log (2\pi)^{\frac{3}{2}} - \log \sigma_{1_k} - \log \sigma_{2_k} - \log \sigma_{3_k} - \frac{1}{2} \sum_{t=1}^{N=3} \left(\frac{x_{t_{ij}} - \mu_{t_k}}{\sigma_{t_k}} \right)^2 \\ &= -\log (2\pi)^{\frac{3}{2}} - \sum_{t=1}^{N=3} \log \sigma_{t_k} - \frac{1}{2} \sum_{t=1}^{N=3} \left(\frac{x_{t_{ij}} - \mu_{t_k}}{\sigma_{t_k}} \right)^2 \\ &= -\log (2\pi)^{\frac{3}{2}} - \sum_{t=1}^{N=3} \left(\log \sigma_{t_k} + \left(\frac{x_{t_{ij}} - \mu_{t_k}}{\sigma_{t_k}} \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (4.46)$$

De acordo com o resultado obtido, a Equação 4.46 reescreve-se,

$$\begin{aligned} -\log (2\pi)^{\frac{3}{2}} - \sum_{t=1}^{N=3} \left(\log \sigma_{t_1} + \left(\frac{x_{t_{ij}} - \mu_{t_1}}{\sigma_{t_1}} \right)^2 \right) + \log (P (C_1)) &> \\ -\log (2\pi)^{\frac{3}{2}} - \sum_{t=1}^{N=3} \left(\log \sigma_{t_2} + \left(\frac{x_{t_{ij}} - \mu_{t_2}}{\sigma_{t_2}} \right)^2 \right) + \log (P (C_2)). \end{aligned} \quad (4.47)$$

As constantes podem ser eliminadas pois não contribuem para a discriminação entre classes, pelo que a Equação 4.47 simplifica-se,

$$\begin{aligned} -\sum_{t=1}^{N=3} \left(\log \sigma_{t_1} + \left(\frac{x_{t_{ij}} - \mu_{t_1}}{\sigma_{t_1}} \right)^2 \right) + \log (P (C_1)) &> \\ -\sum_{t=1}^{N=3} \left(\log \sigma_{t_2} + \left(\frac{x_{t_{ij}} - \mu_{t_2}}{\sigma_{t_2}} \right)^2 \right) + \log (P (C_2)). \end{aligned} \quad (4.48)$$

Salienta-se, no entanto, que apesar da Equação 4.48 ter sido deduzida para um vector aleatório $\vec{X} \in \mathbb{R}^3$, pode ser facilmente utilizada para a combinação em \mathbb{R}^2 das

três assunções enunciadas na Secção 4.3, substituindo-se o valor do índice máximo do somatório (N) pelo número de elementos do vector aleatório \vec{X} .

O classificador adequado para a classificação dos objectos tratados nesta dissertação, consiste na utilização do caso multidimensional com o recurso às três assunções enunciadas na Secção 4.3. No entanto, e tendo apenas como objectivo a optimização dos tempos de processamento computacional, recorre-se a um processo automático de classificação, baseado no caso multidimensional para a primeira e segunda assunções já caracterizadas³³, seguido do caso unidimensional para a terceira assunção. Deste modo, a obtenção dos valores da variável aleatória c_{ij} (terceira assunção) torna-se mais rápida em virtude do menor número de contornos conexos processados. A Figura 4.20 descreve o classificador automático utilizado neste documento, e que se compõe de dois reconhecedores estatísticos: o primeiro, baseado no conhecimento geométrico do modelo (características 1 e 2, vidé a Secção 4.6)³⁴; o segundo, baseado no conhecimento radiométrico (característica 3, vidé a Secção 4.6)³⁵ do modelo. Obtêm-se, deste modo, bons resultados e em tempo mais curto, conforme se constata através da leitura do Capítulo 5.

As probabilidades *a priori* $P(C_1)$ e $P(C_2)$, são obtidas pelo quociente entre o número total de pares de elementos conexos do **conjunto de teste**³⁶ e pertencentes respectivamente às classes C_1 e C_2 , e o número total de pares de elementos conexos do conjunto de teste.

Calculam-se os valores tomados pela variável d_{ij} , para todas as combinações de pares de componentes conexos (universo dos pares m_{ij}), formados a partir de todos os componentes conexos extraídos de uma imagem aérea, vidé a Figura 4.21.

Os valores da variável s_{ij} , obtêm-se através do cálculo da variância dos elementos pertencentes ao vector de distâncias estabelecido para cada par conexo m_{ij} , com base no mesmo universo de pares m_{ij} , vidé, também, a Figura 4.21.

Para cada par de componentes conexos m_{ij} obtém-se, ainda, um conjunto de pontos da imagem dentro da região por eles definida. Com base nesses pontos e nos valores da intensidade de luminosidade relativa que lhe estão associados, a partir da imagem de níveis de cinzento com oito *bits* de resolução de intensidade, calcula-se o respectivo valor médio. A Figura 4.22, representa os resultados obtidos na obtenção das faixas de pontos entre dois componentes conexos ij , de modo a obter o valor da variável c_{ij} .

³³Este processo conduz à obtenção de pares de contornos conexos que se apresentam paralelos. Note-se, porém, a existência de pares de contornos conexos paralelos que não são margens de um troço de estrada, facto que se constata no Capítulo 5.

³⁴Classificação de contornos conexos em **contornos paralelos**

³⁵Classificação de **contornos paralelos** em **margens de um troço de estrada**

³⁶Designa-se por **conjunto de teste** ao conjunto de imagens utilizadas nesta dissertação para o treino do modelo descrito.

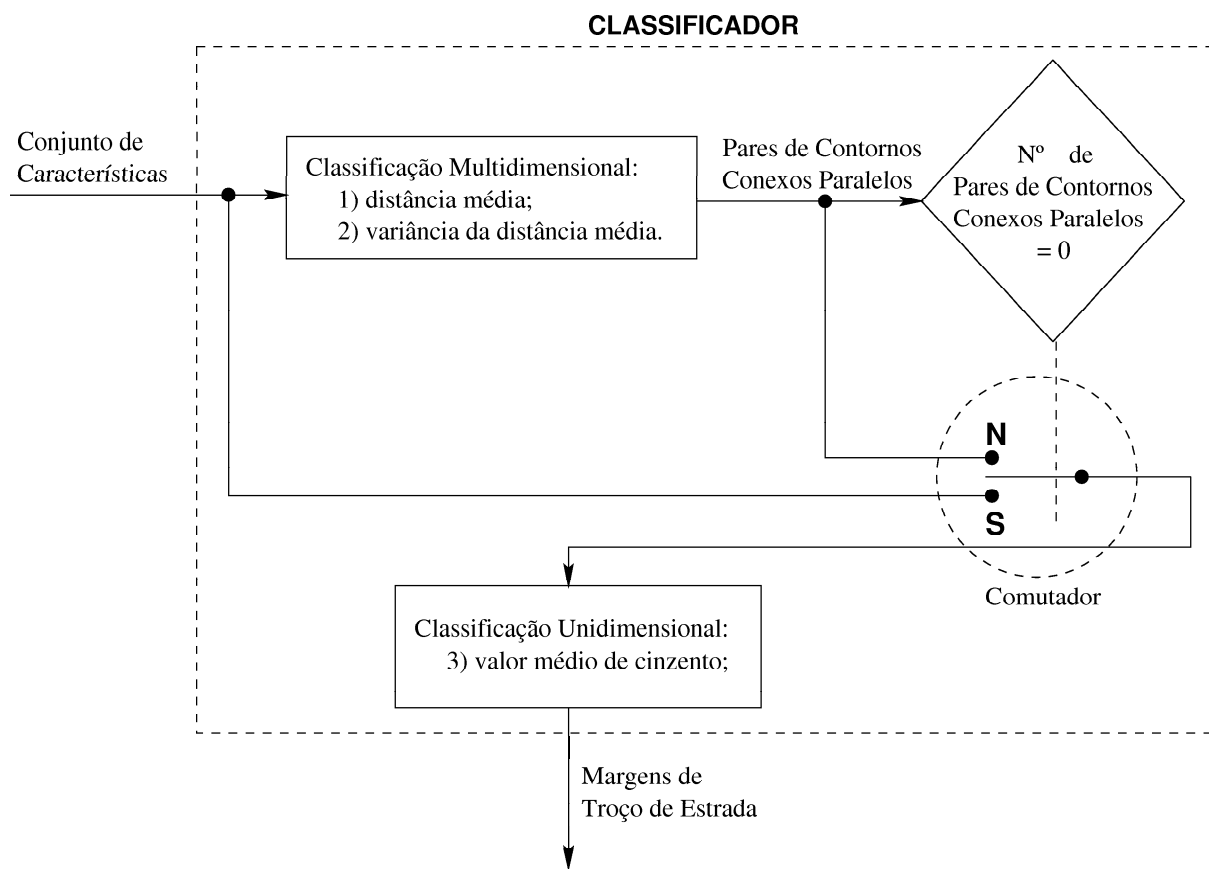


Figura 4.20.: O diagrama da figura exhibe o bloco **classificador** apresentado no diagrama da Figura 4.9. O algoritmo utilizado para a obtenção dos valores da variável aleatória c_{ij} conduz a elevados tempos de processamento computacional, em virtude da quantidade de *pixel* a processar. A sua redução, consiste em diminuir o número de contornos conexos a tratar pelo reconhecedor radiométrico (caso unidimensional). Deste modo, o classificador descrito na figura evita, para os casos em que existem contornos conexos classificados como **contornos conexos paralelos** (comutador em posição **N**), o processamento de todos os contornos conexos resultantes da detecção de contornos, mas apenas daqueles que se consideram paralelos e que, em geral, são em menor número que os primeiros. Para os casos em que o número de **contornos conexos paralelos** é nulo (comutador em posição **S**), o sistema é então obrigado a processar todos os contornos conexos resultantes da detecção de contornos. (comutador em posição **S**).

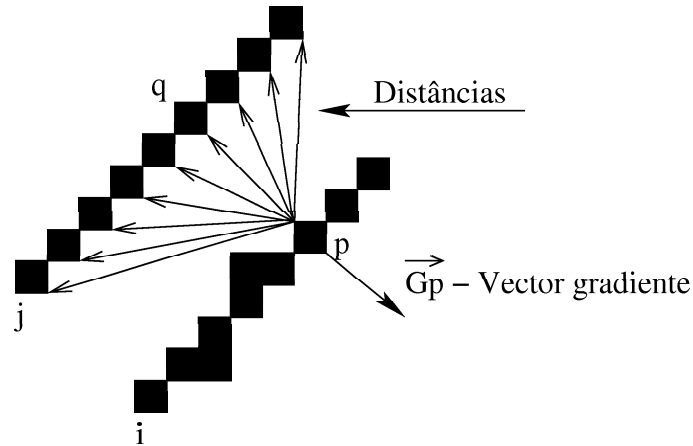
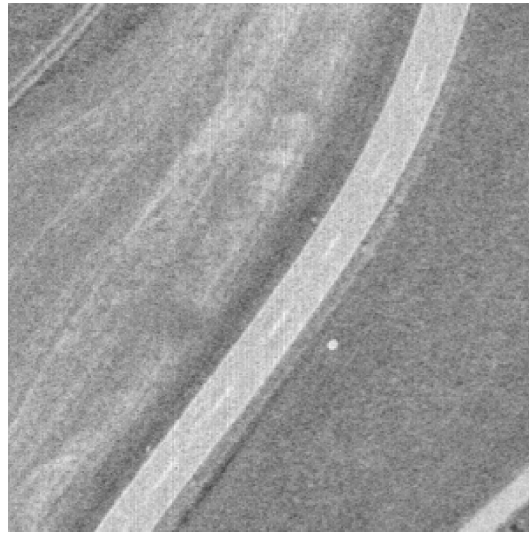


Figura 4.21.: A figura representa a procura sobre o componente conexo \mathbf{j} , com base num ponto \mathbf{p} do componente conexo \mathbf{i} , de um ponto \mathbf{q} para o cálculo da respectiva distância entre eles. Para o ponto \mathbf{p} do componente conexo \mathbf{i} , percorrem-se todos os pontos do componente conexo \mathbf{j} e calculam-se os cossenos dos ângulos formados pelos vectores definidos pelas diferenças de coordenadas dos pontos em causa e o vector gradiente do ponto \mathbf{p} . Obtém-se, então, um vector com tantos elementos quanto o número de pontos do componente conexo \mathbf{j} . Procura-se nesse vector o valor próximo de 1 em valor absoluto e identifica-se o ponto correspondente, que no exemplo da figura corresponde ao ponto \mathbf{q} ou seja, identifica-se o paralelismo entre o vector definido pelo ponto \mathbf{p} do componente conexo \mathbf{i} e pelo ponto \mathbf{q} do componente conexo \mathbf{j} , e o vector gradiente no ponto \mathbf{p} . Calcula-se, de seguida, a distância entre os pontos \mathbf{p} e \mathbf{q} . Executa-se o processo para todos os pontos do elemento conexo \mathbf{i} , obtendo-se um vector de distâncias com tantos elementos quanto o número de pontos do componente conexo \mathbf{i} . O valor a atribuir à variável aleatória d_{ij} para o par m_{ij} em estudo, é o valor médio dos elementos do vector de distâncias obtido. O valor a atribuir à variável aleatória c_{ij} , também para o par m_{ij} em estudo é a variância dos elementos do vector de distâncias referido.

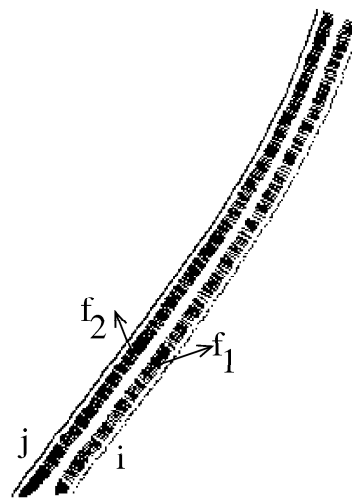
4.6. A CLASSIFICAÇÃO DE CONTORNOS CONEXOS COMO MARGENS DE UMA ESTRADA



(a) Imagem de entrada para os resultados obtidos nas Figuras 4.22(b) e 4.22(c)



(b) A imagem da figura, representa os contornos obtidos a partir da imagem da Figura 4.22(a) com base na metodologia descrita nesta dissertação. Os contornos mais a escuro são as margens do trecho da estrada.



(c) A imagem da figura, representa o conjunto de pontos dentro da região definida pelos componentes conexos ij . A faixa f_1 representa os pontos próximos do componente conexo i e a faixa f_2 representa os pontos próximos do componente conexo j .

Figura 4.22.: Sequência de resultados conducentes à obtenção das faixas de pontos no interior da região definida pelo par de componentes conexos ij , para o cálculo do valor da variável c_{ij} .

4.7. Determinação do Eixo da Via

Conhecendo os pontos de contorno que definem as margens de uma estrada, é fácil obter o respectivo eixo da via. Considere-se que M_1 é o conjunto dos pontos que definem uma das margens da estrada e que M_2 é o conjunto dos pontos que definem a outra margem da estrada. O conjunto V representa os pontos que definem o eixo da via. O conjunto V pode ser obtido através do seguinte processo:

1. examina-se cada ponto $p = (i, j_1) \in M_1$ e extrai-se o valor da abscissa i ;
2. procura-se o ponto $s = (i, j_2) \in M_2$;
3. adiciona-se a V o ponto $r = (i, (j_2 + j_1)/2)$

ou

1. examina-se cada ponto $p = (i_1, j) \in M_1$ e extrai-se o valor da ordenada j ;
2. procura-se o ponto $s = (i_2, j) \in M_2$;
3. adiciona-se a V o ponto $r = ((i_2 + i_1)/2, j)$

de forma a maximizar o número de pontos de V .

Outro método para a obtenção dos pontos definidores do eixo de via de um troço de estrada extraído, consiste na determinação dos pontos médios dos segmentos de recta que correspondem às distâncias descritas na Secção 4.6.2, entre os pontos do componente conexo \mathbf{i} e os pontos do componente conexo \mathbf{j} , para o par m_{ij} classificado como margens de um troço de estrada.

Sejam \mathbf{i} e \mathbf{j} dois componentes conexos definidores das margens de um mesmo troço de estrada extraído, vidé a Figura 4.23. Tal como realizado na Secção 4.6.2, para cada um dos pontos do elemento conexo \mathbf{i} , identificam-se os pontos do elemento conexo \mathbf{j} que permitem estabelecer uma relação espacial de paralelismo entre os vectores definidores das diferentes distâncias e os vectores gradiente. Para todos os pares de pontos encontrados definem-se, deste modo, um conjunto de segmentos de recta, tantos quanto o número de pontos do componente conexo \mathbf{i} . Posteriormente, calculam-se as coordenadas dos seus pontos médios, que correspondem aos pontos que formam o eixo da via do troço de estrada em estudo.

Dos dois processos anteriormente referidos, opta-se nesta dissertação pelo primeiro, por ser aquele que conduz a tempos de processamento inferiores e que não apresenta descontinuidades no eixo de via obtido. O segundo processo, pode apresentar bons tempos de processamento desde que sejam anteriormente armazenados os resultados provenientes do cálculo dos valores da variável d_{ij} , mas é comum a apresentação de descontinuidades no eixo da via.

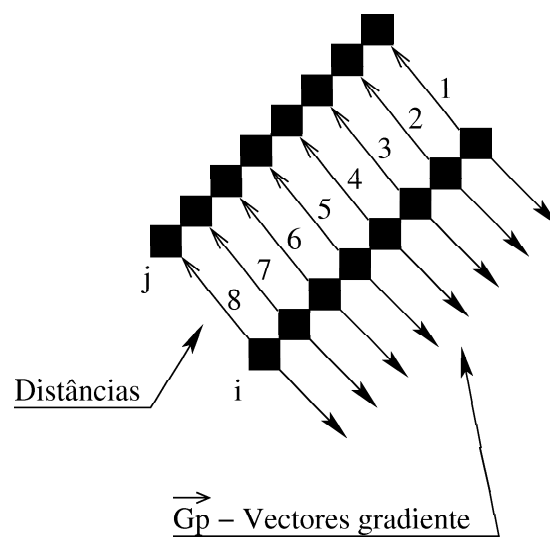


Figura 4.23.: Exemplo do cálculo dos pontos correspondentes ao eixo da via. Identificadas as distâncias **1 a 8**, determinam-se os respectivos pontos médios com base na semi-soma das coordenadas dos pontos que lhes correspondem.

4. EXTRACÇÃO DAS MARGENS E DO EIXO DE VIA DAS ESTRADAS

Uma teoria é uma série de afirmações expressas de uma forma literal ou por fórmulas matemáticas, referidas às leis correspondentes a um complexo bem definido de fenómenos. Deste modo, existe uma teoria do electromagnetismo, que abrange todas as leis da corrente eléctrica como aquelas que tratam dos campos eléctrico e magnético, uma teoria do movimento dos fluídos, etc.. A Ciência é dominada por uma válida interacção entre a experiência e a teoria. Os resultados experimentais impulsionam a formulação de uma teoria que é capaz de explicá-los ou justificá-los. Aliás, graças à teoria é possível formular predições sobre o resultado que se obterá em experiências posteriores, predições essas que mais tarde sejam comprovadas de uma forma prática. Dependendo do resultado desta verificação posterior, considera-se a teoria confirmada ou carenciada de uma revisão mais ou menos profunda.

Science and Technic, Bertelsmann Lexikothek Verlag Gmbh, Volume I, 1990

5

Resultados Experimentais

Conteúdo

5.1. Características dos Conjuntos de Teste	91
5.2. Parâmetros do Método de Extração Automática	93
5.3. Resultados Obtidos	95
5.4. Análise dos Resultados Obtidos	120

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, apresenta-se o modelo experimental para a metodologia de extracção automática de estradas descrita nesta dissertação. Este modelo experimental, compreende a caracterização dos conjuntos de dados utilizados no teste; os conjuntos de teste; os resultados experimentais e os dados extraídos da análise destes.

A Secção 5.1, enumera as características das imagens aéreas que formam os conjuntos de teste, nomeadamente, as suas dimensões, resolução espacial e o número de níveis de intensidade. São também enunciadas, as diversas características estruturais dos objectos nelas contidas, e que são objecto da extracção automática. A Secção 5.2, caracteriza alguns dos parâmetros utilizados na metodologia de extracção de estradas, ou seja, descreve os parâmetros utilizados como factor de escala (σ), limiar e dimensão do filtro aplicado. A Secção 5.3 ilustra, os resultados obtidos pela metodologia descrita nesta dissertação, sob a forma de imagens, tabelas de valores e gráficos. Na Secção 5.4 realiza-se a análise dos resultados obtidos.

5.1. Características dos Conjuntos de Teste

O método de extracção automática das margens e eixo de via de um troço de estrada visível, a partir de imagens aéreas de alta resolução, descrito nesta dissertação, começa por ser aplicado a um conjunto de vinte e duas imagens de níveis de cinzento, discretizados com oito *bit* de resolução de intensidade e 0,25m de resolução espacial. As imagens têm a dimensão espacial de $300 \text{ pixel} \times 300 \text{ pixel}$ ¹, e são sub-conjuntos da imagem exibida na Figura 5.1², cujas características estão descritas na Tabela 5.1, apresentando no seu contexto troços de estradas visíveis de duas larguras: troços de estrada asfaltada que apresentam uma largura aproximada de 7 metros, com uma faixa de rodagem para duas vias separadas por um traço interrompido de cor branca³; troços de estrada de terra batida que apresentam uma largura aproximada de 3,5 metros, com uma faixa de rodagem para duas vias sem separador central⁴.

Em todas as vinte e duas imagens pertencentes ao conjunto de teste referido, os troços de estrada são visualmente bem identificados, ou seja, a definição dos seus contornos não é prejudicada pela presença de sombras, quer parciais (eliminação de uma das suas margens), quer totais (ocultação total do troço de estrada), nem se observa a presença de veículos ou cruzamentos.

¹A escolha da dimensão indicada teve apenas como condicionante o tempo na obtenção dos resultados.

²A imagem correspondente à Figura 5.1 foi obtida por *download* do site <http://www.photo.verm.tu-muenchen.de/staff/wied/evaluation/testsetMarchetsreut.html> (Maio, 1999). A imagem escolhida surge em várias publicações da área (Baumgartner, Steger, Mayer, e Eckstein 1997), (Mayer, Laptev, Baumgartner, e Steger 1997), (Meyer e Steger 1996), (Steger, Eckstein, e Wiedemann 1996), (Steger 1996), entre outras, e assume-se como padrão de comparação experimental

³São designadas nesta dissertação por **estradas do tipo B**.

⁴São designadas nesta dissertação por **estradas do tipo A**.



Figura 5.1.: A imagem da figura representa uma área rural. Foi obtida a partir do site <http://www.photo.verm.tu-muenchen.de/staff/wied/evaluation/testsetMarchetsreut.html> (Maio 1999). É uma imagem de níveis de cinzento de oito *bit* de resolução de intensidade, cujas características estão enunciadas na Tabela 5.1, e está ortorectificada. Os resultados intermédios decorrentes do processo de detecção descrito nesta dissertação referem-se à zona da imagem correspondente ao interior do quadrado branco (zona central da imagem).

Formato da Imagem	Dimensão da Imagem [<i>pixel</i>]	Resolução Espacial [m]
tiff	4000 x 4000	0,25

Tabela 5.1.: Características da imagem correspondente à Figura 5.1.

Em fase posterior, engloba-se um segundo conjunto de teste composto por seis imagens de alta resolução, também sub-conjuntos da imagem exibida da Figura 5.1, de características de resolução espacial e resolução de intensidade idênticas ao primeiro conjunto de teste, que contemplam diversos pormenores: uma imagem que reflecte a existência de veículos no troço de estrada a extrair; duas imagens que reflectem a existência de sombras parciais que ocultam apenas uma das margens do troço de estrada a extrair; uma imagem que reflecte a existência de sombras totais que ocultam as duas margens do troço de estrada a extrair; uma imagem de um entroncamento e uma imagem de um cruzamento.

O referencial de todas as imagens apresentadas nesta dissertação, é constituído por dois eixos cartesianos, $R = (OX, OY)$.

Para uma melhor caracterização de todos os procedimentos estudados nesta dissertação, exibem-se todos os resultados intermédios decorrentes do processo de extracção automática para a imagem representada na Figura 5.2. A mesma apresenta características de resolução espacial e resolução de intensidade idênticas à da imagem da Figura 5.1. No entanto, possui uma dimensão de $790 \text{ pixel} \times 790 \text{ pixel}$.

5.2. Parâmetros do Método de Extracção Automática

A aplicação da primeira fase da metodologia descrita nesta dissertação sobre todas as imagens caracterizadas na Secção 5.1, obriga à definição do factor de escala (σ) utilizado no filtro de derivada da Gaussiana — vide a Secção 4.4.1 — e a determinação da respectiva área de influência, cujo desenvolvimento teórico é realizado no Apêndice A. O factor de escala a utilizar (σ) é obtido experimentalmente, por meio de tentativa e erro sobre uma pequena área da imagem, e é aquele que conduz aos melhores resultados. A área de influência do filtro, portanto a sua largura, é proporcional ao factor de escala, tendo-se obtido a relação $w \approx 2 \times \sigma$ como se conclui na Equação A.11. De acordo com a análise realizada na Secção 4.4.1— Figura 4.14 —, utiliza-se para (σ) o valor 2,0, o que conduz a um filtro de dimensão $4 \text{ pixel} \times 4 \text{ pixel}$.

A operação de limiar introduzida nesta fase é realizada para o patamar 100^5 , que se considera experimentalmente adequado para os resultados obtidos.

Posteriormente, a segunda fase da metodologia descrita desta dissertação é, também,

⁵O valor em referência é um número inteiro entre 0 a 255, em virtude dos níveis de cinzento que constituem a referência para as várias normalizações realizadas.



Figura 5.2.: A figura mostra a imagem sobre a qual foi aplicada a metodologia descrita neste documento e apresentados todos os resultados intermédios. É uma parte da imagem representada na Figura 5.1. É também uma imagem de níveis de cinzento de oito *bit* de resolução de intensidade, com 790 x 790 *pixel*, apresenta uma resolução espacial de 0,25 metros, e foi convertida para o formato PGM.

aplicada a todas as imagens caracterizadas na Secção 5.1, recorrendo-se ao reconhecedor estatístico das estradas descrito na Secção 4.6.2, Figura 4.20.

A aplicação da metodologia descrita nesta dissertação ao segundo conjunto de teste é feita nos mesmos moldes do primeiro conjunto de teste. No entanto, para o caso da imagem de um entroncamento e da imagem de um cruzamento não se obtiveram resultados satisfatórios, ou seja, a metodologia descrita nesta dissertação gera um conjunto vazio, já que as características 1 e 2, vidé a Secção 4.6, não se verificam nas referidas zonas. O conhecimento geométrico de que as margens se mantêm paralelas e de que a distância entre elas apresenta uma variação nula não é assegurado, em virtude da disposição geométrica relativa dos respectivos componentes conexos (elementos de contorno). Deste modo, para as duas imagens referidas o classificador opera apenas uma classificação unidimensional baseada apenas na terceira característica do modelo da estrada descrito na Secção 4.6 (conhecimento radiométrico), conforme se constata através da análise da Figura 4.20, Secção 4.6.2. Apesar de se obterem resultados pouco satisfatórios, adquiriu-se algum conhecimento experimental relativo ao problema da detecção de zonas cruzamentos e entroncamentos.

5.3. Resultados Obtidos

Os resultados da aplicação da metodologia descrita nesta dissertação apresentam-se sob a forma de imagens, gráficos e tabelas. Tendo em vista a caracterização de todos os procedimentos estudados exibem-se para a imagem da Figura 5.2, todos os resultados intermédios do processo de extracção automática.

A imagem correspondente à Figura 5.3, exhibe os valores do gradiente da imagem da Figura 5.2, segundo a direcção OX . A dimensão do filtro aplicado é de $4 \text{ pixel} \times 4 \text{ pixel}$, como resulta do cálculo da área de influência, vidé o Apêndice A, Equação A.11. O factor de escala utilizado ⁶ é o valor experimental $\sigma = 2,0$, por ser aquele que permitiu o melhor resultado para a imagem correspondente aos dados de entrada, vidé a Figura 5.2. A escolha dos valores de σ é, na prática, muito frequentemente realizada desta forma. A Figura 5.4 exhibe a representação, como imagem, da tabela bidimensional correspondente ao módulo do gradiente.

A aplicação da operação de limiarização à imagem do módulo do gradiente, permite obter a primeira aproximação aos pontos do contorno previstos pela metodologia, e cujo resultado é observável no mapa de pontos de contorno exibido na Figura 5.5. O limiar utilizado corresponde ao valor 100, ou seja, a imagem da Figura 5.5 mostra os pontos para os quais o valor associado ao pixel apresenta um valor igual ou superior ao limiar estabelecido ⁷.

A imagem da Figura 5.6, representa os contornos resultantes da aplicação do operador de emagrecimento de contornos desenvolvido nesta dissertação. O resultado final da

⁶O factor de escala é traduzido por (σ) , vidé a equação 4.3.

⁷Os pontos obtidos correspondem a elevados valores do gradiente.

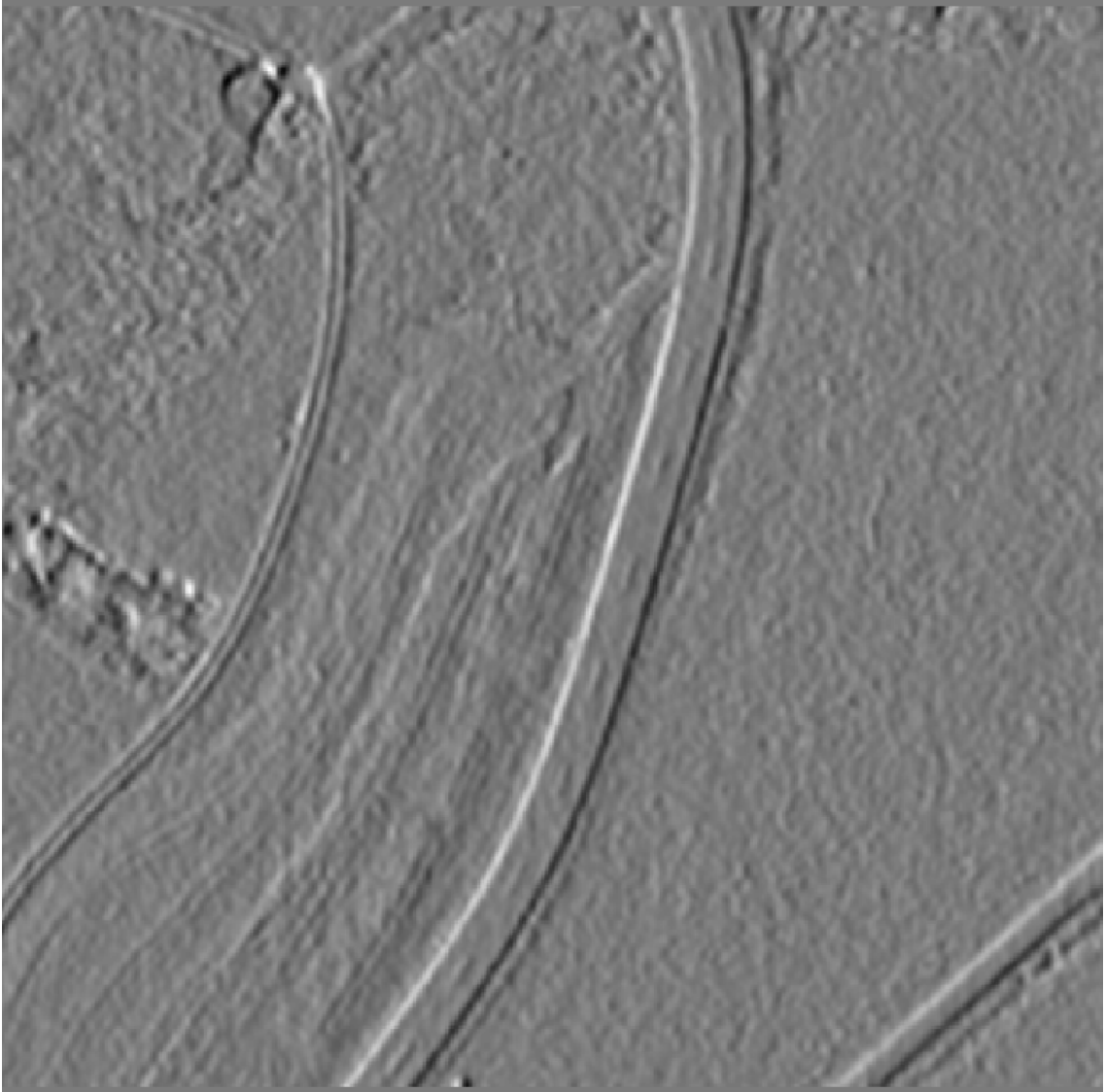


Figura 5.3.: A imagem da figura, representa o valor da componente do gradiente da imagem correspondente à Figura 5.2, segundo a direcção OX . Observem-se as duas margens da estrada (uma em tom mais claro e outra em tom mais escuro), que são pontos da imagem em que se verifica uma variação abrupta da função imagem, ou seja, maior amplitude do gradiente.

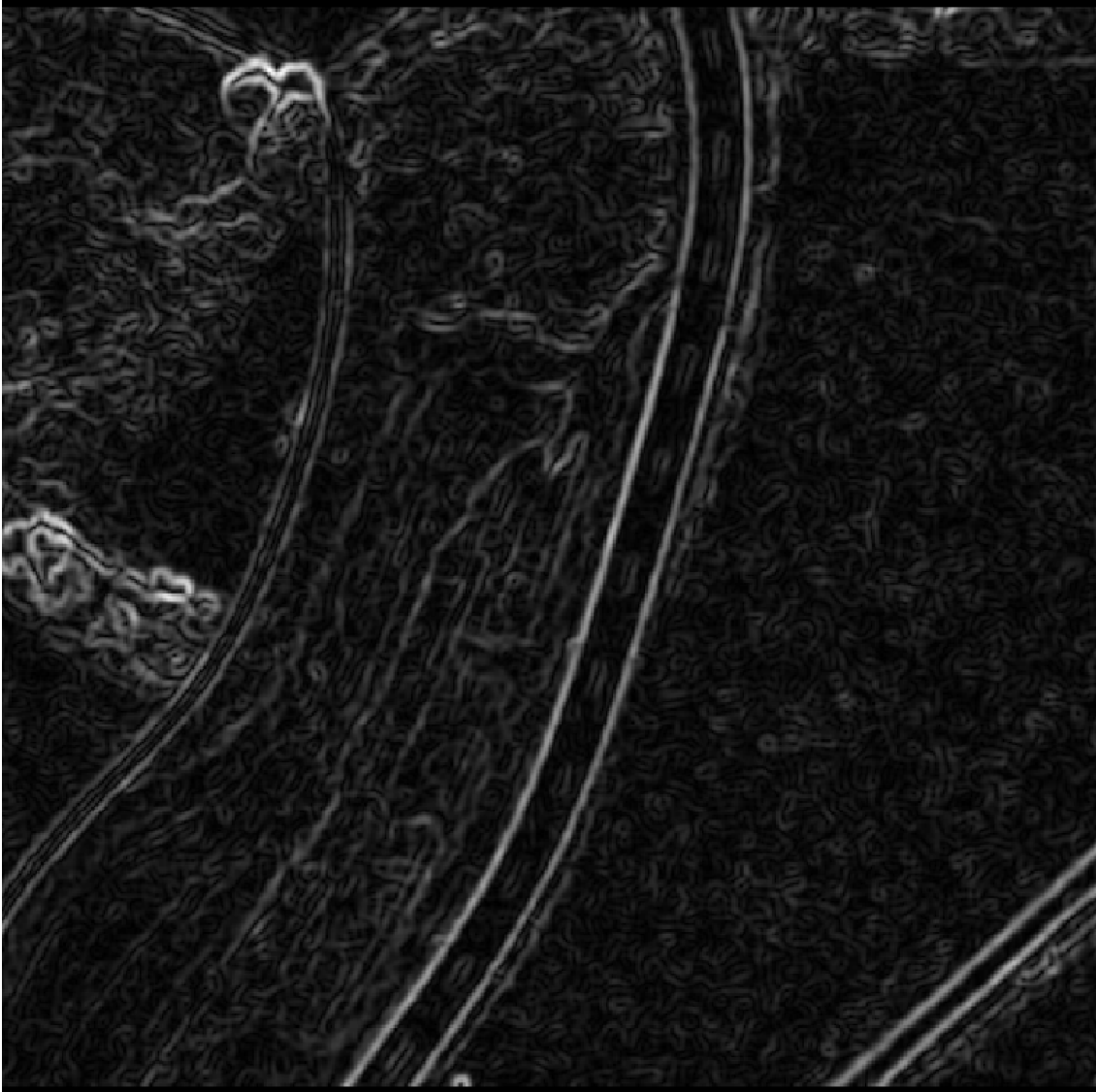


Figura 5.4.: A imagem da figura, representa o módulo da amplitude do gradiente. Nela observa-se, com alguma clareza, o conjunto de pontos correspondentes às duas estruturas lineares que delimitam as duas margens da estrada e que se desenvolvem no sentido Norte-Sul.

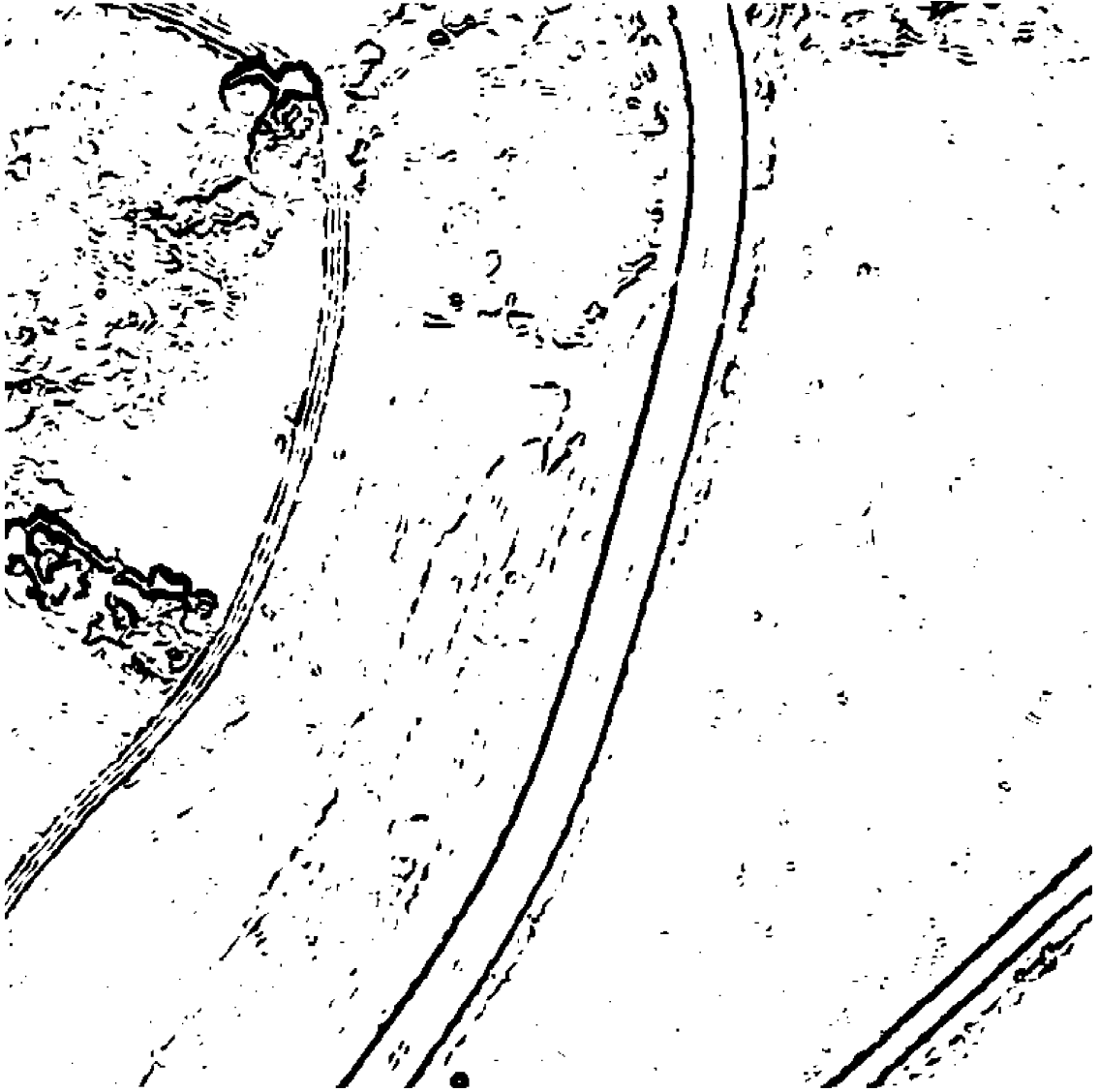


Figura 5.5.: A figura exhibe a imagem binária, obtida através da selecção por um determinado limiar, dos pontos da imagem representada na Figura 5.5 a que correspondem módulos do gradiente suficientemente elevados, que garantem a presença de um contorno. Nela observa-se que os contornos obtidos, delimitadores das margens da estrada a extrair, apresentam uma largura superior a um *pixel*.

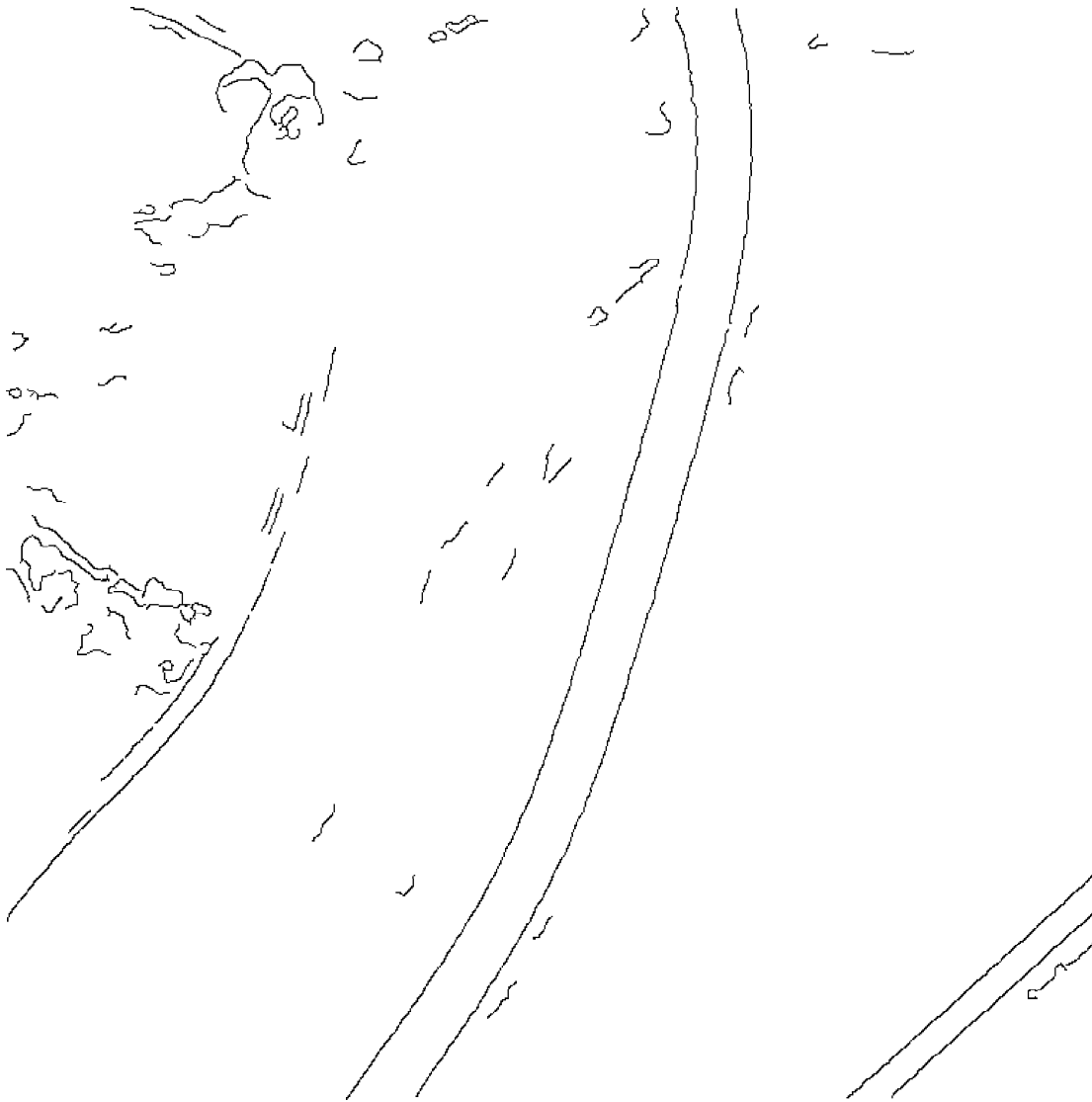


Figura 5.6.: A figura exhibe a imagem dos contornos obtidos pela primeira fase da metodologia realizada nesta dissertação. Nela observam-se as estruturas lineares que se identificam como as margens do trecho de estrada que se desenvolve de norte para sul. Os contornos apresentados, são obtidos após a eliminação daqueles que apresentam um comprimento mínimo igual à largura da estrada, ou seja, de comprimento real inferior a 7,0 metros.

aplicação da primeira fase da metodologia descrita nesta dissertação é atingido, e tem como objectivo obter o conjunto de componentes conexos da imagem da Figura 5.2.

O resultado da aplicação da segunda fase do processo de extracção automática das margens de troços de estrada desenvolvida nesta dissertação, é visto na imagem da Figura 5.7. Utiliza-se o reconhecedor estatístico descrito na Secção 4.6.2, Figura 4.20. As margens obtidas são o resultado da procura automática de **estradas do tipo B** e correspondem ao par de elementos conexos que apresenta a maior probabilidade de **ser estrada**. A classificação é realizada, tomando como base um valor de verosimilhança logarítmica ⁸ de -8 ⁹, ou seja, os pares de contornos conexos **são estradas**, quando apresentam um valor de verosimilhança logarítmica superior à especificada.

O resultado final da metodologia encontra-se exibido na Figura 5.8. Sobrepõem-se alguns dos pontos dos componentes conexos classificados como margens do troço de **estrada do tipo B**, sobre a imagem de entrada para averiguar da sua localização. O eixo da via é calculado subsequentemente.

Os resultados mais significativos e correspondentes ao primeiro conjunto de teste apresentam-se de seguida, vidé as Figuras 5.9 a 5.14. O Apêndice B contém um conjunto mais exaustivo de resultados experimentais. Visualizam-se por cada página quatro figuras: a figura no canto superior esquerdo de cada página corresponde à imagem de entrada; a figura no canto superior direito de cada página ilustra os resultados da aplicação da primeira fase da metodologia, ou seja, a detecção de contornos e respectivo agrupamento de pontos para a obtenção dos contornos conexos emagrecidos; a figura no canto inferior esquerdo ilustra os resultados obtidos pelo reconhecedor estatístico desenvolvido neste dissertação, vidé a Secção 4.6.2— Figura 4.20 —, e que corresponde à segunda fase da metodologia; a figura no canto inferior direito corresponde à sobreposição dos componentes classificados como troços de estrada com a imagem de entrada, por forma a averiguar da qualidade na sua localização. Não se apresentam os pontos correspondentes ao eixo de via, já que os mesmos são obtidos a partir dos componentes conexos classificados, e por se considerar que a Figura 5.8 constitui já um bom exemplo do seu cálculo.

As Tabelas 5.2 e 5.3 apresentam os valores numéricos obtidos pela aplicação do reconhecedor estatístico baseado nas características geométricas do modelo de estrada desenvolvido nesta dissertação, e permitem a realização dos gráficos representados na Figura 5.15. Os gráficos têm como objectivo a definição da região de decisão para cada um dos classificadores, respectivamente, **contornos paralelos do tipo A** ¹⁰ e

⁸A função de verosimilhança (ou abreviadamente verosimilhança) de uma amostra discreta $\vec{x} = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ é a probabilidade elementar de observar (x_1, \dots, x_n) considerada como função de θ , condicional da amostra. Para uma amostra contínua é a densidade de probabilidade correspondente. Escreve-se como $L(\theta | \vec{x})$ (L é a inicial de *likelihood*) A função de verosimilhança logarítmica deriva-se das funções de probabilidade através da aplicação da função logaritmo, mas não é normalizada como é a probabilidade.

⁹O limiar adoptado foi aquele que conduziu a melhores resultados práticos.

¹⁰São contornos correspondentes a margens de um troço de **estrada do tipo A**.

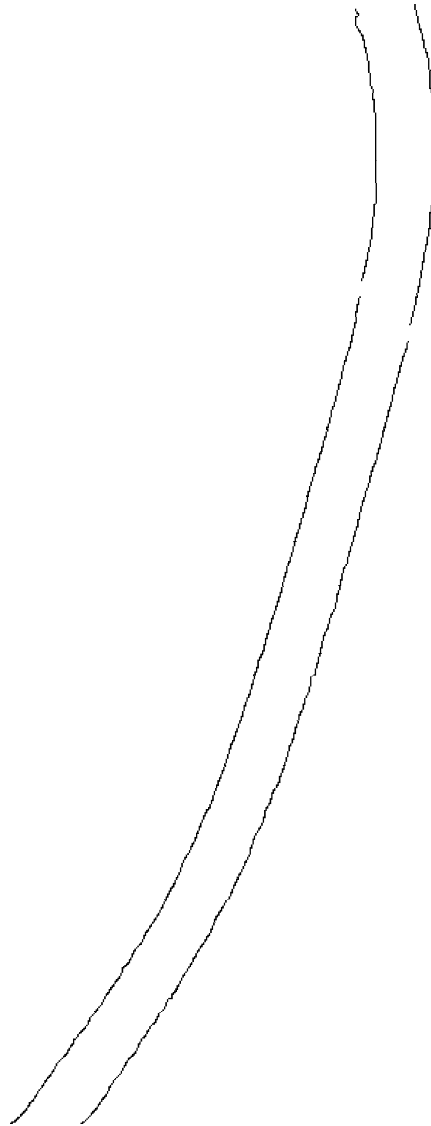


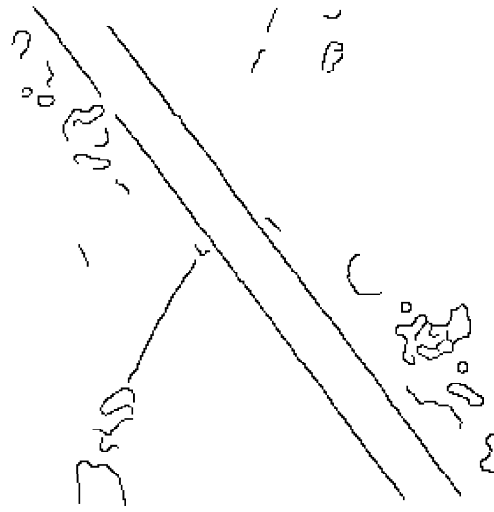
Figura 5.7.: A figura da imagem, exibe os componentes conexos classificados como margens do trecho de **estrada do tipo B**, que se desenvolve de norte para sul. É o resultado da aplicação da segunda fase da metodologia descrita nesta dissertação.



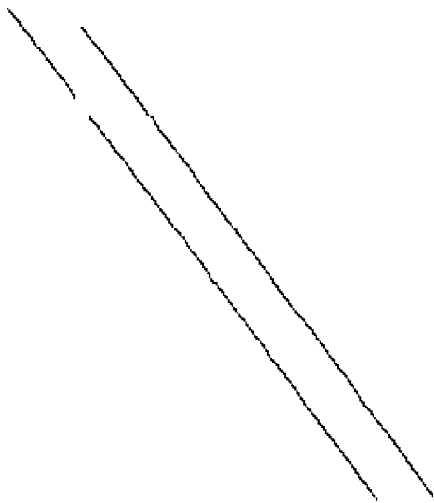
Figura 5.8.: A imagem representada pela figura, exibe a sobreposição de uma parte dos contornos, previamente emagrecidos, das margens da estrada à imagem original. Exibe, também, a sobreposição sobre a imagem original dos pontos que foram determinados como eixo da via.



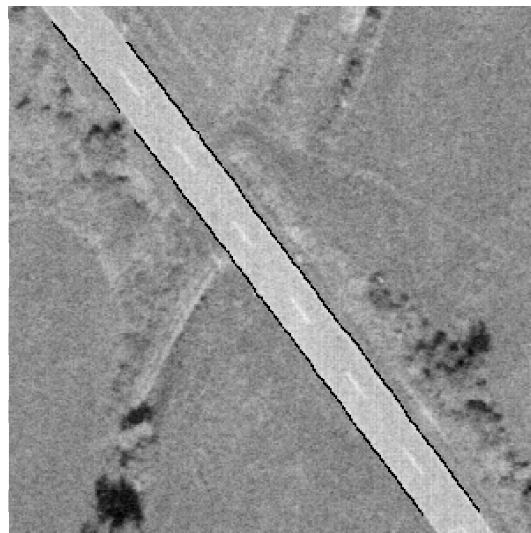
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



(c) Imagem dos contornos conexos processados.

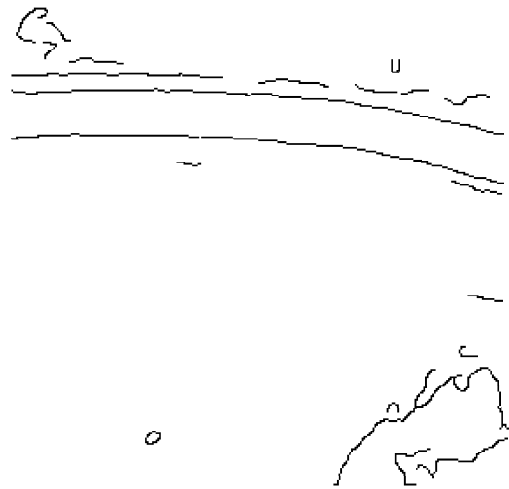


(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

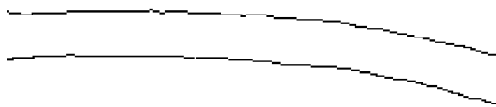
Figura 5.9.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que representa um trecho rectilíneo de uma **estrada do tipo B**. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.



(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



(c) Imagem dos contornos conexos processados.

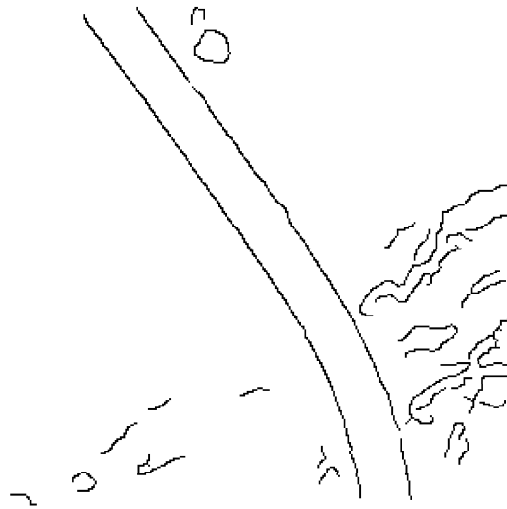


(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

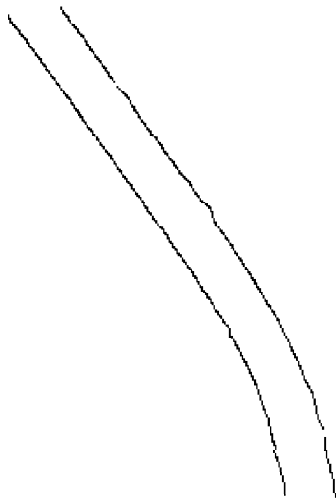
Figura 5.10.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que representa um trecho curvo de uma **estrada do tipo B**. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.



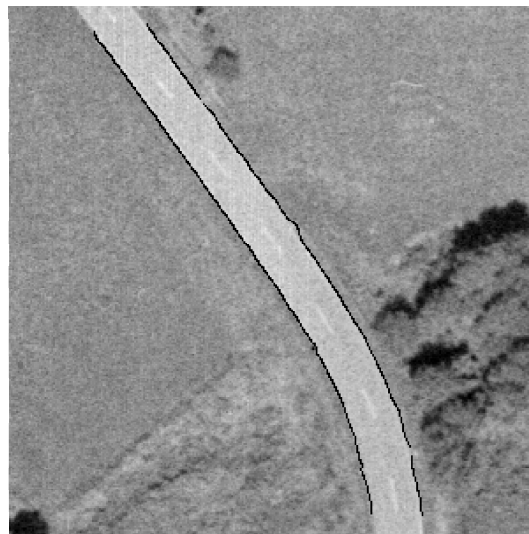
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



(c) Imagem dos contornos conexos processados.

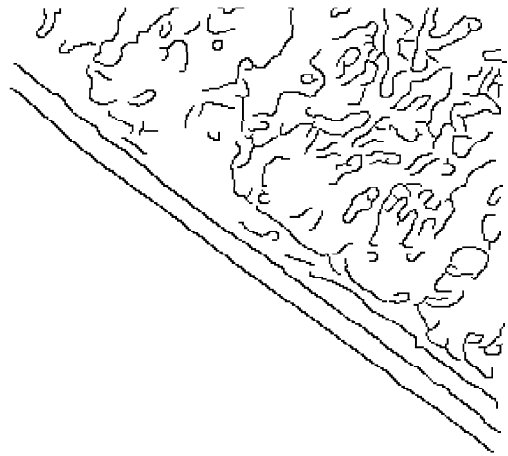


(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

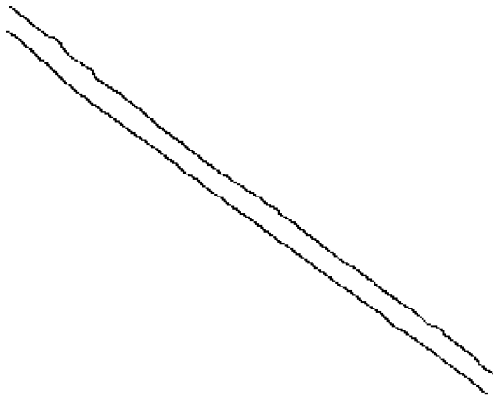
Figura 5.11.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que representa um trecho misto (parte retilíneo e parte curvo) de **estrada do tipo B**. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.



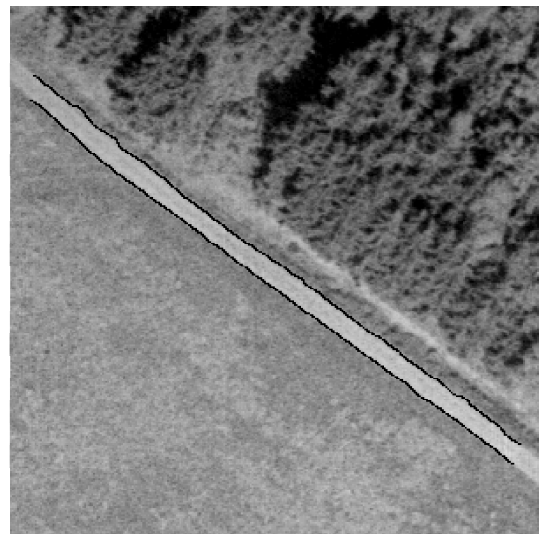
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.

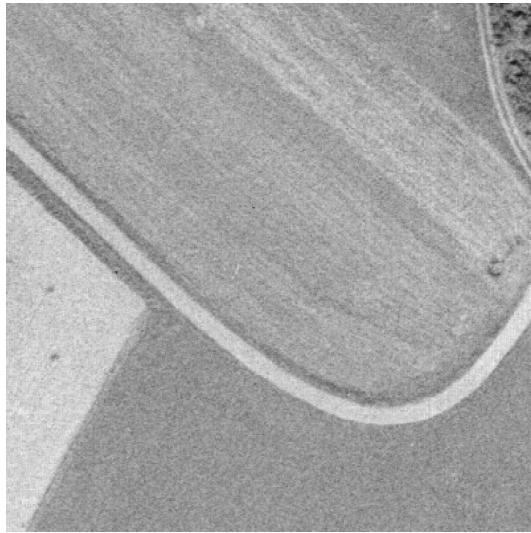


(c) Imagem dos contornos conexos processados.

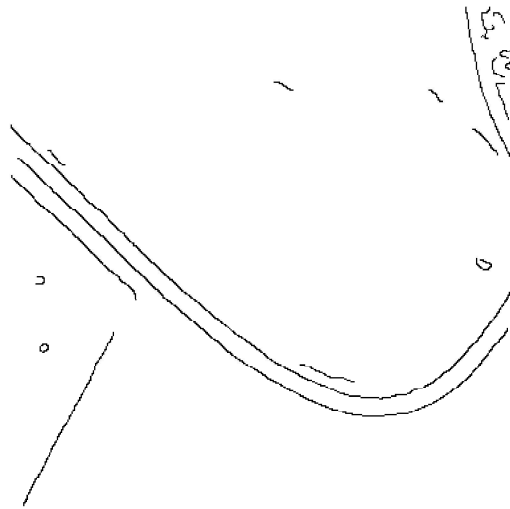


(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

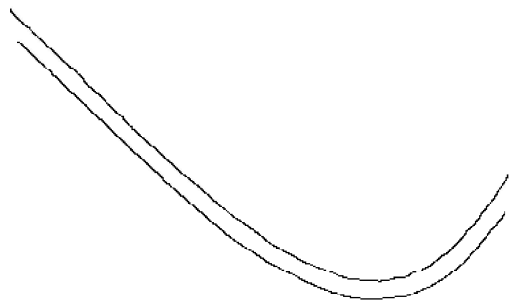
Figura 5.12.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que representa um trecho retilíneo de uma **estrada do tipo A**. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.



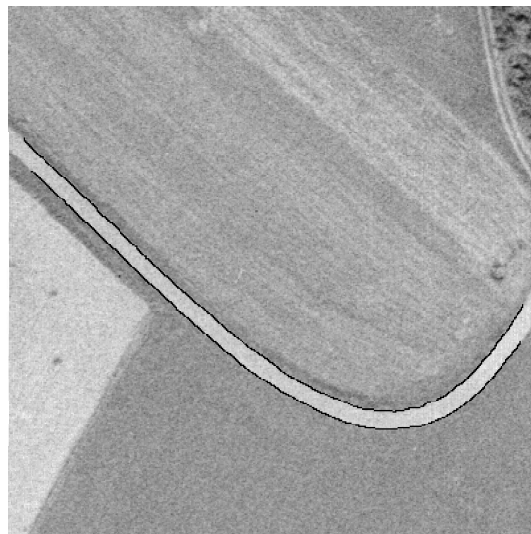
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.

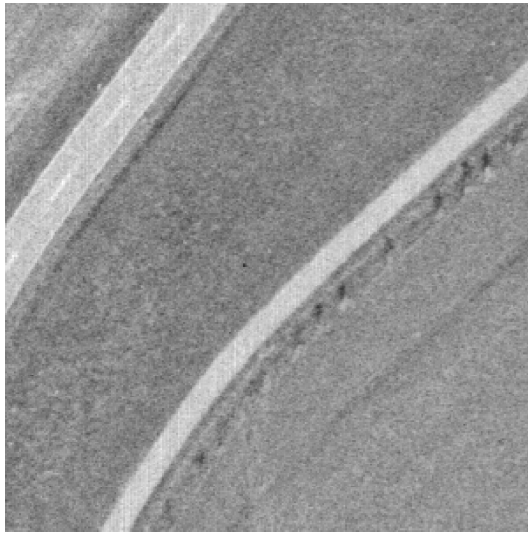


(c) Imagem dos contornos conexos processados.

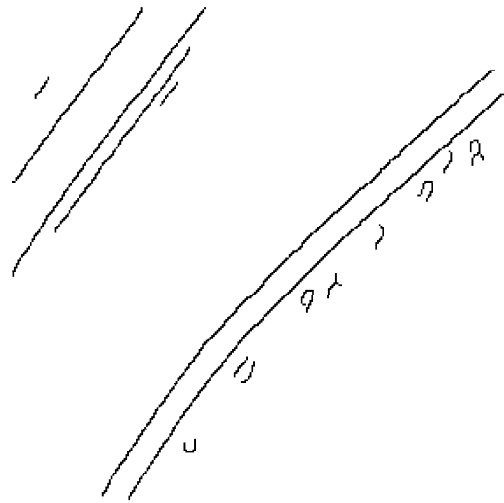


(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

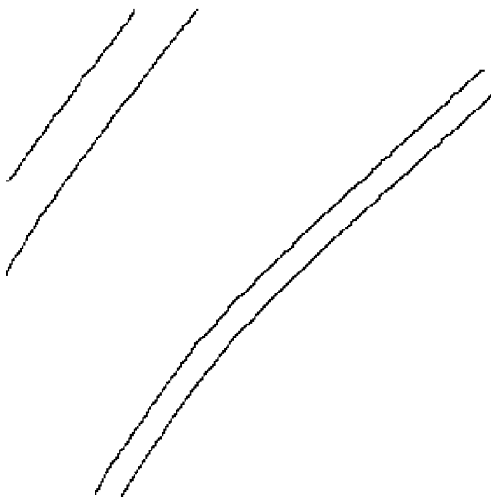
Figura 5.13.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que representa um troço misto (parte rectilíneo e parte curvo) de uma **estrada do tipo A**, com a presença de uma zona da imagem que apresenta um nível de intensidade semelhante ao do objecto a detectar, e um contorno paralelo. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.



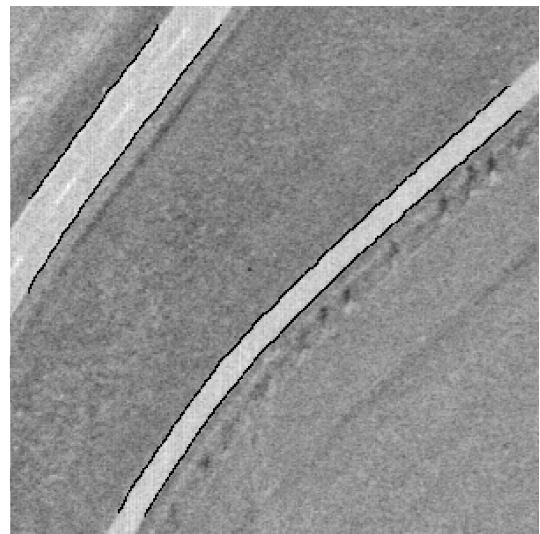
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



(c) Imagem dos contornos conexos processados.



(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

Figura 5.14.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que revela a presença de um troço de **estrada do tipo A** e um troço de **estrada do tipo B**. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada. No início do processo de detecção, o utilizador deve tomar a decisão de qual o(s) troço(s) de estrada(s) a detectar, ou seja, apenas o troço de **estrada do tipo A**, apenas o troço de **estrada do tipo B**, ou ambos.

CONT. PAR. TIPO A	
Distâncias	Variância
13	0,6
14	0,7
13	0,5
12	0,8
13	0,8
12	0,9
14	1,6
13	0,8
13	0,6
14	0,9
13	1,0
13	1,2
12	1,0
13	0,5
13	0,6
13	0,7
14	0,7
14	0,8
14	0,7
14	0,6
14	0,7

(a) Tabela referente a **contornos paralelos do tipo A**.

CONT. PAR. TIPO B	
Distâncias	Variância
27	0,5
26	1,0
26	0,8
26	0,7
27	0,4
26	0,5
27	0,6
27	0,6
27	1,4
27	0,9
27	0,7
27	1,3
27	0,8
27	0,8
27	0,6
28	0,9
29	1,0
27	0,8
27	0,9
29	1,4
28	1,5
29	0,4
27	1,3
28	1,4
29	0,4
28	0,4
28	0,5
27	0,6
29	1,0
29	1,3
29	1,4

(b) Tabela referente a **contornos paralelos do tipo B**.

Tabela 5.2.: As tabelas ilustram, em cada linha, o valor médio e a respectiva variância ocorrida para cada par de componentes conexos, classificados como **contornos paralelos** para o primeiro conjunto de teste. Os valores indicados, são posteriormente utilizados pelo reconhecedor estatístico baseado nas duas características geométricas do modelo de estrada desenvolvido nesta dissertação, vidé a Figura 4.20. A unidade é o *pixel*.

Contornos tipo A		Contornos tipo B	
N. Pares conexos	Cont. Par.	N. Pares conexos	Cont. Par.
120	1	435	6
10	1	153	3
78	1	120	3
1711	1	465	2
666	1	435	3
741	1	378	2
1326	2	120	1
3403	1	10	1
1378	5	666	2
171	1	2556	3
6903	5	231	2
378	2	1378	2

(a) Ocorrências de componentes conexos e margens de troços de **estradas do tipo A**.

(b) Ocorrências de componentes conexos e margens de troços de **estradas do tipo B**.

Tabela 5.3.: A tabelas ilustram, em cada linha, a frequência dos pares de componentes conexos em cada uma das imagens do primeiro conjunto de teste (coluna **N. Pares conexos**) e o número de pares classificados como contornos paralelos (coluna **Cont. Par.**). Os valores indicados são posteriormente utilizados pelo reconhecedor estatístico baseado nas duas características geométricas do modelo de estrada desenvolvido nesta dissertação, vidé a Figura 4.20.

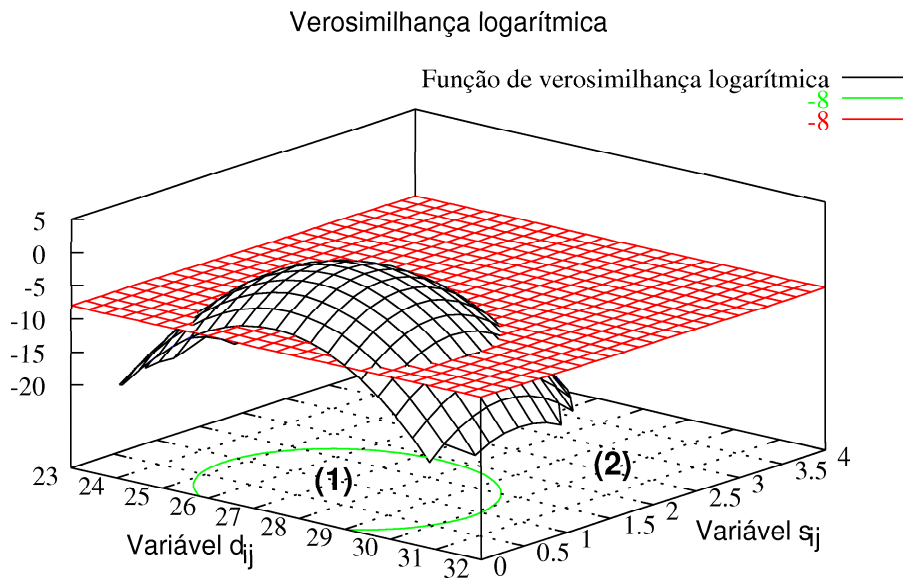
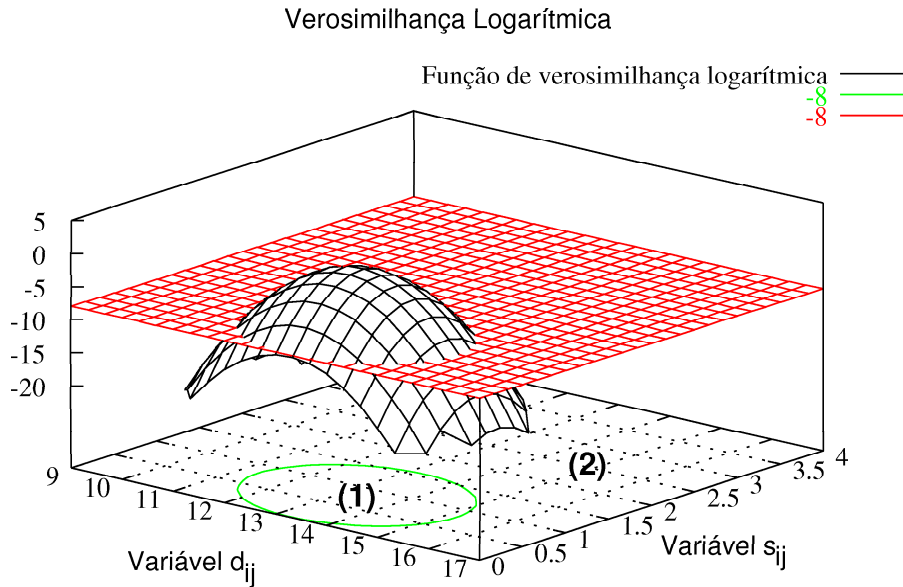


Figura 5.15.: A figura representa os gráficos que originam as regiões de decisão dos reconhecedores estatísticos baseados nas duas características geométricas do modelo de estrada. A área no interior da curva obtida é caracterizada pela região de decisão **(1)**, ou seja, corresponde à classificação de pares de elementos conexos como contornos paralelos. A área no exterior da curva obtida é caracterizada pela região de decisão **(2)**, ou seja, corresponde à classificação de pares de elementos conexos como sendo contornos não paralelos.

contornos paralelos do tipo B¹¹. A preto, representa-se a superfície definida pelo classificador. Para os **contornos paralelos do tipo A**, representa-se a função traduzida pelo primeiro termo da Equação 4.48 para $N = 2$,

$$- \left(\log(0,6) + \log(0,2) + \left(\frac{d_{ij} - 13}{0,6} \right)^2 + \left(\frac{s_{ij} - 0,8}{0,2} \right)^2 \right) + \log(P(C_1)), \quad (5.1)$$

em que os valores para $\mu_{1_1} = 13$ e $\sigma_{1_1} = 0,6$ correspondem, respectivamente, ao valor médio (inteiro) e ao desvio padrão dos resultados exibidos na coluna **Distâncias** da Sub-tabela 5.2(a), e os valores para $\mu_{2_1} = 0,8$ e $\sigma_{2_1} = 0,2$ correspondem, respectivamente, ao valor médio e desvio padrão dos resultados exibidos na coluna **Variância** da mesma sub-tabela (caso multidimensional). Para os **contornos paralelos do tipo B** representa-se, também, a função traduzida pelo primeiro termo da Equação 4.48 para $N = 2$,

$$- \left(\log(0,9) + \log(0,4) + \left(\frac{d_{ij} - 27}{0,9} \right)^2 + \left(\frac{s_{ij} - 0,9}{0,4} \right)^2 \right) + \log(P(C_1)), \quad (5.2)$$

em que os valores para $\mu_{1_1} = 27$ e $\sigma_{1_1} = 0,9$ correspondem, respectivamente, ao valor médio (inteiro) e ao desvio padrão dos resultados exibidos na coluna **Distâncias** da Sub-tabela 5.2(b), e os valores para $\mu_{2_1} = 0,9$ e $\sigma_{2_1} = 0,4$ correspondem, respectivamente, ao valor médio e desvio padrão dos resultados exibidos na coluna **Variância** da mesma sub-tabela. O logaritmo da probabilidade *a priori* nas Equações 5.1 e 5.2, $\log(P(C_1))$, é calculado de acordo com o exposto, respectivamente nas Equações 5.3 e 5.4.

As probabilidades *a priori* $P(C_1)$ e $P(C_2)$, vidé as Equações 4.33 e 4.48, são calculadas com base nos valores das Sub-tabelas 5.3(a) e 5.3(b), respectivamente para as **contornos paralelos do tipo A** e **contornos paralelos do tipo B**,

$$P(C_1) = \frac{22}{16885} = 0,0013 \quad \text{e} \quad P(C_2) = 1 - P(C_1) = 0,9987 \quad (5.3)$$

$$P(C_1) = \frac{30}{6947} = 0,0043 \quad \text{e} \quad P(C_2) = 1 - P(C_1) = 0,9957 \quad (5.4)$$

A vermelho, representa-se o plano que define o limiar de verosimilhança logarítmica (-8) , estabelecido para o primeiro conjunto de teste, para o qual um par de componentes conexos é classificado como **contorno paralelo** ou **contorno não paralelo** (do tipo **A** ou **B**). A projecção, no plano horizontal definido pelas variáveis d_{ij} e s_{ij} , da curva resultante da intersecção do plano à cota -8 com a superfície definida pelo classificador, representada a cor verde, consiste na linha de fronteira definidora da região de decisão, ou seja, os pontos no interior da curva representam uma classificação positiva de componentes conexos em **contornos paralelos**, e os pontos fora da curva referida ilustram uma classificação de componentes conexos em **contornos não paralelos**.

¹¹São contornos correspondentes a margens de um troço de **estrada do tipo B**.

A Tabela 5.4, mostra os dados a serem utilizados pelo reconhecedor baseado na característica radiométrica do modelo de estrada (caso unidimensional), para o primeiro conjunto de teste. A Figura 5.16, ilustra a respectiva região de classificação, em que a preto representa-se a função traduzida pelo primeiro termo da Equação 4.33 e que se reescreve,

$$-\log 8,9 - \left(\frac{c_{ij} - 199}{8,9} \right)^2 + \log(P(C_1)), \quad (5.5)$$

em que os valores para $\mu_1 = 199$ e $\sigma_1 = 8,9$ correspondem, respectivamente, ao valor médio e ao desvio padrão dos resultados exibidos na coluna **Intensidade** da Tabela 5.4. A recta a vermelho define o limiar de verosimilhança logarítmica, para o qual um par de contornos paralelos é classificado como margem de um troço de estrada, e cujo valor adoptado (-5) foi aquele que conduziu à obtenção de melhores resultados experimentais.

O logaritmo da probabilidade *a priori* na Equação 5.5, $\log(P(C_1))$, é calculado com base no número de pares comparáveis de componentes conexos, classificados como **contornos paralelos** (do tipo **A** ou **B**), pelo reconhecedor estatístico baseado nas características geométricas do modelo de estrada desenvolvido nesta dissertação (52 pares — vidé a Tabela 5.3), e no número de componentes conexos que correspondem efectivamente a margens de troços de estrada (27 pares),

$$P(C_1) = \frac{27}{52} = 0,519 \quad \text{e} \quad P(C_2) = 1 - P(C_1) = 0,481 \quad (5.6)$$

Os resultados correspondentes ao segundo conjunto de teste ilustram-se nas Figuras 5.17 a 5.21, e apresentam a mesma distribuição na figura como anteriormente descrito para o primeiro conjunto de teste.

No entanto, para as imagens de zonas de cruzamento (Figura 5.20) e entroncamento (Figura 5.21), o reconhecedor estatístico baseado nas características geométricas do modelo de estrada gera um conjunto vazio, pois as características 1 e 2, vidé a Secção 4.6, não se verificam nas referidas zonas. O conhecimento geométrico de que as margens se mantêm paralelas e de que a distância entre elas apresenta uma variação nula não é assegurado, em virtude da disposição geométrica relativa dos respectivos componentes conexos (elementos de contorno). Deste modo, e apenas para as duas imagens referidas, o reconhecedor estatístico das estradas baseado somente na terceira característica do modelo da estrada (descrito na Figura 4.20, Secção 4.6), processa todos os componentes conexos provenientes da detecção de contornos. Utiliza-se, deste modo, apenas conhecimento radiométrico que se mostra insuficiente, através da análise das Figuras 5.20 e 5.21.

Margens	
Intensidade	Variância
199	9,7
204	8,1
190	7,4
214	11,0
204	10,3
204	10,8
204	9,2
204	9,2
189	9,0
188	6,3
188	7,2

Tabela 5.4.: A tabela ilustra, em cada linha, o valor médio da intensidade obtida no interior da região definida pelo par de componentes conexos e a respectiva variância. Os valores indicados são posteriormente utilizados pelo reconhecedor estatístico baseado apenas na característica radiométrica do modelo de estrada desenvolvido nesta dissertação, aplicado ao primeiro grupo de teste.

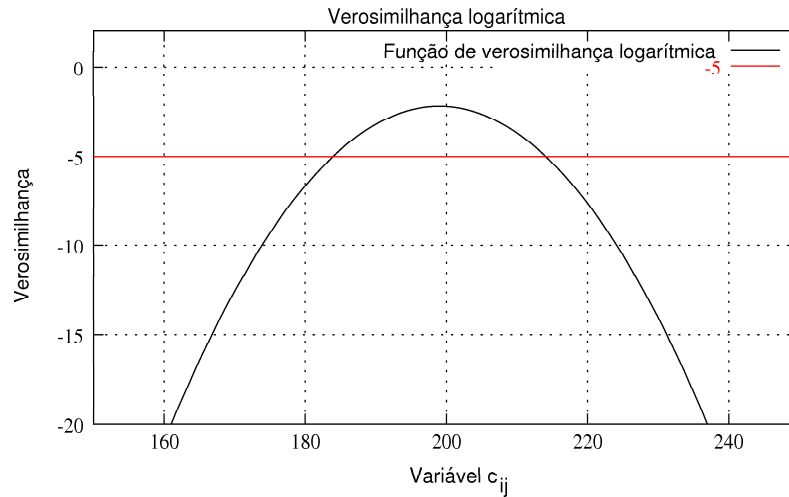
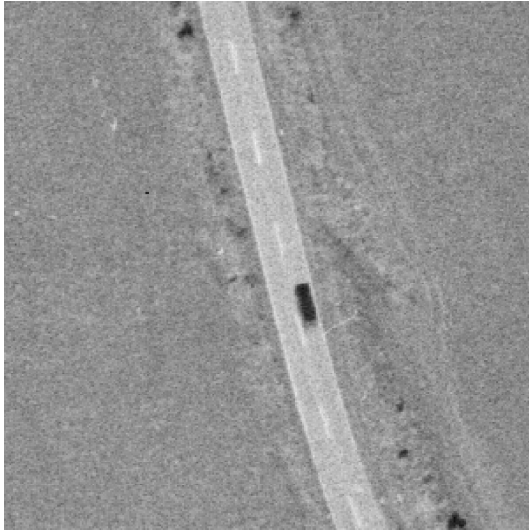
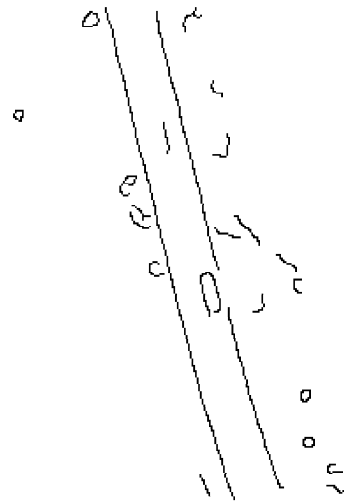


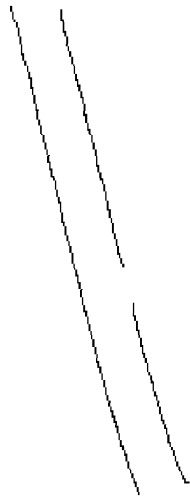
Figura 5.16.: A figura representa o gráfico que origina a região de decisão do classificador baseado na característica radiométrica do modelo de estrada. A preto representa-se a função de verossimilhança logarítmica, vidé a Equação 4.33. A vermelho representa-se a recta que define o limiar de verossimilhança logarítmica para a qual um par de componentes conexos é classificado com **estrada** ou **não estrada**.



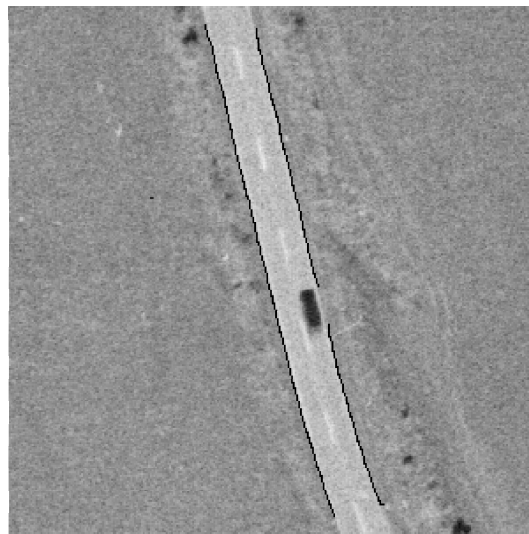
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.

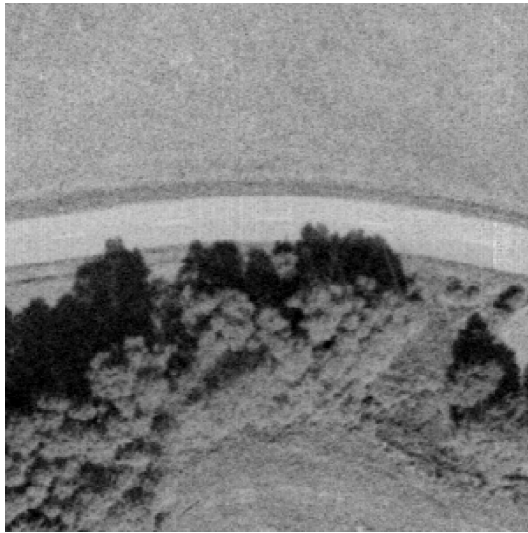


(c) Imagem dos contornos conexos processados.

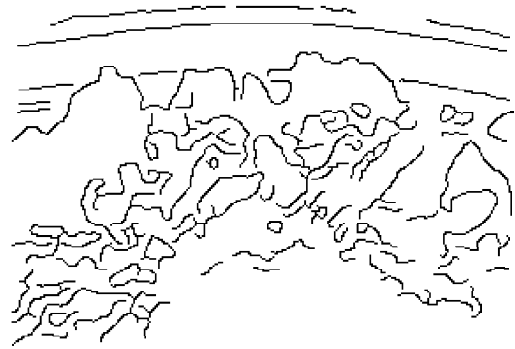


(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

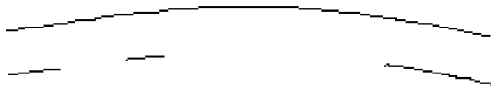
Figura 5.17.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que revela a presença de um veículo na faixa de rodagem. Salienta-se que a metodologia descrita nesta dissertação não extrai uma parte do troço da margem que se encontra do lado do veículo, já que distância em causa é absorvida pela área de influência do filtro. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.



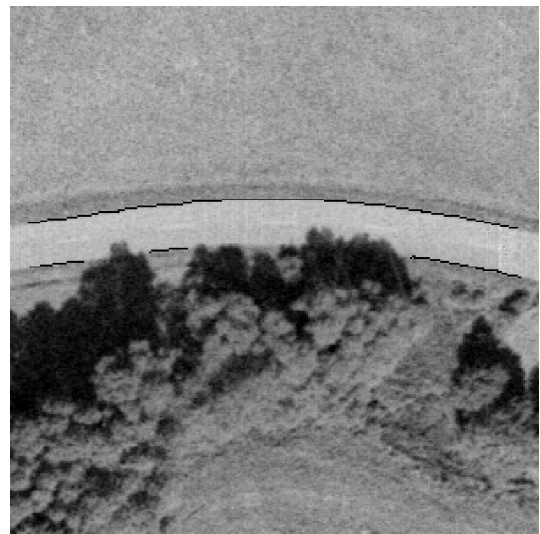
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



(c) Imagem dos contornos conexos processados.

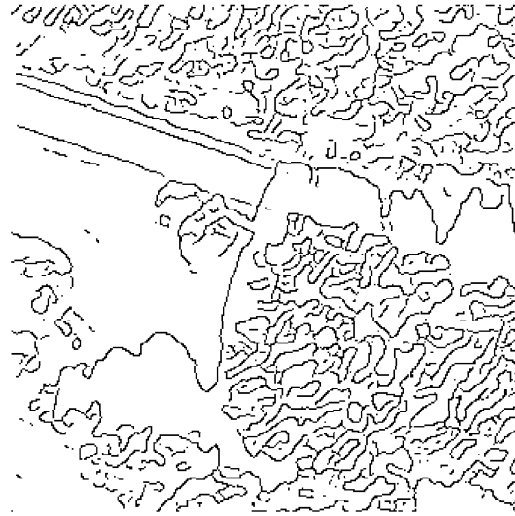


(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

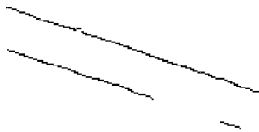
Figura 5.18.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que representa a existência de uma sombra que cobre uma das margens do trecho de **estrada do tipo B**. Salienta-se que a metodologia descrita nesta dissertação não detecta a margem que se encontra oculta pelas sombras provocadas pelas árvores. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.



(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



(c) Imagem dos contornos conexos processados.

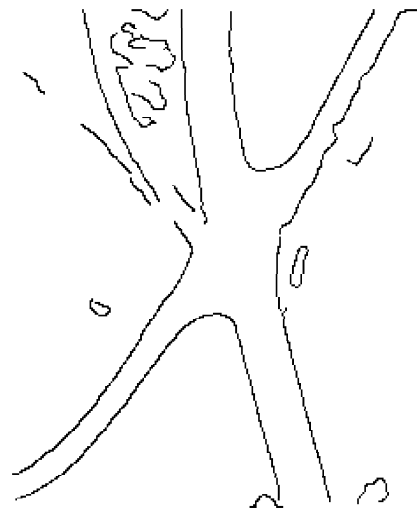


(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

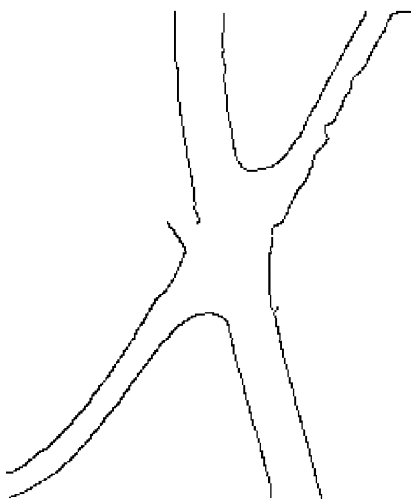
Figura 5.19.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que representa a existência de uma sombra que cobre ambas as margens do trecho de **estrada do tipo B**. Salienta-se que a metodologia descrita nesta dissertação não detecta as margens que se encontram ocultas pelas sombras provocadas pelas árvores. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.



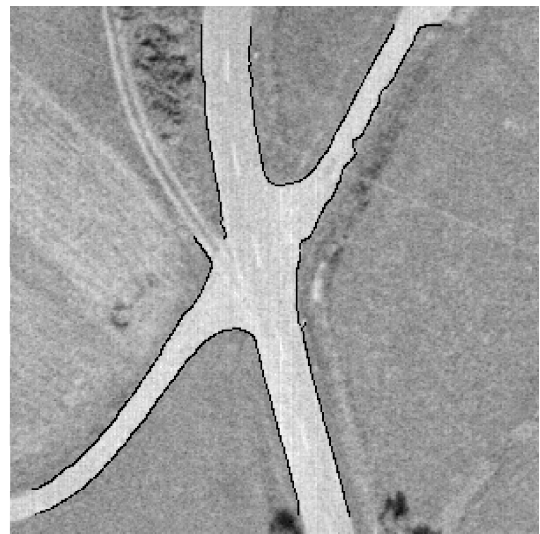
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



(c) Imagem dos contornos conexos processados.

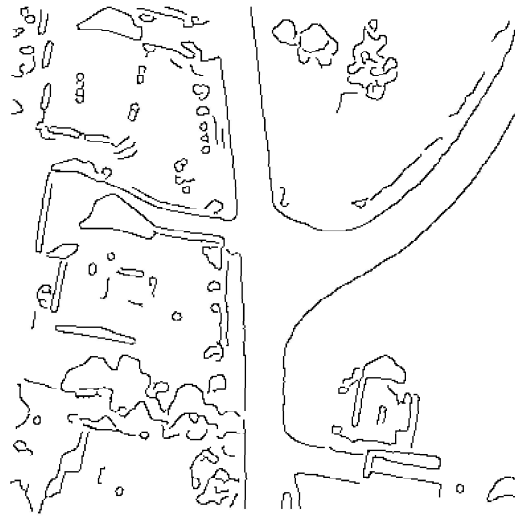


(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

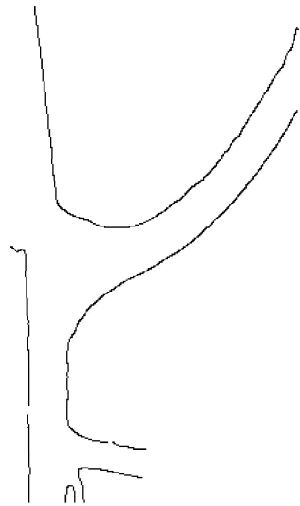
Figura 5.20.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados obtidos pela aplicação da primeira fase da metodologia descrita nesta dissertação e pela aplicação do estimador baseado apenas na característica radiométrica do modelo de estrada, já que o recurso ao estimador baseado nas características geométricas do modelo de estrada conduz à obtenção de um conjunto vazio, conforme se constata através da análise da Figura 4.20, Secção 4.6.2. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.



(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



(c) Imagem dos contornos conexos processados.



(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

Figura 5.21.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados obtidos pela aplicação da primeira fase da metodologia descrita nesta dissertação e pela aplicação do estimador baseado apenas na característica radiométrica do modelo de estrada, já que o recurso ao estimador baseado nas características geométricas do modelo de estrada conduz à obtenção de um conjunto vazio, conforme se constata através da análise da Figura 4.20, Secção 4.6.2. Salienta-se ainda que o resultado obtido não é aceitável, na medida em que há contornos correspondentes às margens do troço de estrada que não são detectados. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.

5.4. Análise dos Resultados Obtidos

Os resultados exibidos na Secção 5.3 dividem-se em dois grupos:

- o primeiro, em que as imagens mostram troços de estrada perfeitamente visíveis, ou seja, as suas margens não são ocultadas, quer por sombras parciais, quer por sombras totais. Não se incluem cruzamentos e entroncamentos, nem troços com variações na sua largura ¹²;
- o segundo, em que as imagens mostram a presença de veículos na faixa de rodagem, zonas de sombras parciais, sombras totais, zonas de cruzamentos e entroncamentos.

Relativamente ao primeiro conjunto de teste, vidé os resultados mais significativos nas Figuras 5.9 a 5.14, a metodologia descrita nesta dissertação para a extracção de troços de estrada a partir de imagens aéreas de alta resolução com 256 níveis de cinzento, classifica adequadamente todos os objectos processados.

Conclui-se, no entanto, que o recurso ao classificador desenvolvido nesta dissertação deve conter obrigatoriamente todas as características definidas na Secção 4.6. Constata-se tal situação, quando se elimina do bloco **Classificador**, vidé a Figura 4.20 Secção 4.6.2, o reconhecimento baseado na característica radiométrica do modelo de estrada. A Figura 5.22 constitui um bom exemplo do assunto exposto, já que o resultado obtido é esperado, dada a probabilidade de existirem numa imagem pares de componentes conexos que mantêm uma relação espacial de paralelismo entre si, a uma determinada distância, e que não correspondem a margens de um troço de estrada.

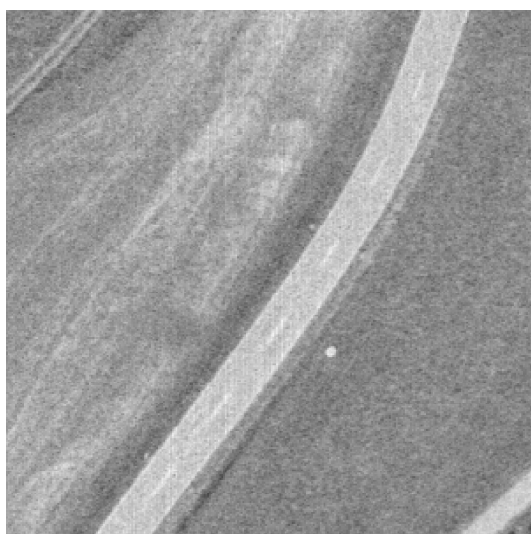
O recurso ao reconhecedor estatístico baseado na característica radiométrica do modelo de extracção de troços de estrada— para além do reconhecedor estatístico baseado nas características geométricas do referido modelo—, e que integra o bloco **Classificador** desenvolvido nesta dissertação, revela-se importante para a correcta classificação de contornos conexos em margens de um troço de estrada. As estradas numa imagem de 256 níveis de cinzento, para além de apresentarem uma intensidade aproximadamente constante ao longo do seu desenvolvimento ¹³, exibem-se geralmente destacadas do contexto em que se inserem ¹⁴.

A utilização dos dois reconhedores estatísticos utilizados nesta dissertação para o primeiro conjunto de teste, e pertencentes ao bloco **Classificador** (Figura 4.20,

¹²Referem-se fundamentalmente as zonas de inversão de marcha e ligações a estacionamentos, entre outras situações.

¹³A intensidade constante é alterada pela presença de objectos na faixa de rodagem (veículos, separadores centrais, etc...). No entanto, a presença de ruído na imagem é um factor importante na variação dos valores dos níveis de cinzento. Por exemplo, para todas as imagens exibidas nesta dissertação, após suavização, o valor do nível de cinzento varia aproximadamente entre 185 e 215, o que corresponde a 11,7% na escala de cinzentos entre 0 a 255.

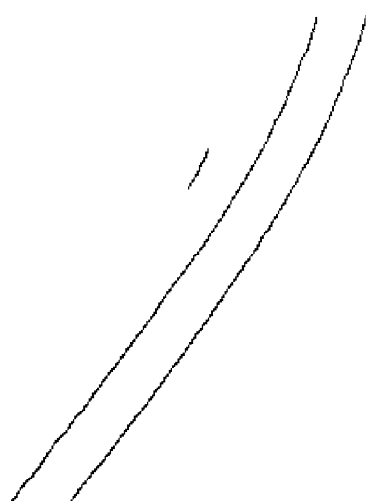
¹⁴A ideia exposta, é referida às imagens exibidas nesta dissertação (imagens rurais). Para imagens urbanas, por exemplo, pode não verificar-se o exposto, em virtude da grande semelhança entre os pequenos troços de estrada e as coberturas de edifícios, vidé a Secção 4.2 e a Figura 4.8.



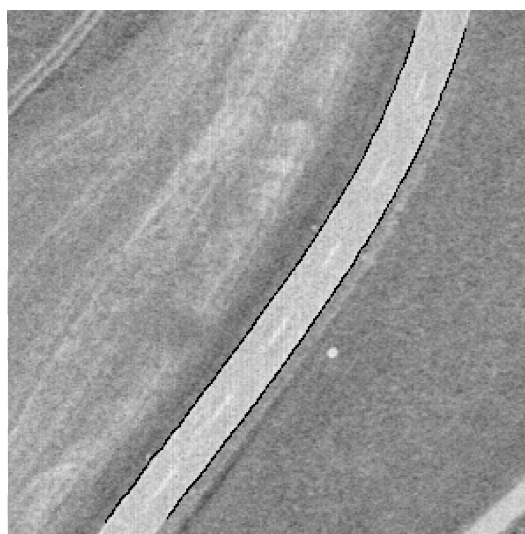
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



(c) Imagem dos contornos conexos processados.



(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

Figura 5.22.: A imagem (b) representa o resultado da aplicação da primeira fase da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que revela um trecho misto (parte retilíneo e parte curvo) de uma **estrada do tipo B**. A imagem (c) representa o resultado obtido da classificação dos contornos conexos em **contornos conexos paralelos do tipo B** (apenas o caso multidimensional). Denota-se, deste modo, a existência de um contorno que não é margem do trecho de estrada da imagem (a). A imagem (d) representa o resultado final, sobreposto à imagem de entrada, aplicando à imagem (c) o reconhecedor estatístico baseado na característica radiométrica do modelo de estrada desenvolvido nesta dissertação.

Secção 4.6.2)— o primeiro baseado nas características geométricas e o segundo baseado na característica radiométrica do modelo de estrada exposto —, deve-se, simplesmente, à maior rapidez na obtenção de resultados, já que, o tempo de processamento do segundo reconhecedor estatístico é cerca de duas vezes superior ao tempo de processamento do primeiro reconhecedor estatístico. A proporção referida deve-se ao número de componentes conexos processados, que não é igual para todas as imagens de entrada. A utilização de um reconhecedor estatístico baseado nas três características do modelo de estrada desenvolvido nesta dissertação e constituído apenas por um bloco (vidé a Equação 4.48 para $N = 3$), conduz a resultados semelhantes aos obtidos, ou seja, na classificação adequada de pares de componentes conexos em margens de troços de estrada, embora o limiar de verosimilhança exibido nas Figuras 5.15 e 5.16 se altere.

O tempo de processamento da aplicação da primeira fase da metodologia desenvolvida nesta dissertação, às imagens do primeiro conjunto de teste, varia aproximadamente entre 20 a 35 segundos, tendo em conta o equipamento utilizado, vidé o Apêndice C. O tempo de processamento da aplicação da segunda fase da referida metodologia varia aproximadamente entre 60 a 125 segundos, distribuídos da seguinte forma: 20 a 45 segundos para a classificação multidimensional e 40 a 80 segundos para a classificação unidimensional, de acordo com o exposto na Figura 4.20, Secção 4.6.2. Os tempos totais de processamento variam, deste modo, entre 80 a 160 segundos. Todos os tempos de processamento indicados assumem-se aceitáveis, tendo em conta o equipamento utilizado, vidé o Apêndice C. A diferença entre os tempos de processamento da primeira e segunda fases das metodologia descrita, advêm principalmente da implementação dos algoritmos desenvolvidos: C++ para a primeira fase e *MatLab* para a segunda fase, vidé o Apêndice C.

Para comparação com os tempos de digitalização manual, com o recurso a uma mesa digitalizadora, o autor digitalizou as margens dos troços de estrada exibidos nas Subfiguras 5.11(a) e 5.14(a), imprimidas em papel com a dimensão 14cm \times 14cm. Obteve-se, respectivamente, os tempos de 6 e 10 minutos, ou seja, tempos superiores na ordem dos 350%. Não foram contabilizados os tempos de preparação da mesa digitalizadora (calibração), nem da impressão das imagens em papel. Os resultados obtidos estão representados nas imagens das Figuras 5.23 e 5.24.

No que diz respeito à qualidade da posição das margens e do respectivo eixo de via dos troços de estrada extraídos, os resultados obtidos revelam agradável qualidade. Através da análise da Figura 5.25, observa-se a elevada precisão obtida na determinação da posição dos pontos da imagem definidores das margens da estrada e do seu eixo de via. Salienta-se, ainda, a dificuldade na obtenção de resultados de qualidade ao nível do processo de digitalização, através da comparação das imagens das Figuras 5.23 e 5.24 com a imagem da Figura 5.25.

No que diz respeito aos resultados obtidos pelo uso das imagens do segundo conjunto de teste, a metodologia descrita nesta dissertação não permite a extracção de margens de troços de estrada que estão ocultados por sombras, quer parciais quer totais, vidé as Figuras 5.18, 5.19 e B.12, pois o detector de contornos não extrai componentes conexos

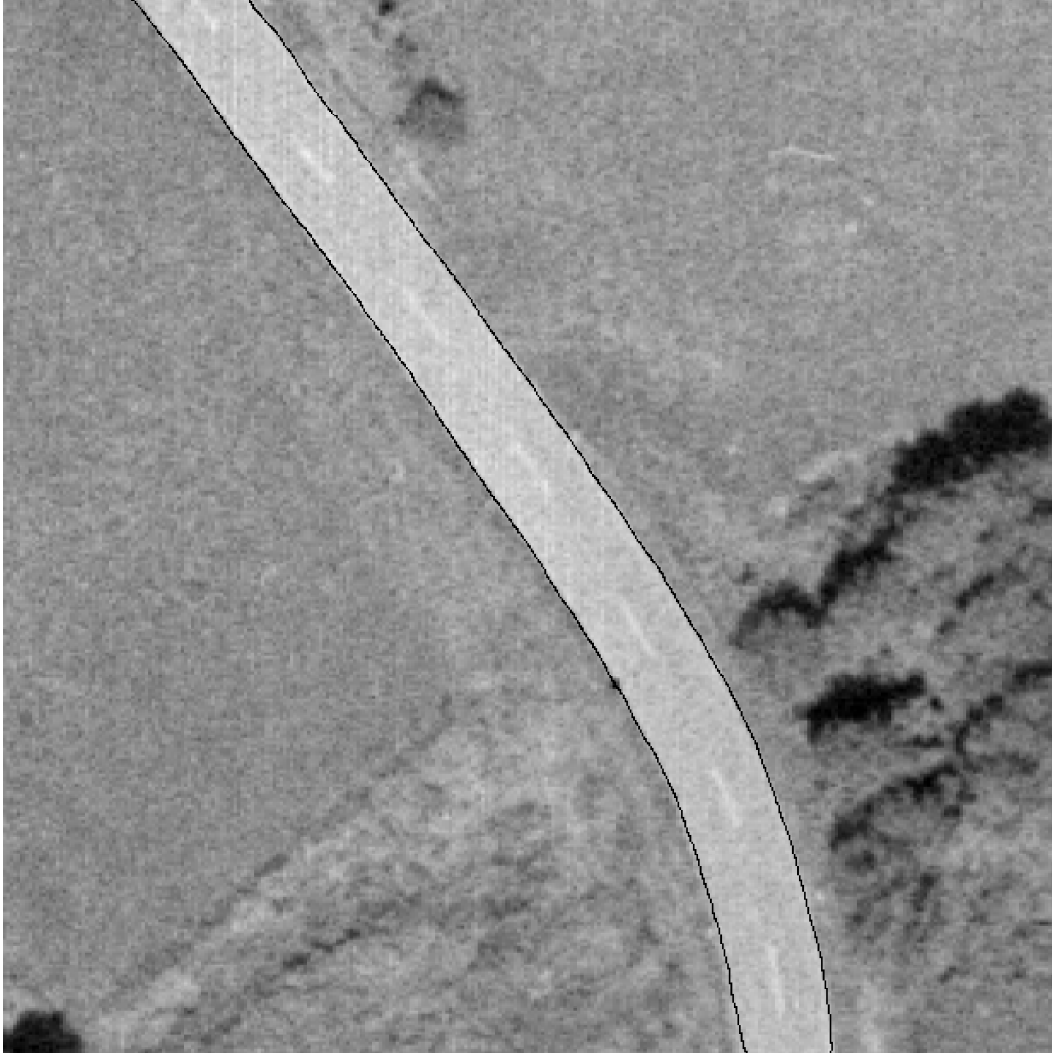


Figura 5.23.: A imagem da figura, exibe o resultado da digitalização manual das margens do troço de estrada sobreposto à imagem de entrada, com o recurso a uma mesa digitalizadora cujas características de resolução e precisão estão descritas no Apêndice C. A dimensão da imagem na página, é idêntica à da imagem que serviu de base ao processo de digitalização, ou seja, apresenta uma dimensão de 14cm × 14cm. Desta forma, a escala da digitalização é idêntica à escala da imagem de entrada.

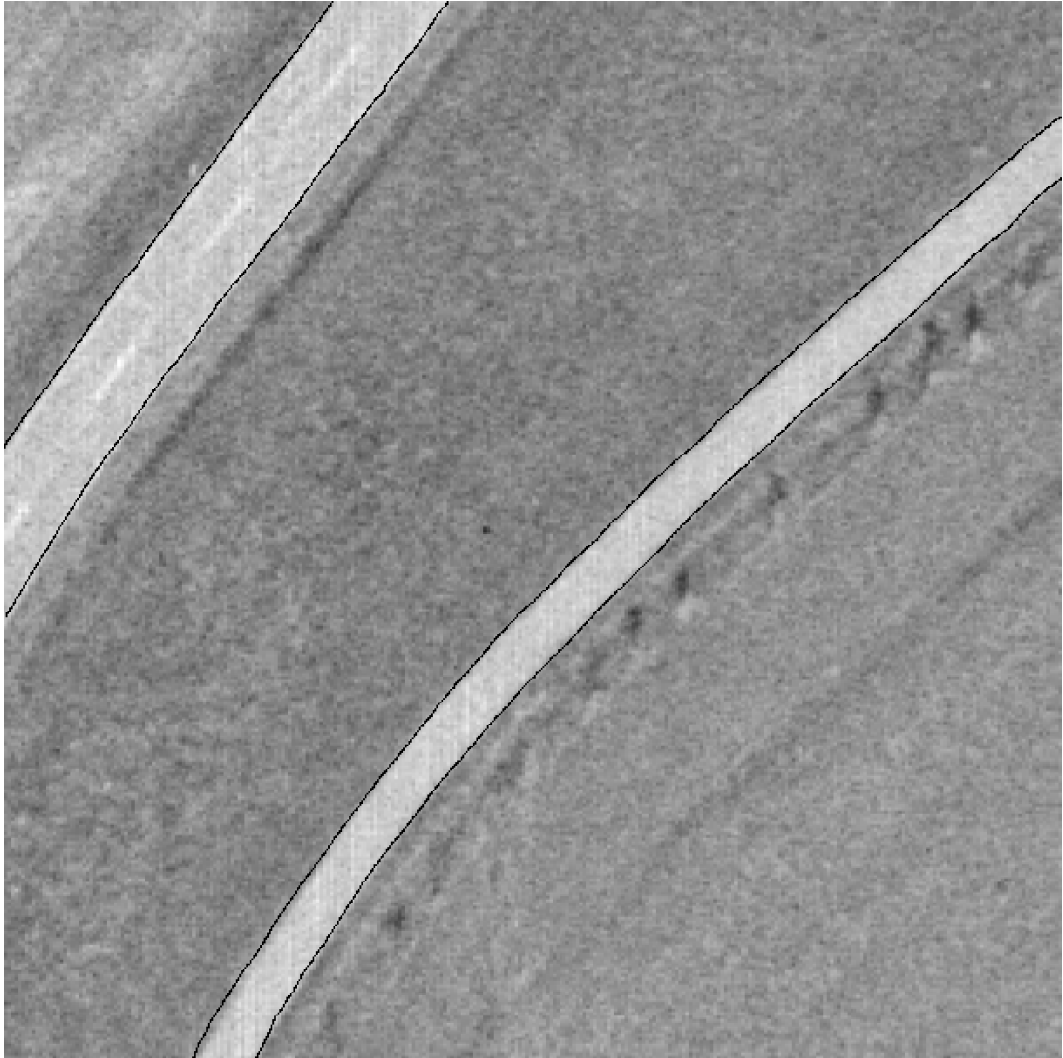


Figura 5.24.: A imagem da figura, exibe o resultado da digitalização manual das margens de dois troços de estradas de diferentes larguras sobrepostos à imagem de entrada, com o recurso a uma mesa digitalizadora cujas características de resolução e precisão estão descritas no Apêndice C. A dimensão da imagem na página, é idêntica à da imagem que serviu de base ao processo de digitalização, ou seja, apresenta uma dimensão de 14cm \times 14cm. Desta forma, a escala da digitalização é idêntica à escala da imagem de entrada.

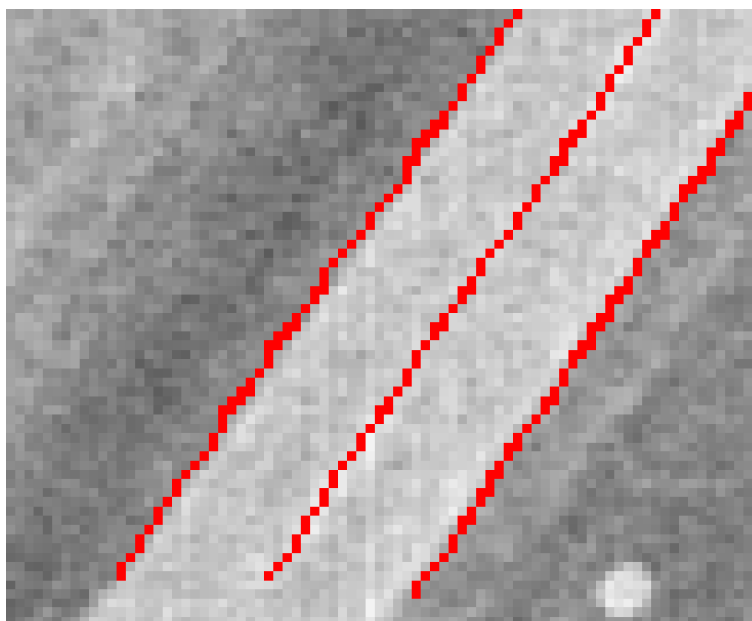


Figura 5.25.: A figura mostra um detalhe das margens da estrada e do eixo da via detectados sobrepostos à imagem original. Nota-se a elevada precisão obtida na marcação do eixo da via. As variações de intensidade luminosa local são bem visíveis.

nas zonas de sombra. Relativamente à presença de veículos na faixa de rodagem, vidé a Figura 5.17, as margens juntas aos referidos objectos estão interrompidas, em virtude da incapacidade do detector de contornos em obter os pontos em falta, devido à grande proximidade entre as fronteiras do veículo e do troço de estrada com a área que o rodeia o segundo. A proximidade referida, é inferior à área de influência do filtro aplicado sobre a imagem.

Relativamente às zonas de cruzamentos e entroncamentos, vidé os resultados apresentados nas Figuras 5.20 e 5.21, conclui-se que o classificador desenvolvido nesta dissertação, não se revela adequado para classificar correctamente os contornos conexos em margens de um troço de estrada, já que o reconhecedor baseado nas características do modelo de estrada descrito na Figura 4.20 (Secção 4.6.2), não detecta a presença nas imagens de **contornos conexos paralelos**, utilizando-se apenas conhecimento radiométrico. Concluí-se, deste modo, a necessidade de introduzir mais conhecimento no modelo, nomeadamente restrições ao nível da curvatura dos contornos obtidos pelo detector de contornos.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6

Conclusões

A metodologia descrita neste documento, permite a extracção das margens de uma estrada visível e respectivo cálculo do eixo de via, a partir de uma imagem aérea de alta resolução de 256 níveis de cinzento.

A informação contida numa imagem aérea de alta resolução é mais numerosa, obrigando à introdução de um elevado nível de conhecimento dos objectos a extrair. Embora as imagens de baixa resolução contenham menos informação e sejam mais económicas, a sua utilização para a extracção de determinados objectos pode apresentar elevada dificuldade. Por exemplo, ressalta alguma incapacidade na distinção entre estradas e rios em imagens aéreas de baixa resolução, colocando sérias dificuldades ao processo de extracção. Deste modo, considera-se a elevada resolução da imagem como um factor importante para o processo de extracção das margens de um troço de estrada e no processamento dos objectos nela contidos, ou seja, a qualidade obtida no processo de extracção está, entre outros factores, ligada à elevada resolução da imagem.

O problema da extracção de margens de troços de estrada a partir de imagens aéreas de alta resolução centra-se, também, no nível de conhecimento introduzido no modelo. Ao processo de classificação interessa, deste modo, a inclusão no modelo das adequadas características que conduzam aos melhores resultados, obrigando a um conhecimento específico sobre o problema em estudo. As características utilizadas no modelo desenvolvido nesta dissertação revelam-se adequadas para troços de estrada visíveis, mas inadequadas para as zonas de sombra, cruzamentos, entroncamentos e na presença de veículos na faixa de rodagem.

A metodologia desenvolvida nesta dissertação, conduz à redução do tempo em obter informação relativa a troços de estradas visíveis a integrar em sistemas de informação geográfica, em virtude dos tempos de processamento inferiores relativamente ao processo

de digitalização manual. Os mesmos poderão ser reduzidos em virtude da optimização dos algoritmos utilizados bem como da total implementação dos mesmos em linguagem de programação C++.

É necessário melhorar a metodologia aqui apresentada. Enumeram-se de seguida alguns tópicos de trabalho futuro.

- Introdução dos resultados obtidos num sistema de informação geográfica vectorial, a breve trecho.
- O problema dos cruzamentos e entroncamentos não foi convenientemente abordado. As características geométricas desenvolvidas nesta dissertação não se revelam adequadas para o respectivo estudo. Há necessidade de introduzir no modelo mais conhecimento sobre estes objectos, nomeadamente restrições ao nível da curvatura dos contornos obtidos pelo detector de contornos, e intensificar o estudo da intensidade dos níveis de cinzento do lado do contorno correspondente à faixa de rodagem.
- A detecção de pontos de contorno em zonas de sombra necessita de ser melhorada. No caso da oclusão de apenas uma das margens, os pontos da margem ocultada podem ser obtidos em função da informação do gradiente do contorno visível. No caso da oclusão de ambos os contornos, o traçado pode ser obtido utilizando técnicas de ligação entre troços, com base em restrições geométricas, nomeadamente a curvatura.
- O problema da ligação entre troços de estrada não ligados não está completamente resolvido. Em virtude das oclusões totais provocadas por sombras na imagem obtêm-se troços distintos, que poderão corresponder à mesma estrada. A sua ligação pode ser realizada também com a introdução de restrições geométricas dos componentes conexos (curvatura).
- Implementação dos algoritmos utilizados nesta dissertação, e os que serão objecto de desenvolvimento futuro, na linguagem de programação C++, conduzindo a tempos de processamento inferiores aos apresentados na Secção 5.4, porque a maior parte dos algoritmos desenvolvidos foram realizados sobre o sistema OCTAVE, na linguagem de programação *MatLab*.
- Utilização de imagens de maiores dimensões das utilizadas nesta dissertação, por forma a processar maior nível de informação.

Apêndice



Filtro Derivada da Gaussiana

Definição 1 A função densidade de probabilidade normal de Gauss é dada pela Equação A.1,

$$g(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(r - \mu)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (\text{A.1})$$

Neste caso σ representa um factor de escala e μ um desvio da origem do filtro.

Esta função resulta da aproximação ao filtro óptimo, escolhida por Canny (1986), para a detecção de pontos de fronteira do tipo degrau impulsivo imersos em ruído aditivo com função de densidade de probabilidade de Gaussiana.

Na realização de máscaras de convolução que dão origem a filtros de Gauss considera-se que $\mu = 0$.

O caso bidimensional resulta de se considerar que o filtro deve ser isotrópico. Neste caso depende apenas da distância ao ponto central do filtro. Esta distância é, para um sistema de coordenadas cartesianas:

$$r = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}. \quad (\text{A.2})$$

A função representada pela Equação A.1 tem, então, a forma dada pela Equação A.3.

$$g(x_1, x_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x_1^2 + x_2^2}{2\sigma^2}\right). \quad (\text{A.3})$$

Uma das formas de primeira derivada da função g , vidé a Figura A.1 é o seu gradiente, ∇g . Em coordenadas cartesianas tem a forma dada pela Equação A.4.

$$\nabla g(x_1, x_2) = \frac{\partial}{\partial x_1} g(x_1, x_2) \hat{e}_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} g(x_1, x_2) \hat{e}_2. \quad (\text{A.4})$$

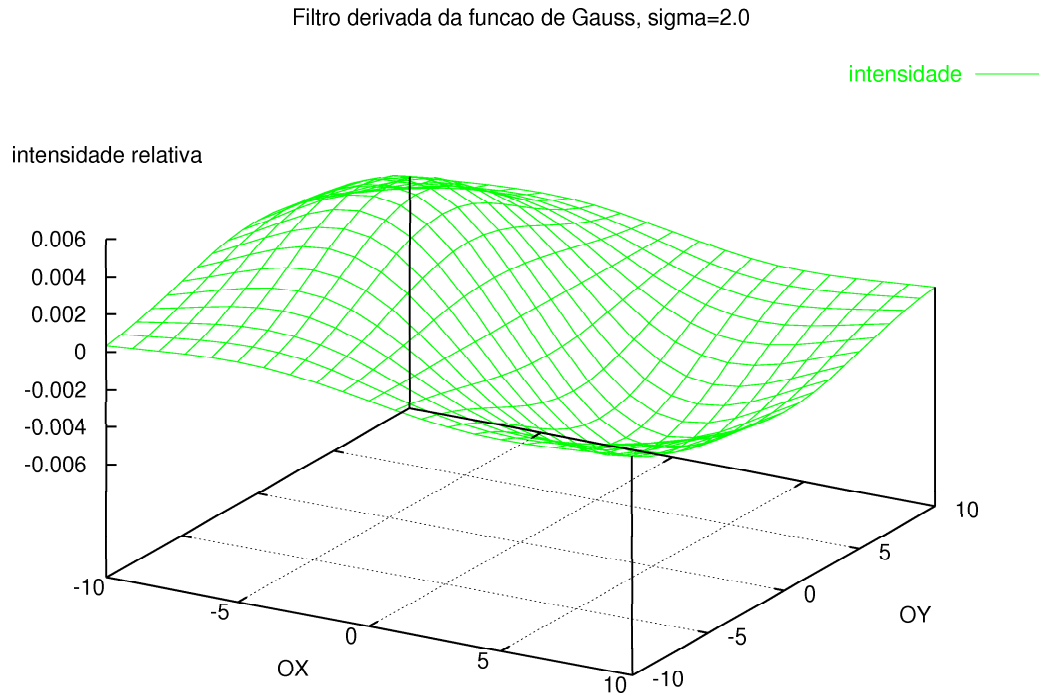


Figura A.1.: A derivada parcial da função de Gauss em relação a x é anti-simétrica em relação ao eixo OX e simétrica em relação ao eixo OY. Isto é observado pela análise da figura.

As derivadas parciais em ordem a x_1 x_2 são dadas respectivamente pelas equações:

$$\frac{\partial}{\partial x_1} g(x_1, x_2) = -\frac{x_1}{\sqrt{2} \pi \sigma^3} \exp\left(-\frac{x_1^2 + x_2^2}{2\sigma^2}\right); \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{\partial}{\partial x_2} g(x_1, x_2) = -\frac{x_2}{\sqrt{2} \pi \sigma^3} \exp\left(-\frac{x_1^2 + x_2^2}{2\sigma^2}\right). \quad (\text{A.6})$$

As funções podem ser observadas na Figura A.2.

A.1. Cálculo da Área de Influência do Filtro

A área total de influência do filtro é dada pela expressão A.7. O filtro tem dois eixos de simetria. O filtro é anti-simétrico em relação ao eixo OX e simétrico em relação ao eixo

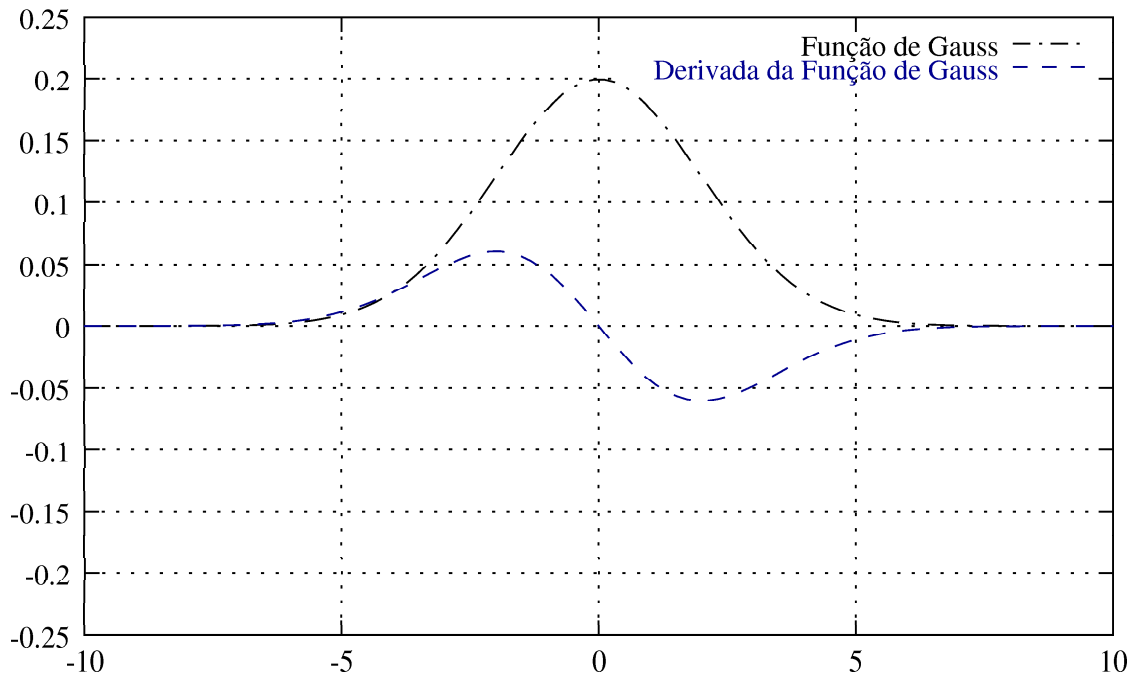


Figura A.2.: A figura mostra a função de Gauss e a derivada da função de Gauss em relação a OX.

OY.

$$\begin{aligned}
 A_t &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left| -\frac{x}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \right| dx dy \\
 &= 4 \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \frac{x}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) dx dy \\
 &= \frac{4}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \int_0^{+\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) dy \int_0^{+\infty} x \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx \\
 &= \frac{4}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \cdot \frac{\sqrt{2\pi}\sigma}{2} \cdot \sigma^2 \\
 &= 2.
 \end{aligned} \tag{A.7}$$

No caso de ser considerada uma área de influência em que $x \in [-w, +w]$ e em que

$y \in [-w, +w]$ então teremos a expressão A.8.

$$\begin{aligned}
 A(w, \sigma) &= \frac{4}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \int_0^w \int_0^w \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) dx dy \\
 &= \frac{4}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \int_0^w \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) dy \int_0^w x \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx \\
 &= \frac{4}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \cdot \frac{\sigma\sqrt{2\pi}}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{w}{\sqrt{2}\sigma}\right) \cdot \sigma^2 (1 - \exp(-w^2)) \\
 &= 2 (1 - \exp(-w^2)) \operatorname{erf}\left(\frac{w}{\sqrt{2}\sigma}\right) \tag{A.8}
 \end{aligned}$$

Os filtros de resposta impulsiva finita não podem ter áreas de influência infinitas. A escolha de uma área de influência em que 95% do poder de resolução do filtro se encontre na máscara de convolução leva à seguinte aproximação de cálculo da largura da janela do filtro:

$$\frac{A(w, \sigma)}{A_t} = 0.95 \tag{A.9}$$

$$(1 - \exp(-w^2)) \operatorname{erf}\left(\frac{w}{\sqrt{2}\sigma}\right) = 0.95 \tag{A.10}$$

A observação dos pontos de intersecção, na Figura A.3, entre a recta que representa a razão $A(w, \sigma)/A_t = 95\%$ e as funções $A(w, \sigma)/A_t$, permite que se aproxime o cálculo dos valores de w pela expressão:

$$w \approx 2 \times \sigma. \tag{A.11}$$

A.2. Convolução

A.2.1. Caso Contínuo

A filtragem é realizada através de uma operação de convolução entre a imagem e as derivadas parciais que constituem as componentes do gradiente. A imagem é representada pela função $f(x_1, x_2)$. A convolução da imagem f com o operador DOG é representada

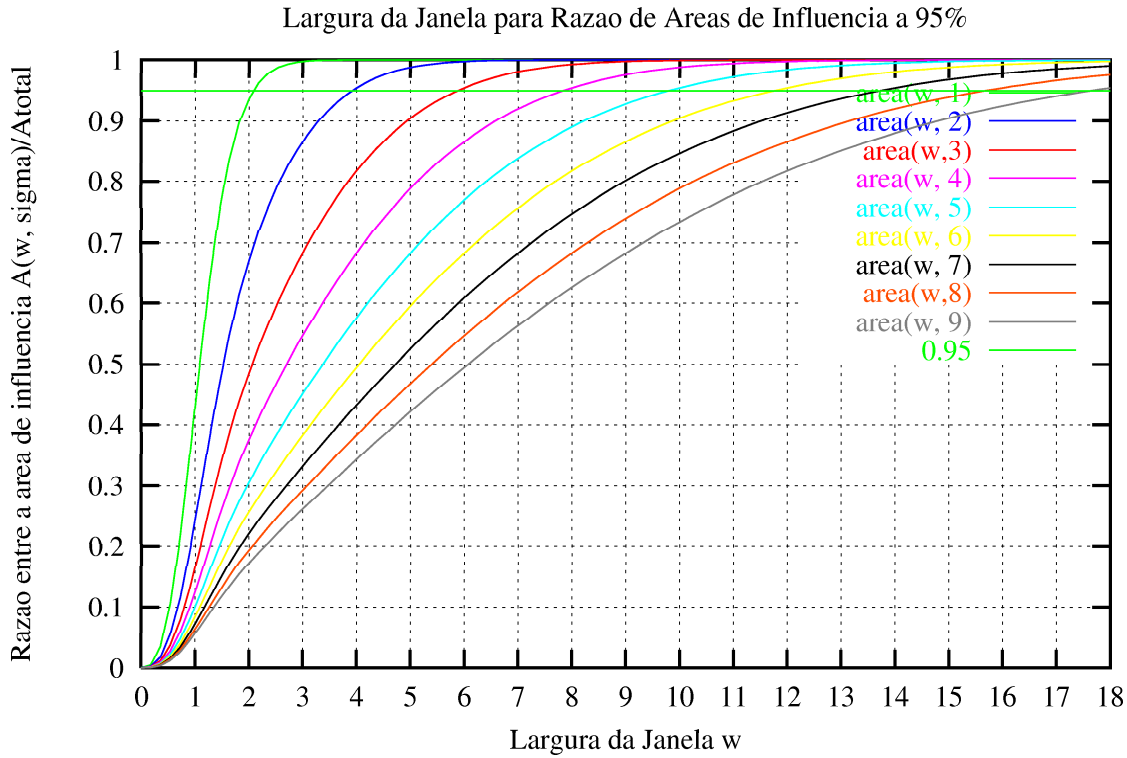


Figura A.3.: A figura mostra o gráfico utilizado para a dedução da largura da janela do filtro DOG em função do factor de escala σ . É realizada a intersecção gráfica de uma recta representando uma razão $A(w, \sigma)/A_t = 95\%$ com as funções $A(w, \sigma)/A_t$.

por:

$$f * \nabla g = (\nabla g) * f \quad (\text{A.12})$$

$$= \int_{\mathbb{R}_2} (\nabla g)(x_1, x_2) f(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 \quad (\text{A.13})$$

$$= \hat{e}_1 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial}{\partial x_1} g(x_1, x_2) \cdot f(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) d\xi_1 d\xi_2$$

$$+ \hat{e}_2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial}{\partial x_2} g(x_1, x_2) \cdot f(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 \quad (\text{A.14})$$

Resultando na expressão A.15

$$\begin{aligned}
 (\nabla g) * f &= -\hat{e}_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_1 \exp\left(-\frac{x_1^2 + x_2^2}{2\sigma^2}\right) f(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 \\
 &\quad - \hat{e}_2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_2 \exp\left(-\frac{x_1^2 + x_2^2}{2\sigma^2}\right) f(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) d\xi_1 d\xi_2.
 \end{aligned}
 \tag{A.15}$$

A.2.2. Caso Discreto

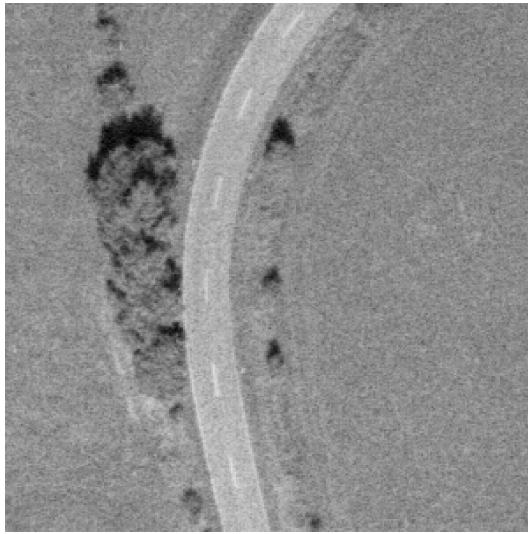
No caso discreto as funções a convolver são discretas. O domínio da convolução é o conjunto \mathbb{N}^2 , e as somas integrais passam a somas discretas. A expressão A.15 passa a ser:

$$\begin{aligned}
 (\nabla g) * f &= -\hat{e}_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \sum_{m_1=-\infty}^{+\infty} \sum_{m_2=-\infty}^{+\infty} m_1 \exp\left(-\frac{m_1^2 + m_2^2}{2\sigma^2}\right) f(m_1 - u_1, m_2 - u_2) \\
 &\quad - \hat{e}_2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \sum_{m_1=-\infty}^{+\infty} \sum_{m_2=-\infty}^{+\infty} m_2 \exp\left(-\frac{m_1^2 + m_2^2}{2\sigma^2}\right) f(m_1 - u_1, m_2 - u_2).
 \end{aligned}
 \tag{A.16}$$

B

Resultados Experimentais Adicionais

B. RESULTADOS EXPERIMENTAIS ADICIONAIS



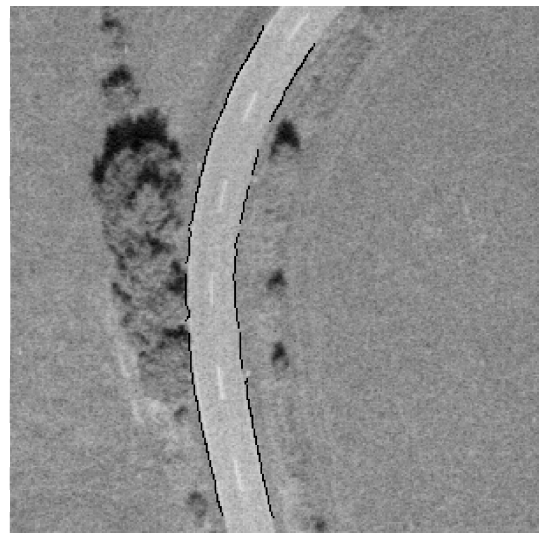
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.

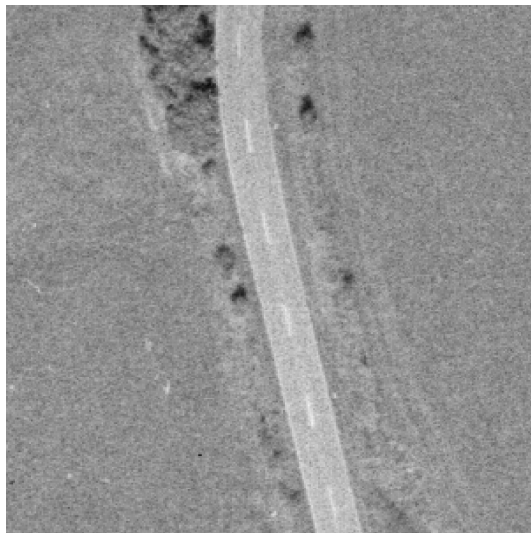


(c) Imagem dos contornos conexos processados.



(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

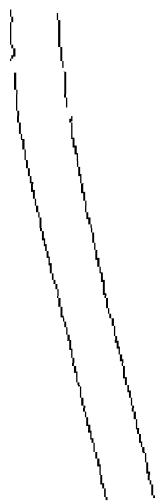
Figura B.1.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que representa um trecho curvo de uma **estrada do tipo B**. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.



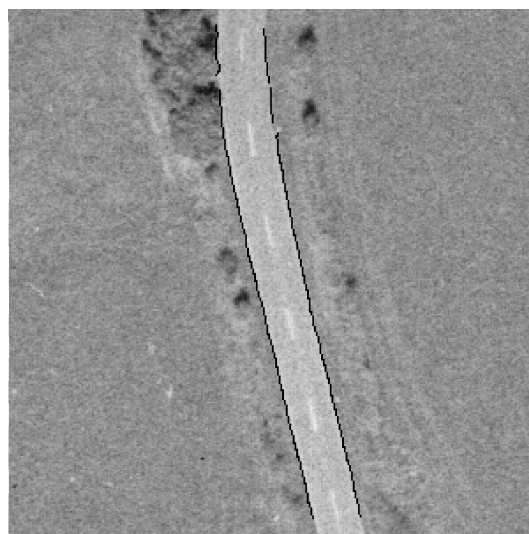
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



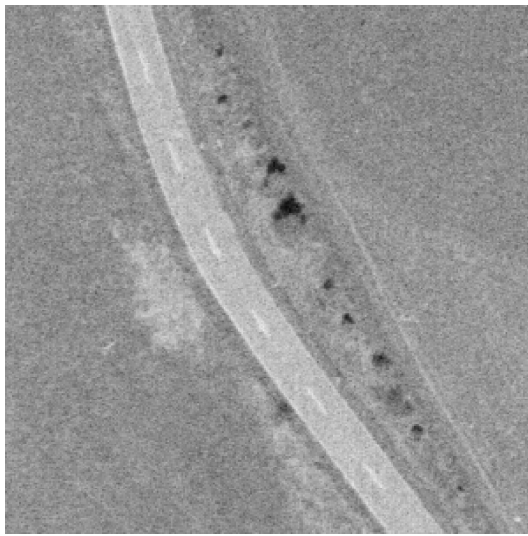
(c) Imagem dos contornos conexos processados.



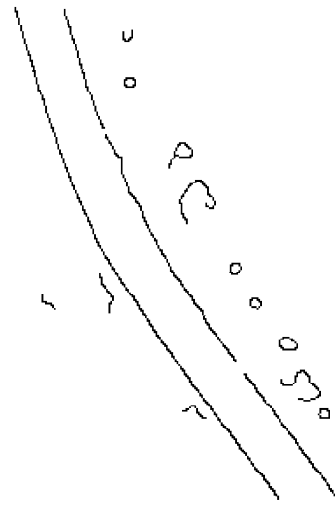
(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

Figura B.2.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que representa um trecho rectilíneo de uma **estrada do tipo B**. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.

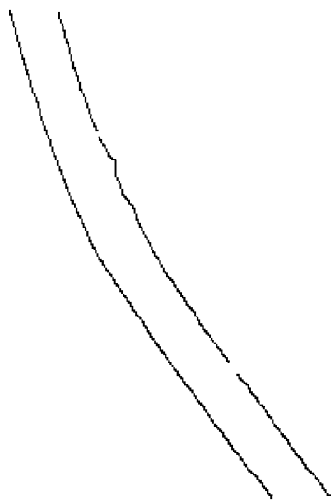
B. RESULTADOS EXPERIMENTAIS ADICIONAIS



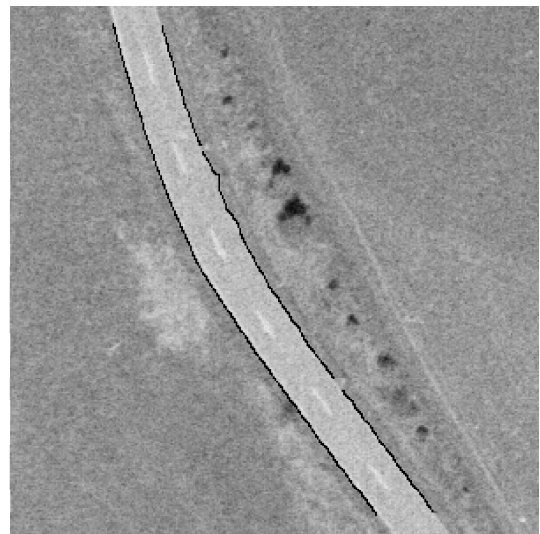
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



(c) Imagem dos contornos conexos processados.



(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

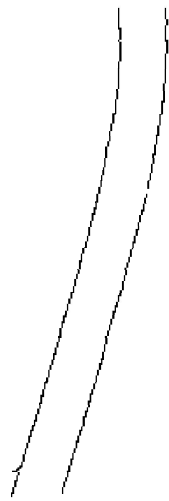
Figura B.3.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que representa um trecho misto (parte rectilíneo e parte curvo) de uma **estrada do tipo B**. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.



(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



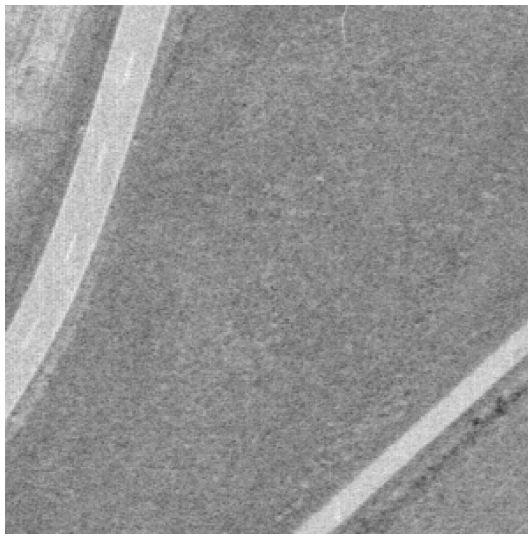
(c) Imagem dos contornos conexos processados.



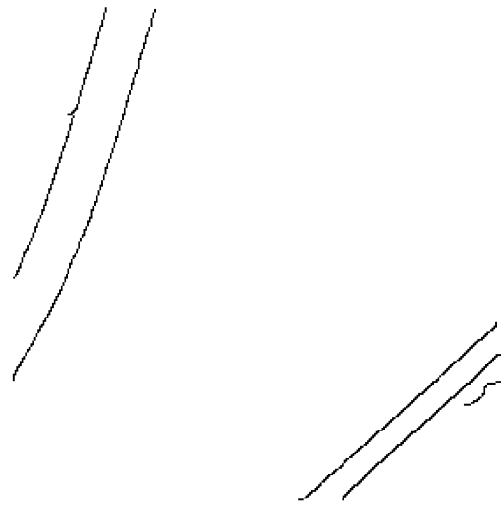
(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

Figura B.4.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que representa um trecho misto (parte retilíneo e parte curvo) de uma **estrada do tipo B**. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.

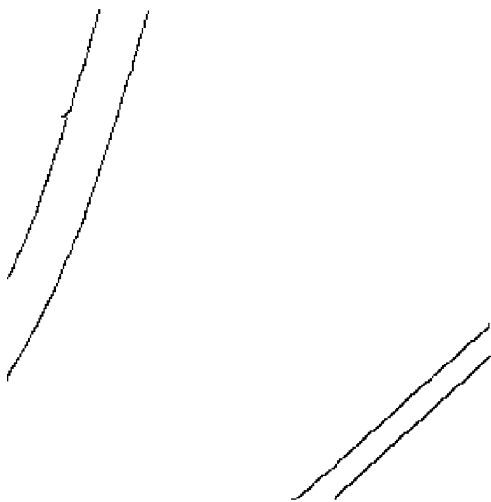
B. RESULTADOS EXPERIMENTAIS ADICIONAIS



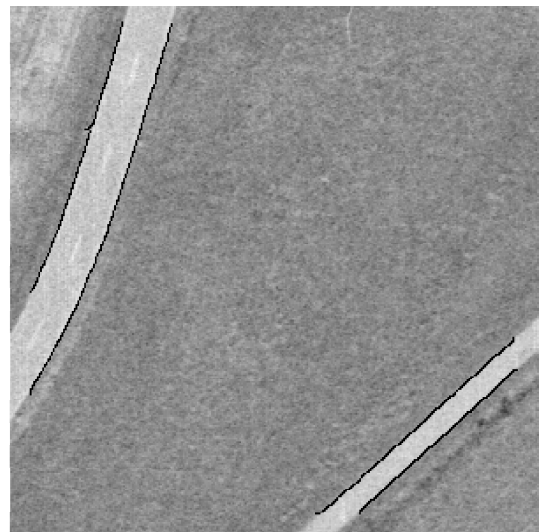
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.

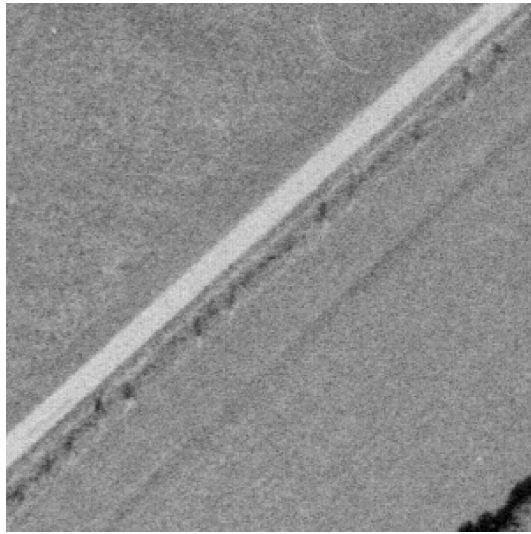


(c) Imagem dos contornos conexos processados.

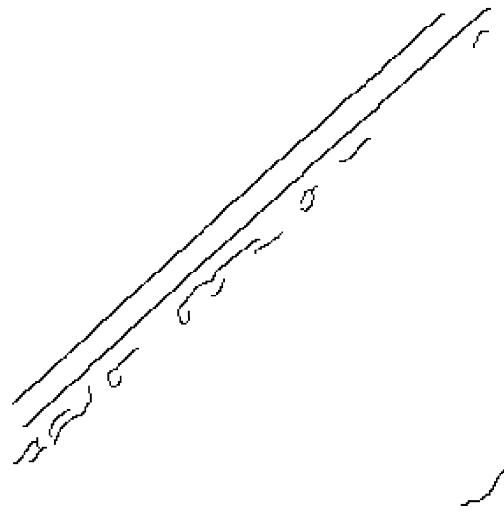


(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

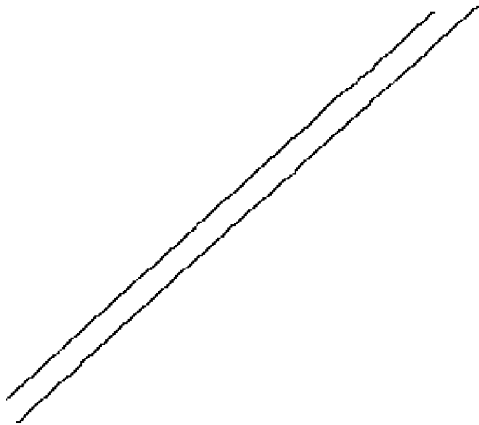
Figura B.5.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que revela a presença de um trecho de **estrada do tipo A** e um trecho de **estrada do tipo B**. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.



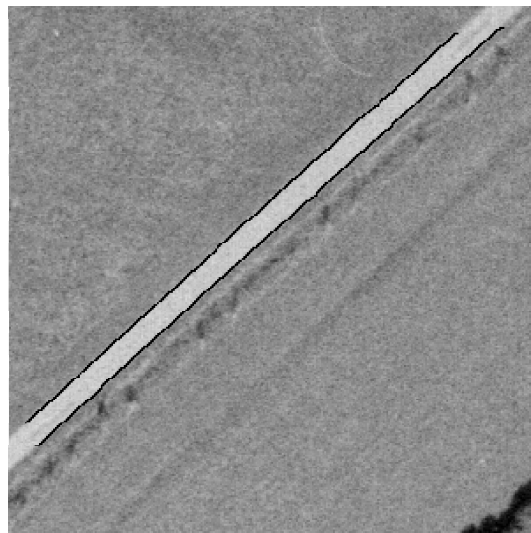
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



(c) Imagem dos contornos conexos processados.



(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

Figura B.6.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que representa um trecho rectilíneo de uma **estrada do tipo A**. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.

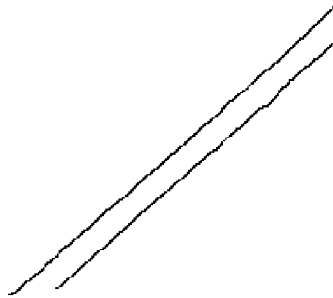
B. RESULTADOS EXPERIMENTAIS ADICIONAIS



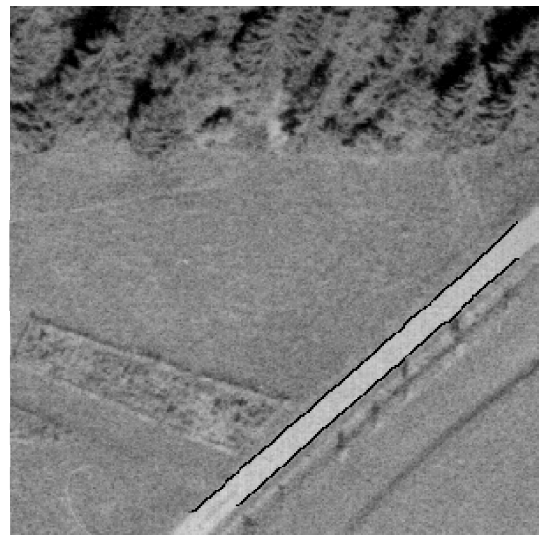
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



(c) Imagem dos contornos conexos processados.

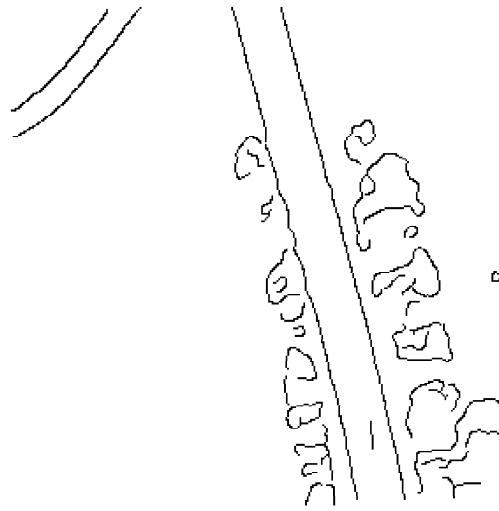


(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

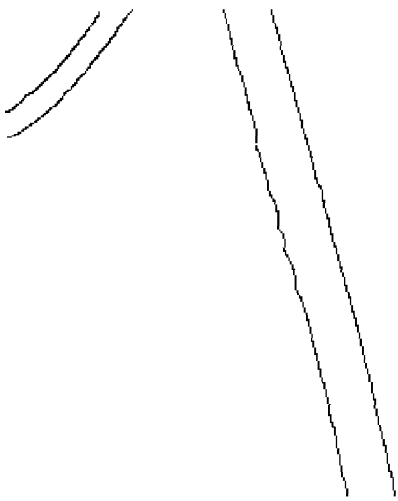
Figura B.7.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que representa um trecho rectilíneo de uma **estrada do tipo A**. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.



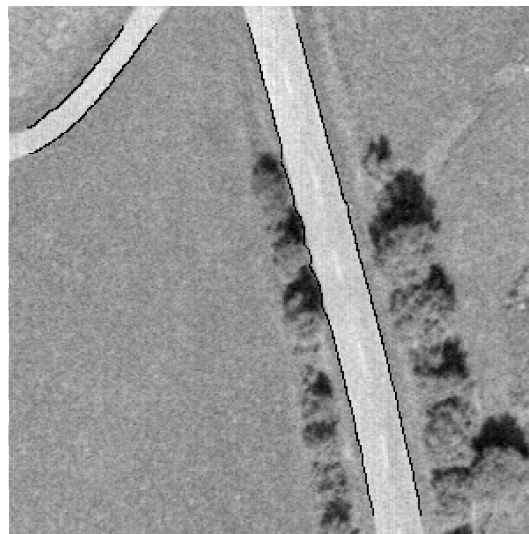
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



(c) Imagem dos contornos conexos processados.



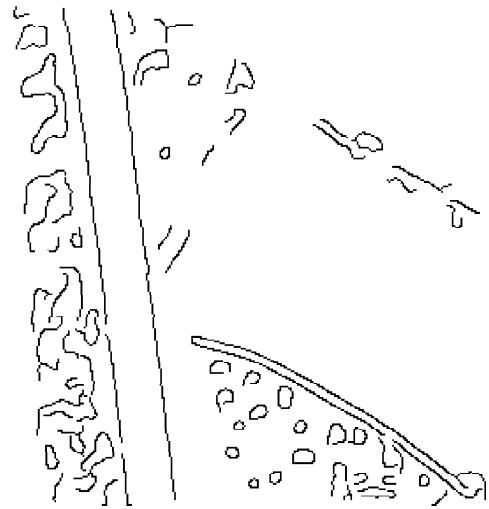
(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

Figura B.8.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que revela a presença de um trecho de **estrada do tipo A** e um trecho de **estrada do tipo B**. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.

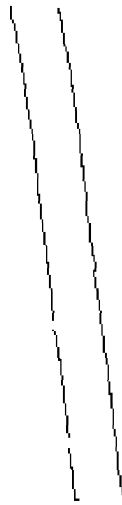
B. RESULTADOS EXPERIMENTAIS ADICIONAIS



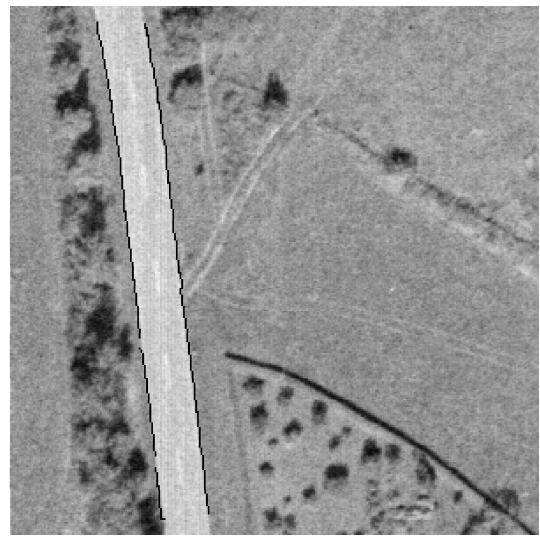
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



(c) Imagem dos contornos conexos processados.

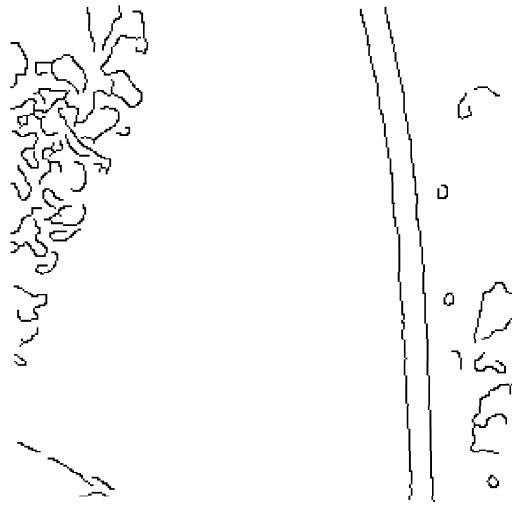


(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

Figura B.9.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que representa um trecho rectilíneo de uma **estrada do tipo B**. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.



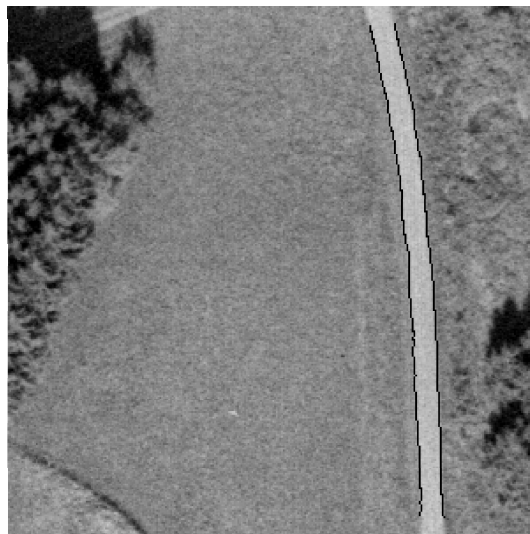
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



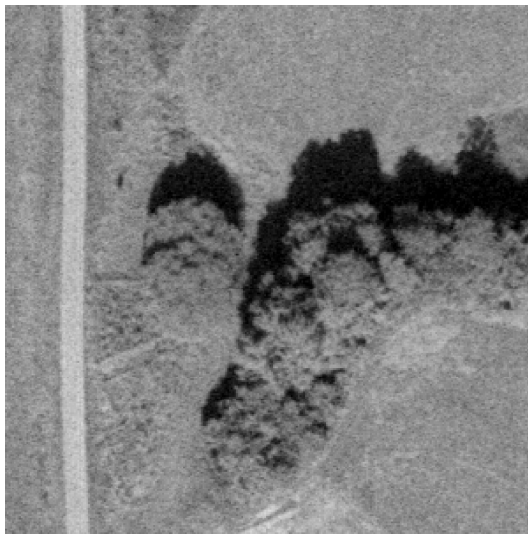
(c) Imagem dos contornos conexos processados.



(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

Figura B.10.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que representa um trecho misto (parte retilíneo e parte curvo) de uma **estrada do tipo A**. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.

B. RESULTADOS EXPERIMENTAIS ADICIONAIS



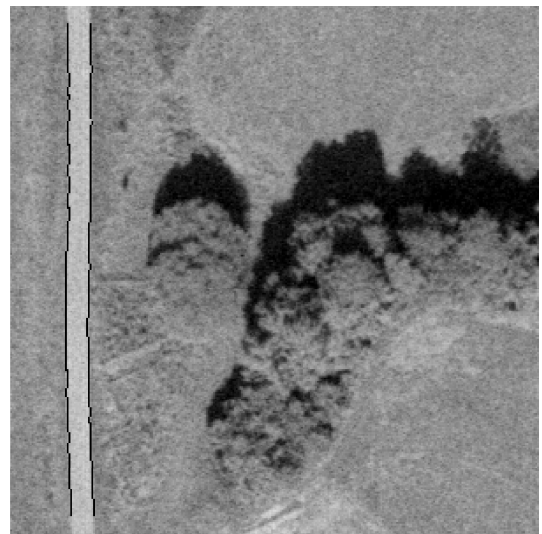
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



(c) Imagem dos contornos conexos processados.

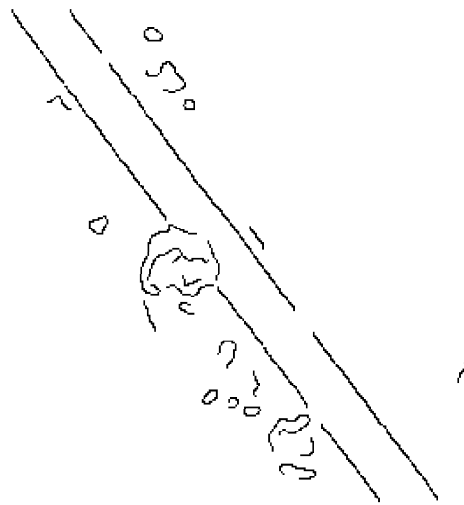


(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

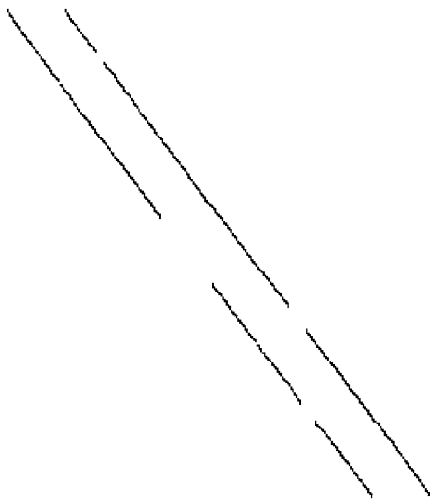
Figura B.11.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que representa um troço rectilíneo de uma **estrada do tipo A**. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.



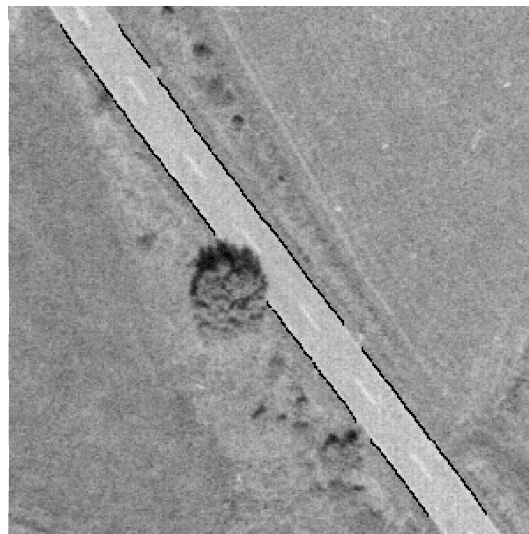
(a) Imagem de entrada.



(b) Imagem de contornos conexos.



(c) Imagem dos contornos conexos processados.



(d) Sobreposição das margens com a imagem de entrada.

Figura B.12.: As imagens (b) e (c) representam respectivamente os resultados da aplicação da primeira e segunda fases da metodologia descrita nesta dissertação sobre a imagem da figura (a), que representa a existência de uma sombra que cobre uma das margens do trecho de **estrada do tipo B**. Salienta-se que a metodologia descrita nesta dissertação não detecta a margem que se encontra ocultada pela sombra provocada pela árvore. A imagem (d) representa o resultado final sobreposto à imagem de entrada.

B. RESULTADOS EXPERIMENTAIS ADICIONAIS

C

Ferramentas Utilizadas

Para a obtenção dos resultados apresentados neste documento recorreu-se ao seguinte equipamento:

Hardware

- Computador portátil **TOSHIBA** modelo **310CDT**, Pentium 166 com 128Mb de Ram.

Software

- **Sistema operativo:** Linux versão 5.2.
- **Manipulação de imagens:** GIMP - The Gnu Image Manipulation Program, versão 1.0.1.
- **Realização de figuras:** XFIG, versão 3.2 *patchlevel 2 (Protocol 3.2)*.
- **Compilador de C++:** EGCS G++- *version*.
- **Processamento de texto:** T_EX e L^AT_EX 2_ε
- **Edição de texto:** EMACS 20.2.
- **Software de realização de gráficos:** GNU PLOT 3.2.
- **Software para a implementação da maioria dos algoritmos:** OCTAVE (versão 2.0.13.90), linguagem de programação *MatLab*.

C. FERRAMENTAS UTILIZADAS

Bibliografia

- Ando, Shigeru. 2000. "Coonsistent Gradient Operators." *IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22 (3): 252–265 (Março).
- Arctur, David K. 1996, Maio. "Design of an Extensible, Object-Oriented GIS Framework With Reactive Capability." Ph.D. diss., University of Florida.
- Aronoff, Stan. 1995. *Geographic Information Systems: A Management Perspective*. Wdl, Publications.
- Bajcsy, R. e M. Tavakli. 1976. "Computer Recognition of Roads from Satellite Pictures." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 6:623–637.
- Barzohar, M. e D. B. Cooper. 1995. "New Geometric Stochastic Technology for Finding and Recognizing Roads and their Features in Aerial Images." Em *Automatic Extaction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, editado por Birkhauser Verlag, 255–264. A. Gruen and O. Kuebler and P. Agouris.
- . 1996. "Automatic Finding of Main Roads in Aerial Images by Using Geometric-Stochastic Models and Estimation." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 18 (7): 707–721 (Julho).
- Baumgartner, Albert, Carsten Steger, Helmut Mayer, e Wolfgang Eckstein. 1997. "Multi-resolution, Semantic Objects, and Context for Road Extraction." Em *Semantic Modelling for the Aquisition of Topographic Information from Images and Maps*, Wolfgang Forstner and Lutz Plumer, 140–156. Birkhauser Verlag.
- Baumgartner, Albert, Carsten Steger, Helmut Mayer, Wolfgang Eckstein, e Heinrich Ebner. 1999. "Automatic Road Extraction Based on Multi-Scale, Grouping and Context." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 7 (65): 777–785 (Julho).
- Baumgartner, A., C. Steger, H. Mayer, W. Eckstein, C. Wiedemann, e H. Ebner. 1996, Junho. "Update of Roads in GIS from Aerial Imagery: Verification and Multi-resolution Extraction." *Second International Airbone Remote Sensing Conference and Exhibition*. San Francisco, California.
- Bordes, G., G. Giraudon, e O. Jamet. 1997. "Road Modelling Based on a Cartographic Database for Aerial Image Interpretation." Em *Semantic Modelling for the Aquisiti-*

- on of Topographic Information from Images and Maps*, 123–139. Birkhauser Verlag Basel.
- Burrough, P. A. 1991. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford University Press.
- Butenfield, B. P. e W. A. Mackaness. 1991. “Visualization.” Em *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, editado por David Maguire, Michael Goodchild, e David W. Rhind, Volume 1, 427–443. Longman Scientific and Technical.
- Caeiro, José e Moisés Piedade. 1995, Outubro. “Errors in the Estimation of Gradient Direction Using IIR and FIR Implementations.” *International Conference On Image Processing*, Volume 2. The IEEE Signal Processing Society Washington, D. C., 137–140.
- Canny, J. 1986. “A Computational Approach to Edge Detection.” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 6 (8): 679–698.
- Casaca, João. 1996. *Elementos de Cartografia e Geodesia*. Departamento de Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico.
- . 1997. *Topografia*. Departamento de Engenharia Civil. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Clark, K. C. 1986. “Recent Trends in Geographic Information Systems.” *Geo-Processing*, pp. 1–15.
- Clark University. *IDRISI 2.0 User’s Guide*. Clark University.
- Cooper, D.B., M. Cohen, M. Barzohar, e M. Ziskind. 1997. “Robust Method for Automatic Aerial Detection of Occluded Roads Based on Multihypothesis Generalized Kalman Filter.” *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 32:1–7.
- Cooper, D. B. e F. P. Sung. 1983. “Multiple-Window Parallel Adaptive Boundary Finding in Computer Vision.” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*.
- Cormen, Thomas H., Charles E. Leiserson, e Ronald L. Rivest. 1996. *Introduction to Algorithms*. McGraw-Hill.
- Cowen, D. J. 1988. “GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences?” *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 10 (54): 1551–1554.
- Davis, Bruce. 1996. *GIS A Visual Approach*. OnWord Press.
- de Sousa, Leonel Augusto Pires Seabra. 1996. “Processadores Paralelos de Imagem com Acesso Ortogonal a Memória Partilhada.” Ph.D. diss., Instituto Superior Técnico.
- DeMers, Michael N. 1997. *Fundamentals of Geographic Information Systems*. John Wiley and Sons.

- Deriche, Richard. 1990. "Fast Algorithms for Low-Level Vision." *IEEE: Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 12, no. 1 (Janeiro).
- English, A., C. Heipke, W. Reinhart, e M. Ebner. 1996. "On the Content of Digital Aerial Imagery for GIS Revision." *International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing* B4/4 (31): 231–236.
- Fischler, J.M. e H. Wolk. 1981. "Detection of Roads and Linear Structures in Low-Resolution Aerial Images Using a Multisource Knowledge Integration Technique." *Computer Graphics and Image Processing* 15:201–223.
- Fisher, P. F. 1991. "Spatial Data Sources and Data Problems." Em *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, editado por David Maguire, Michael Goodchild, e David W. Rhind, Volume 1, 175–189. Longman Scientific and Technical.
- Forlani, G., E. Malinervi, e C. Nardinocchie. 1996. "Using Perceptual Grouping for Road Recognition." *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 31. 202–206.
- Fua, P. e Y. Leclerc. 1990. "Model Driven Edge Detection." *Machine Vision and Applications* III:45–56.
- Fua, P., O. Kubler, W. Newenschwander, e P. Székely. 1995. "From Ziplock Snakes to Velcro Surfaces." Em *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial Images and Spaces Images*, 105–114. Birkhauser Verlag Basel.
- Geman, Donald e Bruno Jedynek. 1996. "An Active Testing Model for Tracking Roads in Satellite Images." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 18 (1): 1–14 (Janeiro).
- Goodchild, M. F. 1991. "The Technological Setting of GIS." Em *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, editado por David Maguire, Michael Goodchild, e David W. Rhind, Volume 1. Longman Scientific and Technical.
- . 1997. "Postscript: New Directions for GIS Research." Em *Geographic Information Research: Bridging the Atlantic*, editado por Massimo Craglia e Helen Couclelis, 588–595. Taylor and Francis.
- Haralick, Robert e Linda G. Shapiro. 1992. *Computer and Robot Vision*. Addison-Wesley.
- Healey, Richard, Steve Dowers, Bruce Gittings, e Mike Mineter. 1998. *Parallel Processing Algorithms for GIS*. Taylor and Francis.
- Hinz, S., A. Baumgartner, C. Steger, H. Mayer, W. Eckstein, H. Ebner, e B. Radig. 1999. "Road Extraction in Rural and Urban Areas." Technical Report, Chair of Photogrammetry and Remote Sensing and the Departement of Computer Science (Image Analysis Group) at TU Muenchen.

- Jain, Anil K. 1989. *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice-Hall International Editions.
- Jensen, J. R. 1986. *Introductory Digital Image Processing, a Remote Sensing Perspective*. Prentice-Hall.
- Kass, M., A. Witkin, e D. Terzopoulos. 1987. “Snakes: Active Contour Models.” *Proceedings, First International Conference on Computer Vision*. IEEE London, England, 259–268.
- Lagrange, Jean-Philippe. 1997. “Generalization: Where are we? Where should we go?” Em *Geographic Information Research: Bridging the Atlantic*, editado por Massimo Craglia e Helen Couclelis, 187–204. Taylor and Francis.
- Lanser, S. e W. Eckstein. 1992. “A Modification of DERICHE’s Approach to the Edge Detection.” Editado por 633-637, *11th International Conference on Pattern Recognition*, Volume III.
- Laurini, Robert e Derek Thompson. 1993. *Fundamentals of Spatial Information Systems*. Academic Press.
- Lillesand, Thomas M. e Ralph W. Kiefer. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation, third edition*. John Wiley and Sons.
- Locherbach, T. 1995. *System Performance for Semiautomatic Building Reconstruction*. Germany: 2nd Course in Digital Photogrammetry, Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen.
- Maguire, D. J. 1991. “An Overview and Definition of GIS.” Em *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, editado por David Maguire, Michael Goodchild, e David W. Rhind, Volume 1. Longman Scientific and Technical.
- Maguire, D. J. e J. Dangermond. 1991. “The Functionality of GIS.” Em *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, editado por David Maguire, Michael Goodchild, e David W. Rhind, Volume 1. Longman Scientific and Technical.
- Marques, Jorge Salvador. 1999, Setembro. *Reconhecimento de Padrões - Métodos Estatísticos e Neurais*. IST PRESS.
- Mason, Scott, Manos Baltavias, e Dirk Stallmann. 1994, Dezembro. “High Precision Photogrammetric Data Set for Building Reconstruction and Terrain Modelling.” Technical Report, Institute for Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute for Technology (ETH), Zurich, 8093 Hoenggerberg, Switzerland.
- Matos, João e Miguel Baio. 1997. *Elementos de Topografia*. Departamento de Engenharia Civil. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Mayer, Helmut, Ivan Laptev, Albert Baumgartner, e Carsten Steger. 1997. “Automatic Road Extraction Based on Multi-Scale Modelling, Context and Snakes.” *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* XXXII:106–113.

- Mayer, Helmut, Ivan Laptev, e Albert Baumgartner. 1998. "Multi-scale and Snakes for Automatic Road Extraction." *5th European Conference on Computer Vision*, Volume I. 720–733.
- Mayer, H., C. Steger, C. Wiedemann, e H. Ebner. 1995. "Multi-resolution road extraction and road verification from aerial imagery." *Minutes of the Joint workshop on Integrated Acquisition and interpretation of Photogrammetric Data, Technical Reports*. Department of Geodesy, Universität Stuttgart.
- McKeown, Jr. 1990. "Toward Automatic Cartographic Feature Extraction." *Mapping and Spatial Modelling for Navigation* F65:149–180.
- McKeown, Jr. e J. Denlinger. 1988. "Cooperative Methods for Road Tracking in Aerial Imagery." *Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 662–672.
- Merlet, Nicolas e Josiane Zerubia. 1996. "New Prospects in Line Detection by Dynamic Programming." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 18, no. 4 (Abril).
- Meyer, H. e C. Steger. 1996. "A New Approach for Line Extraction and its Integration in a Multi-scale, Multi-abstraction-level Road Extraction System." Editado por IAPR TC 7 Workshop, *Methods for Extraction and Mapping Buildings, Roads and Other Man-Made Structures from Images*.
- Moffitt, Francis H. 1967. *Photogrammetry*, 2ª edição. International Textbook Company.
- Mukherjee, A., S. K. Parui, B. B. Chaudhuri, e R. Krishnanand K. K. Rao. 1994. "Detection of Linear Features in Satellite Imagery Using Robust Estimation." *Proc. 12th IAPR International Conference on Pattern Recognition*. Jerusalem, Israel, 514–516.
- Netanyahu, Nathan S., Vasanth Philomin, Azriel Rosenfeld, e Arnold J. Stromberg. 1997. "Robust Detection of Straight and Circular Road Segments in Noisy Aerial Images." *Pattern Recognition* 30 (10): 1673–1686.
- Openshaw, S., M. Charlton, e S. Carver. 1991. "Error Propagation: A Monte Carlo Simulation." Em *Handling Geographical Information*, editado por I. Masser e M. Blakemore, 79–101. London: Longman.
- Ramer, U. 1972. "An Interactive Procedure for the Polygonal Approximation of Plane Curves." *Computer Graphics and Image Processing* 1:244–256.
- Rowley, J. e P. Gilbert. 1989. "The Market for Land Information Services, Systems and Support." Em *The Association for Geographic Information Yearbook*, editado por P. J. Shand e R. V. Moore, 85–91. Taylor and Francis and Miles Arnold.
- Ruskoné, R. 1996. "Road Network Automatic Extraction by Local Context Interpretation: Application to the Production of Cartographic Data." Ph.D. diss., Université Marne-La-Vallée.

- Schalkoff, Robert. 1992. *Pattern Recognition: Statistical, Structural and Neural Approaches*. John Wiley and Sons.
- Sonka, Milan, Vaclav Hlavac, e Roger Boyle. 1993. *Image Processing, Analysis and Machine Vision*. Chapman and Hall.
- Steger, Carsten. 1996. "Extraction of Curved Lines from Images." *13th International Conference on Pattern Recognition*, Volume II. 251–255.
- . 1998. "An Unbiased Detector of Curvilinear Structures." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 20 (2): 113–125 (Fevereiro).
- Steger, C. e W. Eckstein. 1996. "Fusion of Digital Terrain Models and Texture for Object Extraction." *Proceedings of the Second International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, Volume III. Environment Research Institute of Michigan, 1–10.
- Steger, C., W. Eckstein, e C. Wiedemann. 1996, Junho. "Update of Roads in GIS by Automatic Extraction from Aerial Imagery." *Second International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*. San Francisco, California.
- Steger, Carsten, Clemens Glock, Wolfgang Eckstein, Helmut Mayer, e Bernd Radig. 1995. "Model-Based Road Extraction from Images." Em *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, editado por A. Gruen, O. Kuebler, e P. Agouris, 275–284. Birkhauser Verlag.
- Therrien, Charles W. 1992. *Discrete Random Signals and Statistical Signal Processing*. Prentice-Hall.
- Torre, Vincent e Tomaso A. Poggio. 1986. "On Edge Detection." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 8 (2): 147–163. ISSN 0162-8828.
- Vosselman, G. e J. Knecht. 1995. "Road Tracking by Profile Matching and Kalman Filtering." Em *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial Images and Spaces Images*, 265–274. Birkhauser Verlag Basel.
- Walsby, Jennifer C. 1995. "The Causes and Effects of Manual Digitizing on Error Creation in Data Input to GIS." Em *Innovations in GIS 2*, editado por Peter Fisher, 113–122. Taylor and Francis.
- Zerubia, Josiane e Nicolas Merlet. 1993, Abril. "Classical Mechanics and Roads Detection." Technical Report, INRIA.