

**Segmentação Morfológica de
Componentes Gráficos e Textuais de
uma Carta Náutica**

Carlos Roberto Cunha Fernandes

Dissertação de Mestrado

Segmentação Morfológica de Componentes Gráficos e Textuais de uma Carta Náutica ¹

Carlos Roberto Cunha Fernandes ²

Instituto de Computação

Unicamp

Banca Examinadora:

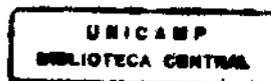
- Neucimar Jerônimo Leite, Dr (Orientador) ³
- Paulo Lício de Geus, PhD ³
- Jacques Facon, Dr ⁴
- Jorge Stolfi, PhD (Suplente) ³

¹ Dissertação apresentada ao Instituto de Computação da UNICAMP, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

² O autor é Bacharel em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Ceará

³ Professor do Instituto de Computação da UNICAMP

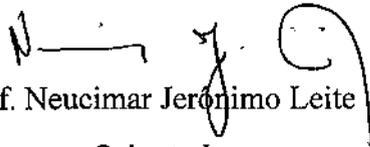
⁴ Professor da Pontifícia Universidade Católica - Paraná



Segmentação Morfológica de Componentes Gráficos e Textuais de uma Carta Náutica

Este exemplar corresponde à redação final da tese devidamente corrigida e defendida pelo Sr. Carlos Roberto Cunha Fernandes e aprovada pela Comissão Julgadora.

Campinas, 20 de janeiro de 1998


Prof. Neucimar Jerônimo Leite
Orientador

Dissertação apresentada ao Instituto de Computação, UNICAMP, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

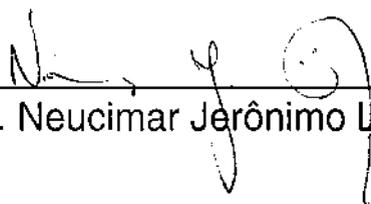
Tese de Mestrado defendida e aprovada em 22 de dezembro de 1997 pela Banca Examinadora composta pelos Professores Doutores



Prof. Dr. Jacques Facon



Prof. Dr. Paulo Lício de Geus



Prof. Dr. Neucimar Jerônimo Leite

INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO
Av. Albert Einstein N.º 1251
13084-970 - Campinas - SP

*Aos meus pais e a Josumitra por
todo o amor, incentivo e apoio em
todas as etapas deste trabalho.*

INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO
Av. Albert Einstein n.º 1251
13081-970 - Campinas-SP

Agradecimentos

A Deus que sempre esteve presente em todos os momentos da minha vida.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho como funcionários, colegas e professores do Instituto de Computação da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

Ao meu orientador, professor Neucimar Jerônimo Leite pelas valiosas críticas e sugestões que foram fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação.

À Carlos Hoyos, pela ajuda na implementação em C++ deste trabalho.

À Rede Globo, que me cedeu alguns dias essenciais para a finalização deste trabalho.

Aos amigos Marques e Frota da Marinha do Brasil que sempre procuraram obter as cartas náuticas necessárias para a realização deste trabalho.

Finalmente, quero registrar o apoio financeiro recebido do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) e do projeto SAPRI - FAPESP.

INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO
Av. Albert Einstein n.º 1251
13081-700 - Campinas-SP

Resumo

Um dos problemas importantes em visão computacional refere-se a separação e reconhecimento corretos de componentes de uma imagem com fundo complexo. O presente trabalho aborda, a partir da teoria da Morfologia Matemática, a segmentação de componentes gráficas e textuais de cartas náuticas, tais como rios, lagoas, estradas de ferro, canais, caracteres, etc. As operações desenvolvidas podem ser associadas, por exemplo, a um sistema eletrônico de manipulação e reconhecimento de cartas náuticas visando, entre outros, o armazenamento da informação em bancos de dados geográficos ou hidrográficos.

INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO
Av. Albert Einstein n.º 1251
13081-970 - Campinas-SP

Abstract

One of the key problems in computer vision is the recognition and correct separation of an image components from a complex background. The current work presents the segmentation of nautical chart components such as rivers, lakes, railways, canals, text characters, and so on. We have developed functions that use Mathematical Morphology theory to segment these components. We also use some geodesic operation concepts to keep the connectivity of the components. The operations developed here can be associated to an electronic nautical chart device or to a nautical chart recognition system for data storage in a geographical or a hidrographical database.

INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO
Av. Albert Einstein N.º 1251
13081-970 - Campinas-SP

Conteúdo

1 Introdução

Introdução	1
1.1 - Objetivo do Trabalho.....	2
1.2 - Caracterização do Problema.....	3
1.2.1 - Segmentação das componentes.....	3
1.2.2 - Segmentação das Componentes de Cartas Náuticas por Morfologia Matemática.....	3
1.3 - Implementação.....	4
1.4 - Aplicações.....	6
1.5 - Organização do Trabalho.....	7

2 Métodos de Segmentação Cartográficos

2.1 - Introdução.....	8
2.2 - Representação Raster X Representação Vetorial.....	9
2.3 - Segmentação Automática e semi-automática.....	10
2.4 - Segmentação Sequencial e Segmentação Paralela.....	10
2.5 - Alguns Métodos de Segmentação Cartográfica.....	10
2.5.1 - Limiarização.....	11
2.5.2 - Segmentação Utilizando Grafos.....	12
2.5.2.1 -Um exemplo de utilização de Grafos na Segmentação de Mapas.....	12
2.5.3 - Segmentação Utilizando o Sistema MARIS.....	16

INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO
Av. Albert Einstein N.º 125
13081-970 - Campinas-SP

2.5.3.1 - Introdução.....	16
2.5.3.2 - Vetorização.....	17
2.5.3.3 - Traçamento de Bordas.....	19
2.5.3.4 - Rastreamento de Linhas Contínuas.....	20
2.5.3.5 - Extração de Prédios.....	20
2.5.3.6 - Estrada de Ferro, Linhas de Contorno, Estrada e Lagoas.....	21
2.5.3.7 - Extração de Isolinhas.....	21
2.5.4 - Morfologia Matemática e Segmentação Cartográfica.....	22

3 Morfologia Matemática

Morfologia Matemática.....	23
3.1 - O que é Morfologia Matemática.....	23
3.2 - Transformações Morfológicas.....	24
3.2.1 - Transformações Clássicas.....	24
3.2.2 - Transformações HMT.....	24
3.3 - Erosão e Dilatação.....	26
3.4 - Outras Operações Morfológicas.....	28
3.4.1 - Abertura e Fechamento.....	29
3.4.2 - Afinamento e Espessamento Homotópico.....	29
3.5 - Algumas Propriedades das Transformações Morfológicas.....	31
3.6 - Transformações Geodésicas.....	34
3.6.1 - Distâncias Geodésicas.....	34
3.6.2 - Erosão e Dilatação Geodésica.....	36

4 Segmentação de Cartas Náuticas

Segmentação de Cartas Náuticas.....	38
4.1 - Pré-processamento das Cartas Náuticas.....	38
4.2 - Famílias de Operações.....	39

4.2.1 - Convenções.....	39
4.2.2 - Erosão e Dilatação.....	40
4.2.3 - Erosão e Dilatação Geodésica.....	42
4.2.4 - Abertura e Fechamento Geodésica.....	42
4.3 - Funções Morfológicas.....	42
4.3.1 - Classificação das Funções Morfológicas.....	45
4.3.2 - Funções Básicas.....	46
4.3.2.1 - Espessas.....	46
4.3.2.2 - Função Filtragem Inicial.....	48
4.3.2.3 - Contorno dos Objetos.....	50
4.3.2.4 - Arestas.....	52
4.3.2.5 - Filtra Aresta.....	53
4.3.2.6 - Longas Inicial.....	58
4.3.2.7 - Linhas Paralelas.....	60
4.3.2.8 - Longas.....	60
4.3.2.9 - Curtas.....	62
4.3.3 - Funções Principais.....	63
4.3.3.1 - Coordenadas.....	63
4.3.3.2 - Estrada de Ferro.....	64
4.3.3.3 - Isolinhas.....	74
4.3.3.4 - Canais.....	81
4.3.3.5 - Prédios.....	82
4.3.3.6 - Antenas de Rádio.....	84
4.3.3.7 - Caracteres.....	88
4.3.3.8 - Lagos, Rios e Praias.....	90
4.4 - Outros Exemplos.....	92
5 Conclusão.....	101
Apêndice.....	102
Bibliografia.....	106

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Exemplo de uma imagem em níveis de cinza digitalizada com taxas de brilho e contraste de 23% e 60% respectivamente.....	5
Figura 1.2 - Imagem da Figura 1.1 binarizada.....	5
Figura 1.3 - Cadeia de Processamento da Segmentação de Cartas Náuticas.....	6
Figura 2.1 - Exemplo de um mapa cadastral italiano.....	13
Figura 2.2 - Exemplo de representação de um prédio e do método utilizado no seu reconhecimento.....	14
Figura 2.3 - Exemplo de parcelas.....	16
Figura 2.4 - Exemplo de um mapa topográfico de escala reduzida do Japão.....	17
Figura 2.5 - Exemplo de vetorização de uma componente a partir da sua linha média.....	17
Figura 2.6 - Exemplo de tabelas geradas pela vetorização.....	18
Figura 2.7 - Direções de um desvio.....	19
Figura 2.8 - Exemplo do funcionamento do algoritmo traçamento de bordas.....	19
Figura 2.9 - Condições de parada do algoritmo de rastreamento de linhas contínuas.....	20
Figura 2.10 - Exemplo da extração de um prédio de um mapa topográfico japonês.....	21
Figura 3.1 - Família de configurações de um elemento estruturante B_x	25
Figura 3.2 - Exemplo de uma operação de dilatação.....	27
Figura 3.3 - Exemplo de uma operação de erosão.....	28
Figura 3.4 - Exemplo de uma família de elementos estruturantes utilizada no afinamento homotópico de uma imagem.....	30
Figura 3.5 - Exemplo de uma família de elementos estruturantes utilizada no espessamento de uma imagem.....	31

Figura 3.6 - Definição de distância geodésica.....	34
Figura 3.7 - Exemplo de círculo geodésico.....	35
Figura 3.8 - Exemplo de dilatação e erosão geodésicas.....	37
Figura 3.9 - Exemplo de Reconstrução Geodésica.....	37
Figura 4.1 - As direções \underline{d} utilizadas neste trabalho.....	40
Figura 4.2 (a) - Imagem original de uma carta náutica binarizada.....	43
Figura 4.2 (b) - Outra amostra de uma imagem original binarizada.....	44
Figura 4.3 - Resultados intermediários da função espessas.....	46
Figura 4.4 (a) - Resultado da aplicação da função espessas à amostra da Figura 4.2(a)....	47
Figura 4.5 (b) - Resultado da aplicação da função espessas à amostra da Figura 4.2(b)...	48
Figura 4.6 - Resultados intermediários da função <code>filtragem_inicial</code>	49
Figura 4.6 (a) - Resultados da aplicação da função <code>filtragem_inicial</code> sobre a imagem 4.2 (a)	49
Figura 4.6 (b) - Resultados da aplicação da função <code>filtragem_inicial</code> sobre a imagem 4.2 (b)	50
Figura 4.7 (a) - Contorno da amostra 4.2 (a)	51
Figura 4.7 (b) - Contorno da amostra 4.2 (b)	52
Figura 4.8 - Indicação dos resultados intermediários da função <code>filtra_aresta</code> amostras..... de cartas náuticas.....	54
Figura 4.9 - Resultados intermediários R1, R2, R3 e R4 da função <code>filtra_aresta</code> aplicada para a direção $d=0$ sobre a amostra 4.2 (a).....	55
Figura 4.10 - Resultados intermediários R5, R6, R7 e R8 da função <code>filtra_aresta</code> aplicada para a direção $d=0$ sobre a amostra 4.2 (a).....	56
Figura 4.11 - Resultados intermediários R9 da função <code>filtra_aresta</code> aplicada para a direção $d=0$ sobre a amostra 4.2 (a).....	57

Figura 4.12 (b) - Resultado final da aplicação da função filtra_aresta sobre a amostra 4.2(a).....	58
Figura 4.13 - Segmentos longos extraídos pela função longas_inicial aplicada sobre as amostras 4.2 (a) e 4.2 (b).....	59
Figura 4.14 - Resultado da aplicação da função longas sobre as amostras 4.2 (a) e 4.2 (b)..	61
Figura 4.15- Resultado da aplicação da função curtas sobre a imagem 4.2 (a).....	63
Figura 4.16- Resultado da aplicação da função coord à imagem 4.2 (a).....	64
Figura 4.17- Resultado da aplicação da função aux1 sobre uma imagem contendo estrada de ferro (a).....	65
Figura 4.18- Indicação dos resultados parciais da função aux1.....	66
Figura 4.19- Resultados parciais da função aux1 aplicada sobre a amostra da Figura 4.2(b)	67
Figura 4.20 - Indicação dos resultados intermediários da função aux 1.....	68
Figura 4.21 - Resultados intermediários da função aux 1 aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (b).....	68
Figura 4.22 - Indicação dos resultados intermediários da função ferrovia.....	69
Figura 4.23 - Resultados intermediários da função ferrovia para a direção d=0 aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (b).....	70
Figura 4.24 - Resultados intermediários da função ferrovia para a direção d=1 aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (b).....	71
Figura 4.25 - Resultados intermediários da função ferrovia para a direção d=2 aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (b).....	72
Figura 4.26 - Resultados intermediários da função ferrovia para a direção d=3 aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (b).....	73
Figura 4.27 - Resultado final da aplicação da função ferrovia sobre a imagem da Figura 4.2 (b).....	74

Figura 4.28 - Indicação do resultados intermediários da função isolinhas.....75

Figura 4.29 - Resultados intermediários da função isolinhas para a direção $d=0$ ($f_0^{isolinhas}$) aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (a).....76

Figura 4.30 - Resultados intermediários da função isolinhas para a direção $d=1$ ($f_1^{isolinhas}$) aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (a).....77

Figura 4.31 - Resultados intermediários da função isolinhas para a direção $d=2$ ($f_2^{isolinhas}$) aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (a).....78

Figura 4.32 - Resultados intermediários da função isolinhas para a direção $d=3$ ($f_3^{isolinhas}$) aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (a).....79

Figura 4.33 - Isolinhas extraída pela função Isolinhas aplicada sobre a imagem da Figura 4.2 (a).....80

Figura 4.34 - Aplicação da função `isolinhas_ref` sobre a imagem da Figura 4.33.....81

Figura 4.35 - Imagem resultante da aplicação da função `canais` sobre a imagem 4.2(a)....82

Figura 4.36 - Resultados intermediários da aplicação da função `prédios` sobre a imagem da Figura 4.2(b).....83

Figura 4.37 - Aplicação da função `prédios` sobre a imagem da Figura 4.2 (b).....84

Figura 4.38 - Indicação dos resultados parciais da função `antenas`.....85

Figura 4.39 - Resultados parciais da aplicação da função `antenas` sobre uma pequena parte da amostra da imagem 4.2(b).....86

Figura 4.40 - Imagem resultante da aplicação da função `antenas` à imagem da Figura 4.2 (a).....87

Figura 4.41(a) - Indicação dos resultados intermediários da função `caractere`.....88

Figura 4.41 (b) - Resultados intermediários da aplicação da função `caractere` sobre a amostra da Figura 4.2 (a).....89

Figura 4.42 - Função caractere aplicada sobre as amostra das Figuras 4.2 (a) e 4.2 (b)...	90
Figura 4.43 - Resultado da aplicação da função lagos_e_rios sobre as amostra das figuras 4.2 (a) e 4.2 (b).....	91
Figura 4.44 - Imagem original(amostra1).....	92
Figura 4.45 - Lagos e rios (amostra1).....	92
Figura 4.46 - prédios (amostra1).....	92
Figura 4.47 - Coordenadas(amostra 1).....	93
Figura 4.48 - Caracteres(amostra 1).....	93
Figura 4.49 - Isolinhas(amostra 1).....	93
Figura 4.50 - Canais (amostra 1).....	93
Figura 4.51 - Ferrovia.(amostra 1).....	93
Figura 4.52 - Imagem original (amostra 2).....	94
Figura 4.53- Lagos e rios(amostra 2).....	94
Figura 4.54 - Prédios (amostra 2).....	94
Figura 4.55 - Coordenadas (amostra 2).....	94
Figura 4.56 - Caracteres (amostra 2).....	95
Figura 4.57 -Isolinhas (amostra 2).....	95
Figura 4.58 - Canais (amostra 2).....	95
Figura 4.59 - Ferrovia (amostra 2).....	95
Figura 4.60 - Imagem original (amostra 3).....	96
Figura 4.61 - Lagos e rios (amostra 3).....	96
Figura 4.62 - Prédios (amostra 3).....	96
Figura 4.63 - Coordenadas (amostra 3).....	96
Figura 4.64 - Caracteres (amostra 3).....	96

Figura 4.65 - Isolinhas (amostra 3).....	96
Figura 4.66 - Canais (amostra 3).....	97
Figura 4.67 - Ferrovia (amostra 3).....	97
Figura 4.68 - Imagem original (amostra 4).....	97
Figura 4.69- Lagos e rios (amostra 4).....	97
Figura 4.70 - Prédios (amostra 4).....	97
Figura 4.71 - Coordenadas (amostra 4).....	98
Figura 4.72 - Caracteres (amostra 4).....	98
Figura 4.73 -Isolinhas (amostra 4).....	98
Figura 4.74 - Canais (amostra 4).....	98
Figura 4.75 - Ferrovia (amostra 4).....	98
Figura 4.76 - Imagem original (amostra 5).....	99
Figura 4.77- Lagos e rios (amostra 5).....	99
Figura 4.78 - Prédios (amostra 5).....	99
Figura 4.79 - Coordenadas (amostra 5).....	99
Figura 4.80 - Caracteres (amostra5).....	100
Figura 4.81 - Isolinhas (amostra 5).....	100
Figura 4.82 - Canais (amostra 5).....	100
Figura 4.83 - Ferrovia (amostra 5).....	100

Lista de Equações

Equação 3.1.....	25
Equação 3.2.....	26
Equação 3.3.....	27
Equação 3.4.....	29
Equação 3.5.....	29
Equação 3.6.....	29
Equação 3.7.....	30
Equação 3.8.....	30
Equação 3.9.....	35
Equação 3.10.....	36
Equação 3.11.....	36
Equação 3.12.....	36
Equação 3.13.....	36
Equação 4.1.....	40
Equação 4.2.....	40
Equação 4.3.....	41
Equação 4.4.....	46
Equação 4.5.....	48
Equação 4.6.....	50
Equação 4.7.....	51
Equação 4.8.....	52

Equação 4.9.....	52
Equação 4.10.....	53
Equação 4.11.....	53
Equação 4.12.....	58
Equação 4.13.....	60
Equação 4.14.....	60
Equação 4.15.....	62
Equação 4.16.....	63
Equação 4.17.....	63
Equação 4.18.....	64
Equação 4.19.....	65
Equação 4.20.....	65
Equação 4.21.....	66
Equação 4.22.....	74
Equação 4.23.....	80
Equação 4.24.....	81
Equação 4.25.....	82
Equação 4.26.....	84
Equação 4.27.....	84
Equação 4.28.....	85
Equação 4.29.....	88
Equação 4.30.....	90

Capítulo 1

Introdução

A visão permite que os humanos percebam e compreendam o mundo a sua volta. A visão computacional objetiva simular o efeito da visão humana através de dispositivos eletrônicos que percebam e analisem imagens [Sonka93] [Low91].

Um dos problemas mais importantes em visão computacional é o reconhecimento e a separação correta das componentes de uma imagem com um fundo complexo, ou seja, com muitas componentes de diversas formas.

Existe uma grande variedade de métodos de segmentação com finalidades diferentes, como por exemplo: controle de qualidade em uma indústria, sistemas de segurança, robótica, análise médica, etc. No primeiro caso, por exemplo, os métodos de segmentação vão atuar sobre imagens de peças industriais com o objetivo de separá-las para que, posteriormente, possam ser analisadas individualmente. Neste caso, a segmentação faz parte de um sistema maior de análise de imagens.

Uma classe de segmentação vem apresentando bastante interesse aos pesquisadores de visão computacional: a segmentação de mapas e cartas. O interesse por esta área se justifica, entre outros, pelo fato desta segmentação abastecer os bancos de dados geográficos e sistemas logísticos que irão permitir um maior controle estratégico em caso de conflitos, fornecer um método automático de aquisição de dados para sistemas geográficos e hidrográficos, além de permitir a criação de dispositivos eletrônicos que auxiliarão no transporte e navegação [Gor94].

Entre os métodos de segmentação de mapas e cartas, podemos destacar a segmentação de mapas cartográficos [Yam93] [Boatto92] [Mus88] [Suz87] [Suz90] [Yam91] [Kas89] [Gor94] que têm como entrada uma imagem raster ou vetorizada de uma região, numa determinada escala e resolução. O processo de vetorização de uma imagem depende do tipo de mapa e do objetivo da segmentação. Na vetorização, além do

problema de tempo computacional, pode ocorrer perda de informações das componentes da imagem.

Apesar dos diversos trabalhos mencionados anteriormente, faltam aplicações que abordem diretamente a segmentação de cartas náuticas. As cartas náuticas são documentos que descrevem regiões náuticas ou portuárias e são confeccionadas pela marinha de cada país. A grande finalidade de se realizar a segmentação das componentes de uma carta náutica é fornecer dados para bancos de dados geográficos e hidrográficos, além da criação de dispositivos eletrônicos capazes de realizar a navegação a partir da análise de imagens de cartas náuticas [Marques95].

1.1 Objetivo do Trabalho

Este trabalho considera o problema de segmentação de imagens de cartas náuticas confeccionadas pela marinha do Brasil através da sua Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) [Marques95]. Neste caso a segmentação consiste em separar as componentes presentes na imagem, como por exemplo: lagoas, isolinhas, coordenadas e demarcações, canais, caracteres e números, etc. Ao final do processo, teremos as diferentes componentes separadas em imagens específicas.

Inicialmente, as cartas náuticas fornecidas pela Marinha do Brasil são digitalizadas em níveis de cinza e, posteriormente, binarizadas através de um método simples de limiarização. Após este pré-processamento é aplicado um conjunto de funções caracterizando cada uma das diversas componentes.

A teoria da Morfologia Matemática é amplamente utilizada neste trabalho. Como veremos, as funções morfológicas são formadas por um conjunto de duas operações básicas: erosão e dilatação.

A partir da utilização da Morfologia Matemática no processo de segmentação, características tais como forma, espessura, proximidade e extensividade das componentes podem ser consideradas. Como exemplo, podemos citar as coordenadas e demarcações da imagem que têm uma forma completamente diferente de isolinhas. Outro exemplo são os

caracteres e números contendo, naturalmente, tamanho e forma diferentes das lagoas e rios.

1.2 Caracterização do Problema

1.2.1 Segmentação das componentes

Em processamento de Imagens, segmentar consiste em identificar e extrair estruturas homogêneas presentes em uma cena. Estas estruturas podem ser identificadas a partir de características como forma, geometria, topologia, textura, cor ou brilho, sendo escolhidas aquelas que possibilitam melhor distinção. A maior dificuldade normalmente encontrada está no fato de não haver conhecimento *a priori* do número e tipo de estruturas presentes na imagem. Portanto não é possível uma teoria completa sobre segmentação de imagens. A grande maioria das técnicas disponíveis são *ad hoc* e diferem entre si nas propriedades que enfatizam, como contornos e regiões fechadas. Existe um grande número de métodos de segmentação na literatura [Fu81]. O capítulo 2 apresenta uma breve descrição de alguns métodos, seguida de considerações sobre o seu emprego na segmentação das componentes de mapas e cartas.

1.2.2 Segmentação das componentes de cartas náuticas por Morfologia Matemática

A teoria da Morfologia Matemática foi desenvolvida na década de 60 por dois pesquisadores da Escola de Minas de Paris, Georges Matheron e Jean Serra, com a finalidade de analisar imagens microscópicas de amostras de rochas e metais, e associar os resultados às propriedades físicas dos materiais [Banon94]. Através dela é possível extrair informações de imagens, a partir de transformações de formas, considerando-se dois operadores ou transformações elementares denominados erosão e dilatação. Um livro clássico na área é o "*Image Analysis and Mathematical Morphology*" [Serra82], escrito por Jean Serra. A Morfologia Matemática será introduzida brevemente no capítulo 3 deste trabalho.

Morfologia Matemática pode ser utilizada sobre imagens em níveis de cinza ou imagens binárias. Neste trabalho, consideramos essencialmente imagens binárias [Serra82] [Banon94]. As transformações produzidas nessas imagens dependem de padrões predefinidos, denominados elementos estruturantes, que as sondam localmente. Como veremos, as dilatações expandem enquanto as erosões reduzem os objetos da imagem. Através destas duas operações, são criadas outras operações morfológicas como: abertura, fechamento, transformação em tudo ou nada ("*Hit-Miss transformation*"), etc.

Baseado nestas operações, procuramos definir, no capítulo 4 deste trabalho, um conjunto de funções morfológicas capazes de extrair inúmeras componentes de uma carta náutica. Consideramos, ainda, conceitos de transformações geodésicas nos problemas de preservação de conexidade das componentes.

As funções de segmentação das componentes gráficas e textuais da carta foram desenvolvidas para imagens numa escala de 1:50000 e resolução de 300 dpi. Entre as funções desenvolvidas, podemos citar "*isolinhas*" para segmentar as isolinhas, "*caracteres*" para segmentar os números e caracteres das cartas náuticas, "*coord*" para segmentar as coordenadas e demarcações de um mapa, e "*ferrovia*" para segmentar estradas de ferro. Todas estas funções foram testadas em um conjunto de amostras de cartas náuticas gentilmente cedidas pela Marinha do Brasil.

1.3 Implementação

Inicialmente, amostras de cartas náuticas são digitalizadas, numa resolução de 300 dpi e dentro de certas condições fixas, tais como taxa de brilho e contraste de 23% e 60%, respectivamente. O resultado desta digitalização será uma imagem em níveis de cinza (Figura 1.1). O processo seguinte consiste da binarização da imagem digital.

Devido às características da imagem, a binarização é feita de maneira bastante simples. Inicialmente aplicamos um filtro de média 3 x 3 para eliminar pequenos ruídos nas arestas das componentes da imagem e tornar as regiões mais uniformes. Em seguida, limiarizamos a imagem por um processo manual utilizando um limiar global. Este limiar deve ser escolhido de tal forma que componentes como rios, lagos e praias fiquem

complemente pretas e simplesmente conexas (preenchidas). A Figura 1.2 mostra a imagem da Figura 1.1 binarizada.

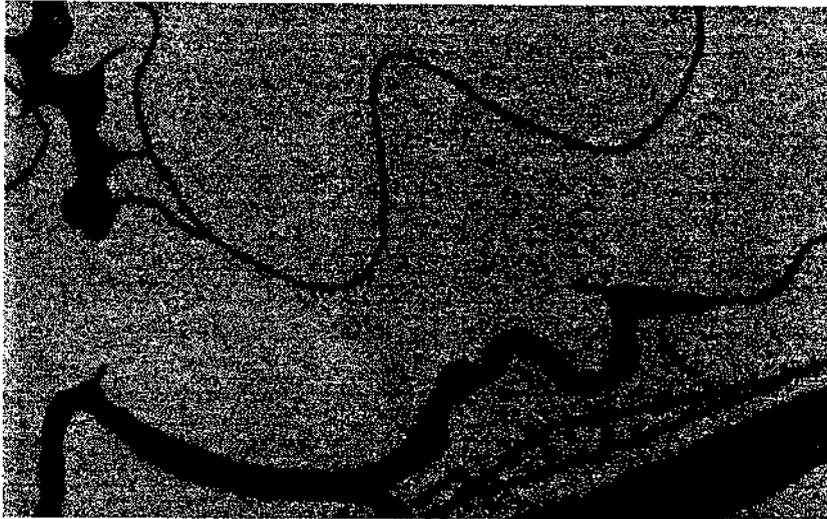


Figura 1.1 - Exemplo de uma imagem em níveis de cinza digitalizada com taxas de brilho e contraste de 23% e 60% respectivamente.



Figura 1.2 - Imagem da Figura 1.1 binarizada

A partir deste ponto, podemos realizar a segmentação das componentes da imagem. Para isto, desenvolvemos uma biblioteca de classes e funções em C++ que implementa todas as transformações morfológicas descritas no trabalho.

A cadeia geral de processamento relativa à segmentação pode ser representada pela Figura 1.3.

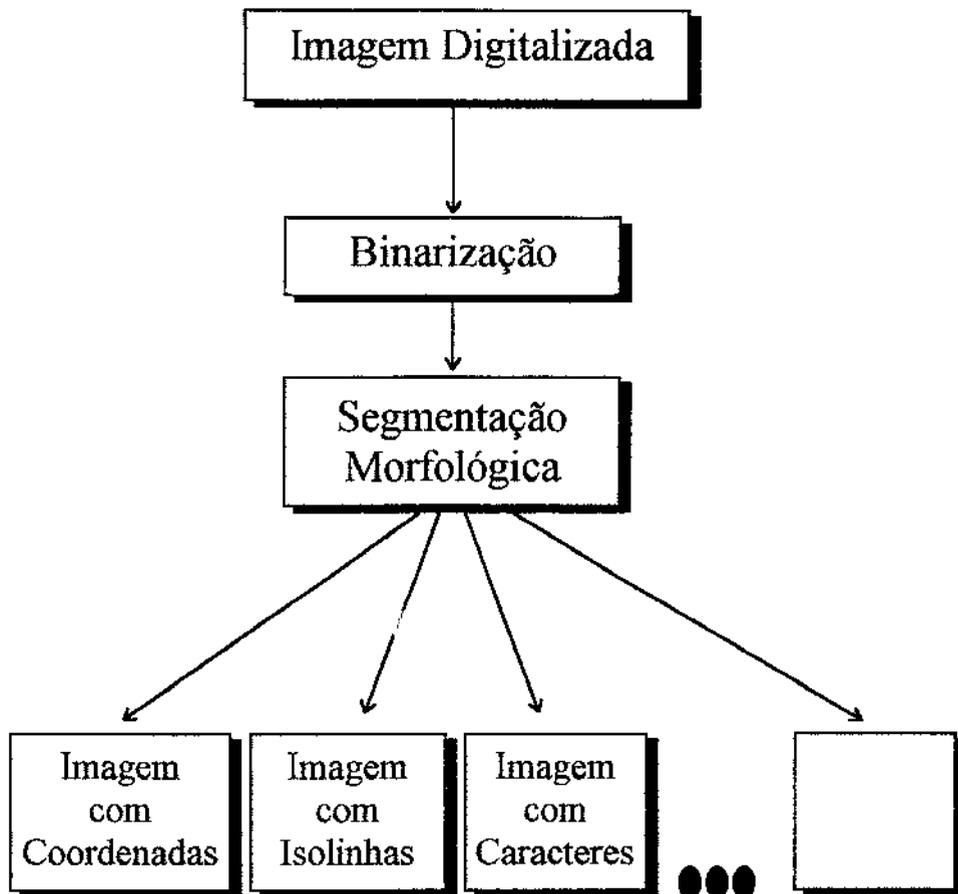


Figura 1.3 - Cadeia de processamento da segmentação de cartas náuticas.

1.4 Aplicações

As imagens resultantes da segmentação podem ser armazenadas em bancos de dados geográficos ou hidrográficos. Um dos objetivos, a longo prazo, das pesquisas em processamento de documentos é tornar a tarefa de segmentação de mapas e cartas, mais automática e segura, sem as falhas naturais oriundas do trabalho manual.

Como, de um modo geral, os sistemas de análise de imagens necessitam de um módulo de segmentação e reconhecimento das suas componentes, uma aplicação direta das funções ilustradas neste trabalho pode ser no desenvolvimento de um sistema de carta náutica eletrônico. Este sistema deve ser capaz de analisar imagens de cartas náuticas e gerar, como saída, dados que auxiliem na navegação [Marques95].

1.5 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma. O capítulo 2 apresenta uma breve descrição de alguns métodos de segmentação cartográfica. O capítulo 3 introduz alguns conceitos da teoria da Morfologia Matemática. O capítulo 4 apresenta um conjunto de funções morfológicas capazes de extrair inúmeras componentes de cartas náuticas na escala de 1:50000 e resolução de 300 dpi. Finalmente, a conclusão é apresentada no capítulo 5.

Capítulo 2

Métodos de Segmentação Cartográfica

2.1 Introdução

Uma definição dada por Pavlidis [Pav77] para segmentação é a seguinte: dada uma característica de uniformidade, segmentação é o particionamento da imagem em subconjuntos conexos, tal que cada subconjunto é uniforme e nenhuma união de subconjuntos adjacentes é uniforme.

A segmentação pode ser classificada, de um modo geral, em segmentação global, segmentação por contornos e segmentação por regiões. Pode ser subdividida, ainda, em segmentação parcial e segmentação completa. Neste caso, a segmentação completa indica que as regiões segmentadas correspondem unicamente aos objetos presentes na imagem, enquanto que na segmentação parcial, as regiões não correspondem inicialmente aos objetos da imagem. Na segmentação parcial o objetivo é dividir uma imagem em regiões homogêneas em relação a alguma propriedade como, por exemplo, luminância. Na segmentação completa é necessário um conhecimento específico do domínio do problema. [Sonka93].

Uma situação bastante comum é utilizar o resultado de uma segmentação parcial como entrada para um processo de segmentação completa. Por exemplo, uma imagem de cromossomos pode ser segmentada por um processo de limiarização, pontos escuros pertencerão provavelmente aos cromossomos e pontos claros, ao fundo da imagem. Realizada esta segmentação parcial, podemos aplicar um processo de segmentação completa para separar cromossomos individuais, de diferentes tipos, baseado em conceitos como conectividade, tamanho, espessura, proximidade e critérios de forma.

As seções seguintes apresentam alguns aspectos relacionados com as diferentes abordagens, no processo de segmentação, seguidos da descrição de alguns métodos de segmentação cartográfica.

2.2 Representação Raster e Representação Vetorial

Em relação ao armazenamento, análise e visualização da informação, dois tipos básicos de representação de dados espaciais podem ser utilizados na segmentação de mapas e cartas: a representação vetorial e a representação raster. Na representação raster levamos em conta a forma e o tamanho das componentes da imagem. Nesta representação, a localização x-y na imagem corresponde à localização espacial do ponto da respectiva componente (ou característica). Na representação vetorial, trabalhamos com um conjunto de vetores ou segmentos criados a partir da imagem original [yam93] [Boatto92]. Nesta representação os objetos são definidos por pontos, linhas ou regiões (polígonos) [Kas89]. Por exemplo, cidades são representadas por pontos; estradas e rios por linhas; grandes lagos e praias por regiões. Ambas as representações apresentam vantagens e desvantagens, algumas delas mencionadas na tabela abaixo [Yam93] [Boatto92] :

<u>Raster</u>	<u>Vetorial</u>
<ul style="list-style-type: none"> • É difícil detectar elementos que sofreram rotação. • É conveniente para manipulação de componentes do tipo região. • O processamento de dados raster é lento, a não ser que seja utilizada uma arquitetura paralela. • É conveniente para a manipulação de imagens complexas. 	<ul style="list-style-type: none"> • É simples detectar elementos que sofreram rotação. • É conveniente para a manipulação de componentes do tipo linha. • Necessita de pouco espaço para armazenamento pois são armazenados apenas vetores. • Não é conveniente para a manipulação de imagens complexas pois o número de vetores gerados é muito grande, o que aumenta a carga computacional.

2.3 Segmentação Automática e Semi-automática

A segmentação semi-automática, ao contrário da automática, necessita da intervenção do operador para resolver divergências e apontar novas direções a serem tomadas no processo de segmentação [Varella92]. As técnicas de segmentação semi-automáticas são, assim, mais simples, pois contam com o conhecimento do operador para resolver certas situações conflitantes. As técnicas de segmentação automática apresentam uma complexidade maior, pois são baseadas exclusivamente nas informações presentes na imagem original.

2.4 Segmentação Seqüencial e Segmentação Paralela

Sob o ponto de vista da implementação, a segmentação pode ser seqüencial ou paralela. Na segmentação seqüencial, o processamento de um ponto da imagem depende do resultado dos pontos vizinhos, transformados numa etapa anterior.

Na segmentação paralela o mesmo procedimento é executado, em paralelo, sobre todos os pixels, baseado no seu estado e no estado atual dos pixels na sua vizinhança.

A segmentação seqüencial tem uma grande vantagem em relação aos métodos paralelos (demandando arquiteturas específicas) que é o baixo custo dos sistemas atuais de computação seqüencial.

2.5 Alguns Métodos de Segmentação Cartográfica

Nesta seção discutiremos alguns métodos utilizados na segmentação de mapas cartográficos.

Os métodos mais comumente utilizados realizam a vetorização da imagem e posteriormente associam estes vetores a uma estrutura de dados como, por exemplo, grafos, tabelas de segmentos e listas encadeadas. Através da análise do conteúdo destas estruturas de dados é possível identificar determinadas componentes.

Verificamos que vários métodos de segmentação utilizam heurísticas no reconhecimento das componentes como, por exemplo, na extração de prédios e contornos

[Mus88][Suz87]. Como veremos, estas heurísticas são definidas baseadas nas regras de construção de determinados tipos de mapa.

2.5.1 Limiarização

O processo de limiarização é considerado um método de segmentação parcial, sendo utilizado em diversos trabalhos de segmentação de mapas. Entretanto, muitas vezes isto não é citado nos trabalhos, pois a segmentação por limiarização é feita frequentemente pelo próprio software que gerencia o digitalizador de imagens.

A limiarização consiste em segmentar as imagens em dois tipos de características: uma representando o fundo da imagem e outra, a forma dos seus objetos. Na limiarização binária, os pixels dos objetos com um nível de cinza menor do que um certo limiar são transformados em um único nível de cinza, e os pixels dos objetos, com um nível de cinza maior que este limiar, são transformados em um outro nível de cinza. Uma imagem pode ter vários limiares, representando um processo multimodal, onde um nível de cinza é associado a cada intervalo entre dois limiares.

O processo de limiarização pode ser considerado, por exemplo, a partir do histograma da imagem em níveis de cinza [Ros82] [Sonka93]. O histograma deve apresentar picos correspondendo aos intervalos de níveis de cinza dos objetos da imagem. Caso o histograma seja bimodal, ou seja, só tenha dois picos, um dos picos deve representar o fundo e o outro, os objetos da imagem.

Neste caso, o processo de limiarização corresponde à escolha de um limiar no vale formado entre os dois picos. Com o limiar escolhido, a limiarização, resultando numa binarização da imagem, equivale a atribuir branco a todos os pixels abaixo do limiar e preto aos pixels acima do limiar, ou vice-versa.

Algumas vezes o histograma não é bimodal, podendo apresentar só um pico, no caso de imagens com poucos objetos pequenos, ou apresentar mais de dois picos se as condições de iluminação durante a digitalização não forem boas, ou se as imagens foram capturadas por sensores não calibrados corretamente, por exemplo. Nestes casos, uma técnica bastante utilizada é a limiarização variável, que consiste na divisão da imagem em blocos e na aplicação do processo de limiarização descrito acima, a cada bloco da imagem.

No caso de não se obter um limiar em um determinado bloco, podemos executar uma interpolação dos blocos vizinhos visando uma melhor definição deste [Ros82] [Sonka93].

2.5.2 Segmentação Utilizando Grafos

Alguns sistemas de segmentação cartográfica utilizam uma representação em grafos da informação. A principal vantagem dos grafos é o fato deles fornecerem uma descrição formal da topologia e da métrica da imagem.

A utilização de grafos no processo de segmentação apresenta uma série de vantagens e algumas desvantagens. As principais vantagens são [Boatto92]:

- É simples detectar elementos que sofreram rotação, tarefa difícil em imagens raster.
- Facilita a edição da imagem por um operador, no caso de sistemas semi-automáticos.
- É fácil detectar elementos básicos da imagem como, por exemplo, segmentos de linha, símbolos e padrões de sombreamento, reconhecendo padrões correspondentes no grafo.

Uma desvantagem é:

- Caso o mapa seja bastante denso, com muitos pontos de cruzamento, o grafo gerado será complexo e de difícil utilização.

2.5.2.1 Um Exemplo de Utilização de Grafos na Segmentação de Mapas

Nesta seção, descrevemos um exemplo da utilização de grafos para a segmentação de mapas cadastrais italianos (Figura 2.1). Os mapas cadastrais descrevem a geometria de propriedades de terra e prédios em um contexto geográfico. Eles dividem o território em polígonos representando um terreno, um prédio, uma rua ou uma lagoa. De um modo geral, a escala de mapas cadastrais pode variar de 1:500 a 1:5000. As componentes em um

mapa cadastral são representadas por linhas, linhas pontilhadas, padrões sombreados, símbolos e caracteres [Boatto92].

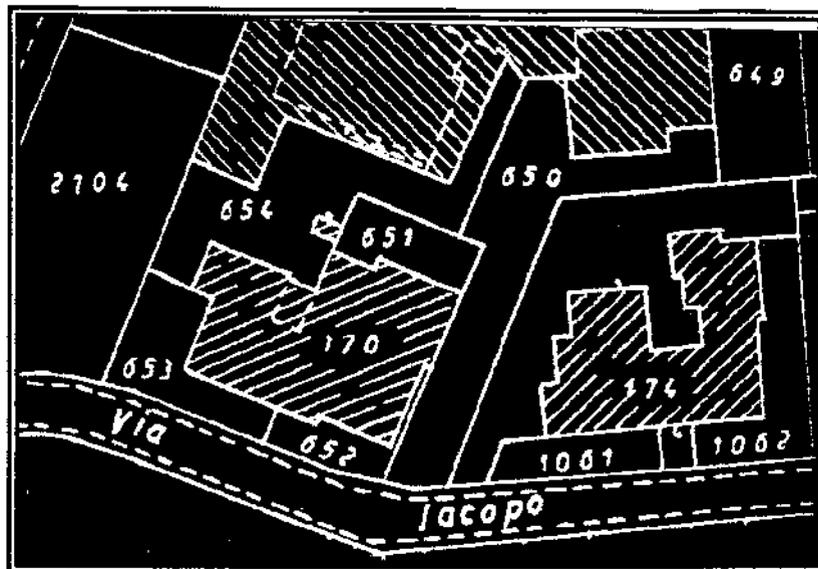


Figura 2.1 - Exemplo de um mapa cadastral italiano

Inicialmente, o mapa cadastral é digitalizado, limiarizado e, posteriormente, é obtida sua representação em forma de grafos. Para isto, a estrutura de linhas da imagem é decomposta em nós e arestas que formalizam as noções intuitivas de pontos de cruzamento e linhas. A seguir, cada elemento do grafo é classificado como pertencente a uma das seguintes categorias:

- Linhas Contínuas
- Linhas Pontilhadas
- Símbolos e Caracteres
- Padrões Sombreados

Finalmente, o sistema estabelece relações espaciais e semânticas entre entidades geométricas, e reconhece entidades de alto nível como parcelas, lagoas e estradas. Alguns exemplos de extração destas componentes são dados a seguir.

Reconhecimento de padrões sombreados

Áreas correspondendo a prédios, nos mapas cadastrais, são sombreadas com linhas paralelas quebradas, separadas umas das outras de 0.5 a 0.7 mm, e formando um ângulo de 45° com o **perímetro** (Figura 2.2). Para se detectar estas áreas, o sistema procura no grafo por subgrafos pertencentes a prédios. Por exemplo, um conjunto de arestas colineares ligadas a outras arestas que, por sua vez, não têm ligação com nenhuma outra componente, identifica uma linha hachurada pertencente a um prédio. A partir desta informação são definidas heurísticas para percorrer o perímetro associado à componente prédio.

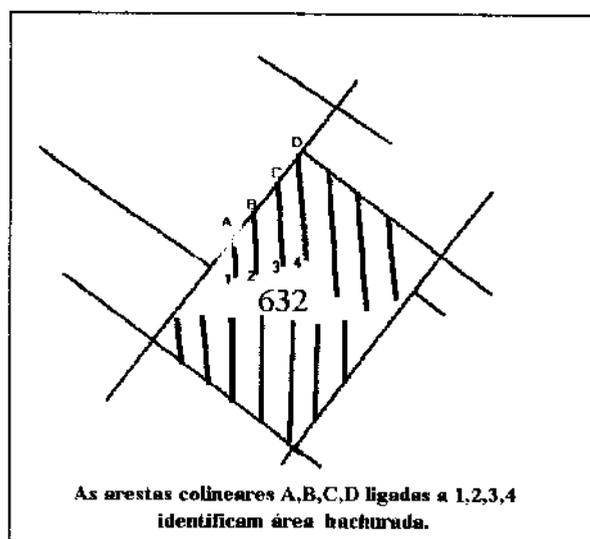


Figura 2. 2 - Exemplo de representação de um prédio e do método utilizado no seu reconhecimento.

Extração de linhas contínuas e vetorização

Um algoritmo de rotulação é utilizado para identificar componentes tais como linha ou sinal (símbolos) baseado no seu raio (distância máxima dos pixels em relação ao centróide da componente). Este processo de classificação identifica tracejados e símbolos

isolados. O sistema faz, então, uma busca sobre componentes do tipo linha com o objetivo de extrair símbolos sobrepondo linhas. Para identificá-los, ele procura pequenas arestas com um nó terminal (ou seja, não conectadas a outras arestas). Localizados os símbolos, o sistema muda o rótulo destas componentes para sinal. As componentes restantes são rotuladas como linha a serem vetorizadas posteriormente.

Extração de linhas tracejadas

Linhas tracejadas são identificadas no conjunto das componentes rotuladas como sinais, através da análise de propriedades geométricas e reconhecimento de padrões típicos, no grafo da imagem (exemplo: nó-aresta-nó). É verificado também o espaçamento entre os itens, que não deve ser maior que um determinado valor T_d , e o ângulo entre os itens (não superior a um limiar T_a).

Reconhecimento de símbolos

Os símbolos e caracteres em [Boatto92] são extraídos de acordo com suas propriedades geométricas. Mais genericamente, cada classe de símbolos tem um conjunto de requisitos caracterizando uma forma qualquer associada, por sua vez, a uma determinada classe.

Muitos caracteres extraídos de um mapa fazem parte de uma “string”. Em tais casos, o contexto fornece informações úteis sobre orientação, tamanho e sintaxe. Estas informações podem ser utilizadas, ainda, para resolver problemas de ambigüidade na identificação dos caracteres. De um modo geral, o sistema utiliza critérios de proximidade e colinearidade para identificar “strings”.

Reconhecimento de parcelas, lagoas e estradas

Os dados obtidos nas etapas anteriores, associados a múltiplas gerações de grafos e a algumas heurísticas, são considerados no reconhecimento destas componentes. Descreveremos aqui, como exemplo, o reconhecimento de parcelas.

Parcelas são um conjunto de polígonos adjacentes representando terra ou prédios que pertencem a um mesmo dono (Figura 2.3). Dois polígonos pertencem a uma mesma parcela se um til (~) é desenhado sobre a aresta comum a estes polígonos.

O primeiro passo para o reconhecimento de parcelas é reconhecer todos os ciclos menores do grafo (os polígonos são identificados desta forma). A seguir, um novo grafo é construído em que os polígonos são os nós; as arestas são criadas entre estes nós se os polígonos correspondentes estão conectados por um til. As componentes conectadas deste segundo grafo representam as parcelas.

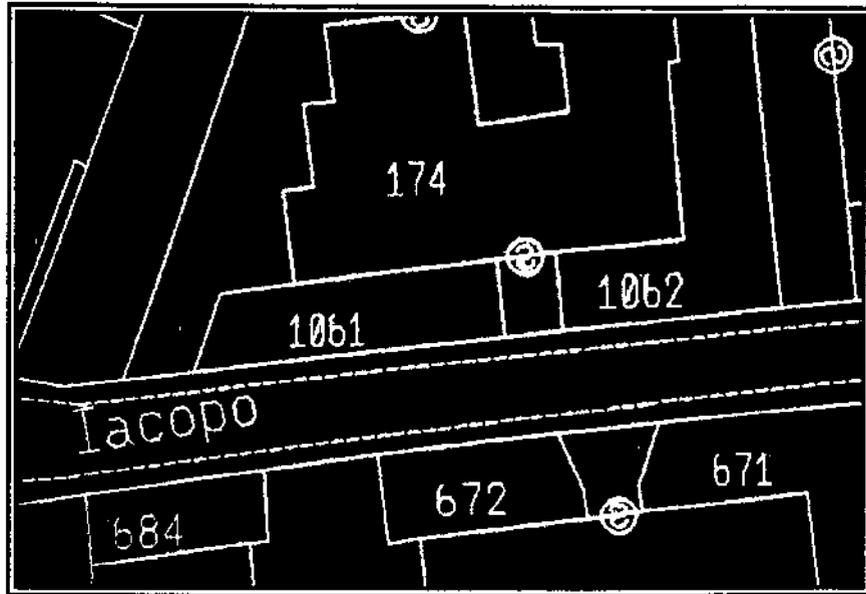


Figura 2.3 - Exemplo de parcelas

Como mencionado acima, é possível reconhecer componentes complexas em um mapa, através de um procedimento simples que considera múltipla geração de grafos. Esta técnica consiste na geração de um novo grafo, no qual os nós são as componentes reconhecidas na etapa anterior e as arestas são as ligações entre as componentes.

2.5.3 Segmentação Utilizando o Sistema MARIS

2.5.3.1 Introdução

O sistema MARIS ("Map Recognition Input System") [Suz90] é um sistema que extrai componentes tais como prédios, linhas de contorno, estradas, entre outras, a partir de mapas topográficos de escala reduzida do Japão (Figura 2.4). Para tanto é necessário realizar a vetorização da imagem digitalizada e binarizada do mapa, e aplicar os algoritmos de **Traçamento de bordas e Rastreamento de linhas contínuas**.

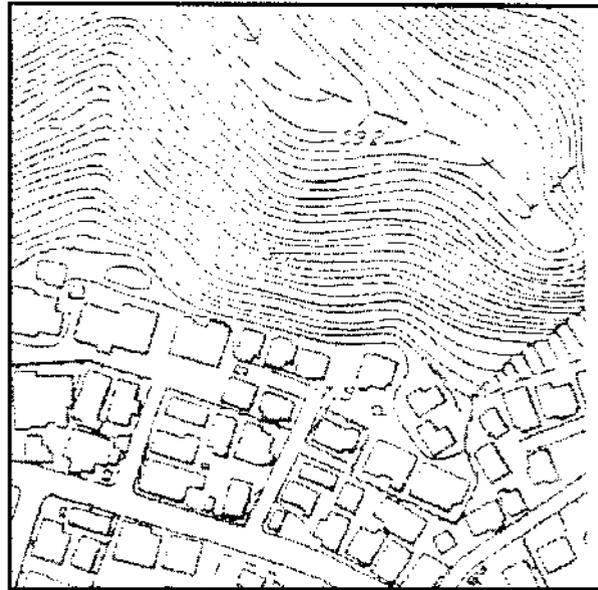


Figura 2.4 - Exemplo de um mapa topográfico de escala reduzida do Japão.

2.5.3.2 Vetorização

Nesta etapa inicial, todos os pixels da imagem são rotulados de acordo com a espessura das linhas passando por eles. A seguir é executado um afinamento sobre a imagem com o objetivo de gerar sua linha média. A partir da linha média é gerado um grafo. Arestas desnecessárias à preservação da topologia da linha média são deletadas e, baseados nesta representação, são extraídos os pontos característicos, definidos por nós com grau diferente de dois (Figura 2.5).

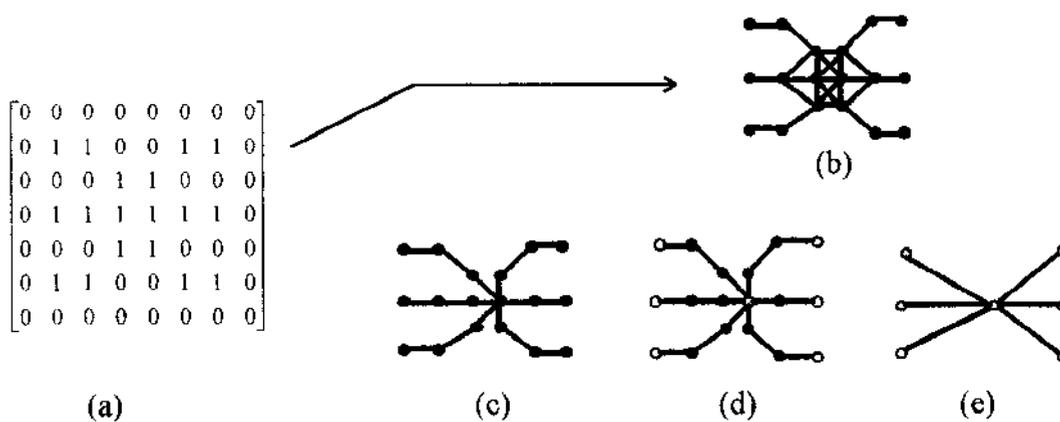
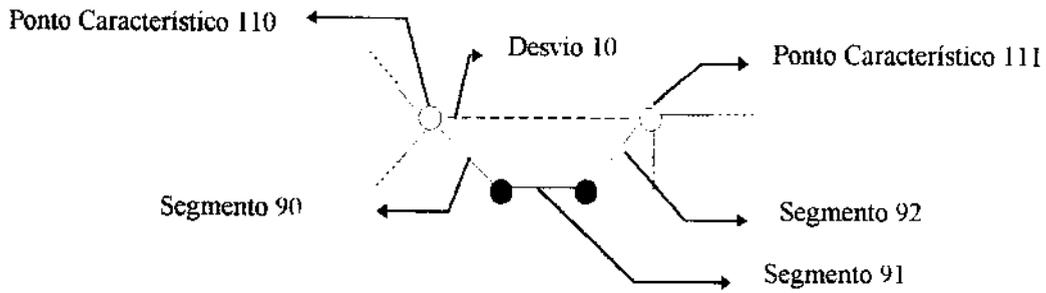


Figura 2.5 - Exemplo de vetorização de uma componente a partir da sua linha média: (a) linha média, (b) grafo gerado a partir da linha média, (c) arestas desnecessárias a preservação da topologia são deletadas, (d) e (e) pontos característicos são extraídos.

A partir da vetorização, são criadas as tabelas de segmentos, desvios e pontos característicos (Figura 2.6). Desvios são curvas entre dois pontos característicos e segmentos são arestas ligando nós pertencentes à linha média.



(a) vetores

Nome do Desvio	Ponto característico Inicial	Ponto Característico Final	Segmento Inicial	Segmento Final
10	110	111	90	92
.....

(b) Tabela de desvios

Coordenadas		Desvios na vizinhança 8-conectada							
X	Y	1	2	3	4	5	6	7	8
10	50	0	9	0	10	0	0	0	8
40	50	0	10	11	0	12	0	0	0
...

(c) Tabela de pontos característicos

Coordenada do nó inicial		Coordenada do nó final		Desvio contendo o segmento	largura
X	Y	X	Y		
10	50	20	60	10	1
20	60	30	60	10	1
30	60	40	50	10	1
...

(d) Tabela de segmentos

Figura 2. 6 - Exemplo de tabelas geradas pela vetorização

2.5.3.3 Traçamento de Bordas

Este algoritmo traça uma borda entre as linhas médias das componentes e o fundo da imagem. Esta borda é formada por um conjunto de desvios dirigidos (Figura 2.7) que contornam ("hole border") ou são contornados por uma região ("outer border"). Para isto, utiliza-se a tabela de desvios e a tabela de pontos característicos.

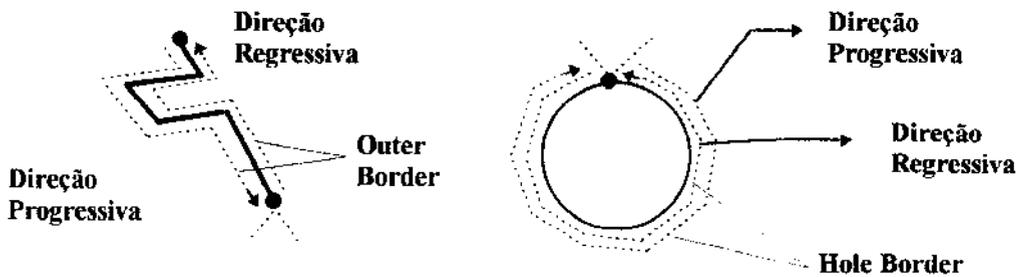


Figura 2. 7 - Direções de um desvio

A Figura 2.8 ilustra o algoritmo. No exemplo, o desvio D1 e sua direção progressiva são utilizados como ponto de partida. Uma "Outer Border" é traçada no sentido anti-horário, na direção progressiva do desvio D1 (1), direção progressiva do desvio D2 (2) e direção regressiva do desvio D1 (3). A seguir, como ambas as direções do desvio D1 já foram traçadas, o desvio D2 e sua direção regressiva são utilizados como ponto de partida no traçamento da "Hole Border". Assim, um "Hole Border" é traçado no sentido horário, na direção regressiva do desvio D2 (4), direção progressiva do desvio D3 (5) e direção regressiva do desvio D3 (6). O algoritmo de traçamento de bordas é concluído a partir do instante em que todos os desvios têm suas direções traçadas.

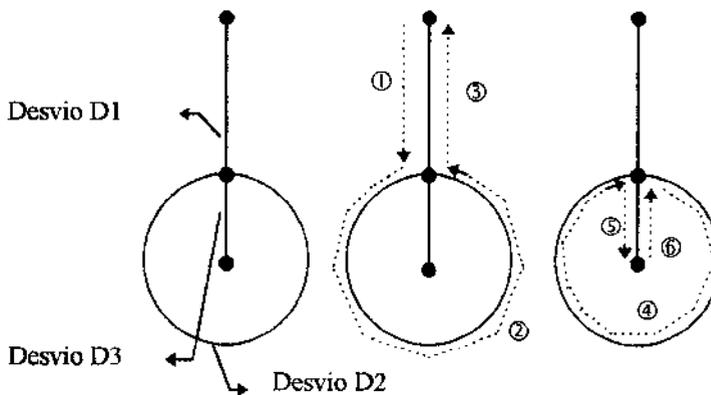


Figura 2. 8 - Exemplo do funcionamento do algoritmo traçamento de bordas.

2.5.3.4 Rastreamento de linhas contínuas

Este algoritmo extrai linhas longas com pequena curvatura e espessura de linha constante utilizando basicamente a tabela de segmentos (Figura 2.6 (d)) definida durante a vetorização, produzindo uma cadeia de segmentos para uma linha longa contínua.

Suponha que tenhamos um segmento inicial com um rótulo de espessura de linha L e o ponto de partida (i,j) relativo a um dos dois nós do segmento. Inicialmente, o segmento de partida e um outro nó (p,q) são relacionados como segmento corrente e ponto corrente. Este algoritmo rastreia segmentos de rótulo maior que $L-1$ até que uma das condições mostradas na Figura 2.9 se verifique. Num ponto de desvio, o segmento mais contínuo é selecionado como o próximo segmento a ser rastreado.

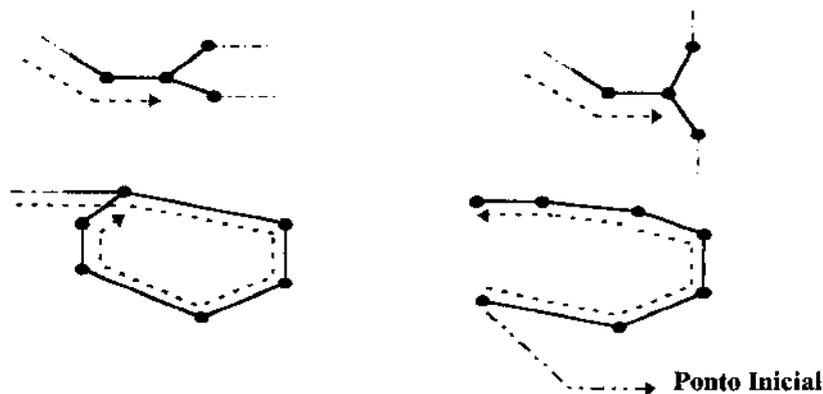


Figura 2. 9 - Condições de parada do algoritmo de rastreamento de linhas contínuas

Uma vez que o comprimento horizontal da linha rastreada seja maior que um dado limiar $T1$ ou o comprimento vertical seja maior que um dado limiar $T2$, o rastreamento é interrompido e a linha é reconhecida como uma linha longa contínua:

2.5.3.5 Extração de Prédios

Um prédio é representado por sua linha de contorno. Nos mapas de escala reduzida do Japão, prédios são representados por bordas fechadas com dois tipos de espessura de linha (Figura 2.10). Para extrair os prédios é necessário extrair todas as "Hole Borders". A seguir, cada "Hole Border" é examinada para verificar se ela realmente pertence a um prédio, através da checagem de algumas características, como comprimento (P), área (A) e dispersão (A/P^2).

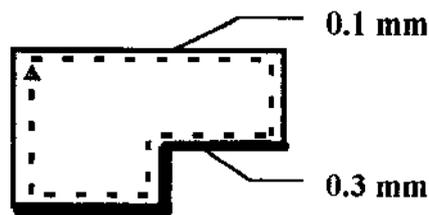


Figura 2. 10 - Exemplo da extração de um prédio de um mapa topográfico japonês.

2.5.3.6 Estrada de ferro, linhas de contorno, estrada e lagoas

Neste estágio são extraídas linhas que fazem parte de uma destas componentes. As componentes são compostas principalmente de linhas longas com pequenas curvaturas e espessura de linha constante. Portanto, a linha longa contínua procurada, tendo espessura W , é extraída inicialmente utilizando o algoritmo de rastreamento de linhas, considerando um limiar de comprimento $T > 0$ e limiar de espessura $L=W$. Caso a linha extraída não esteja conexa, ela pode ser estendida nos seus pontos final e inicial utilizando o algoritmo de rastreamento de linhas com $T=0$ e $L=W$.

2.5.3.7 Extração de Isolinhas

Neste estágio, as isolinhas (Figura 2.4) são extraídas das linhas contínuas obtidas no estágio anterior. As isolinhas de um mapa do Japão têm 2 espessuras de linha: as de 2m têm 0.1 mm de espessura e as de 10m têm 0.2 mm de espessura.

Normalmente, estes dois tipos de isolinhas são periódicos, isto é, quatro isolinhas de 2m estão entre duas isolinhas de 10m, portanto elas podem ser reconhecidas por estas propriedades. Inicialmente, isolinhas com 0.1 mm de espessura são identificadas como candidatas a isolinhas de 2m, e as isolinhas com espessura de 0.2 mm são identificadas como candidatas a isolinhas de 10m. Elas são examinadas para verificar se satisfazem a periodicidade citada anteriormente. As candidatas tendo uma probabilidade maior que um dado limiar são reconhecidas como isolinhas de 2m e 10m.

2.5.4 Morfologia Matemática e Segmentação Cartográfica

Neste trabalho, nós consideraremos a Morfologia Matemática, mais precisamente os conceitos de Morfologia direcional [Kurdy89] [Yam91] [Yam93], na segmentação de mapas topográficos. De modo geral, a morfologia direcional combina informações extraídas da imagem, a partir de elementos estruturantes definidos e várias direções do plano. Os subconjuntos dessas informações podem ser combinados visando a caracterização de forma e tamanho das componentes da imagem.

Este trabalho está relacionado com a abordagem apresentada em [Yam91] [Yam93] na segmentação de mapas topográficos japoneses.

No nosso caso, todas as considerações serão feitas à luz da teoria morfológica, sem a introdução direta de outros conceitos empregados pelos autores em [Yam91] [Yam93], tais como a noção de planos direcionais, o que demonstra o caráter geral da Morfologia Matemática, neste tipo de aplicação.

Capítulo 3

Morfologia Matemática

A Morfologia Matemática [Heij92] [Serra82] é a base deste trabalho. As operações morfológicas fornecem um método de processamento de imagens baseado nas formas dos objetos presentes nestas imagens e têm sido utilizadas em praticamente todas as sub-áreas de processamento de imagens, bem como em outras áreas, tais como Matemática, Geologia e Física. Este trabalho ilustra a utilização da teoria morfológica em aplicações de segmentação de imagens.

3.1 O que é Morfologia Matemática ?

Nos anos 60, dois pesquisadores da Escola de Minas de Paris , Geogers Matheron e Jean Serra, trabalharam em um conjunto de problemas envolvendo mineralogia e petrografia. O objetivo do trabalho era caracterizar propriedades físicas de certos materiais. Suas investigações levaram a um novo método quantitativo de análise de imagens , conhecido atualmente como Morfologia Matemática [Heij92] [Serra82].

A idéia central da Morfologia Matemática é examinar a estrutura geométrica de uma imagem, casando-a com pequenos padrões em várias localizações. Variando o tamanho e a forma dos padrões, denominados elementos estruturantes, pode-se obter informações úteis sobre a forma de diferentes partes da imagem, bem como do relacionamento entre estas partes.

Originalmente, a teoria foi desenvolvida para imagens binárias e, posteriormente, foi estendida a imagens em níveis de cinza [Heij92] [Serra82] [Banon94]. A Morfologia Matemática para imagens binárias, tipo de imagem utilizada neste trabalho, apresenta uma característica fundamental que é o fato de poder ser associada diretamente à teoria dos conjuntos.

3.2 Transformações Morfológicas

De um modo geral, as transformações morfológicas podem ser classificadas em dois tipos :

1. Transformações clássicas sobre conjuntos : União, Interseção, Complemento, Diferença, Diferença Simétrica.
2. Transformações em Tudo ou Nada (HMT - Hit or Miss Transformation).

3.2.1 Transformações Clássicas

Seja $f(x)$ uma imagem binária discreta, isto é, $\{f(x) \in [0,1] : x \in Z^2\}$, onde Z denota o conjunto dos números inteiros. Esta imagem pode ser representada por um conjunto X dado por $X = \{x \in Z^2 : f(x) = 1\}$.

Sejam duas imagens X e Y . O complemento X^c do conjunto X é $X^c = \{x \in Z^2 : f(x) = 0\}$. A união $X \cup Y$ de X com Y é $Z = \{a \in Z^2 : a \in X \text{ ou } a \in Y\}$. A Interseção $X \cap Y$ de X com Y é $Z = \{a \in Z^2 : a \in X \text{ e } a \in Y\}$. A diferença $X \setminus Y$ de X com Y é definida como $X \cap Y^c$. A diferença simétrica $X - Y$ de X com Y é definida como $(X \cup Y) \cap \overline{(X \cap Y)}$ (Figura 3.1). Denotamos, ainda, a translação X_u de um conjunto X por um vetor u por $X_u = \{z \in Z^2 : z = x + u, x \in X\}$.

3.2.2 Transformações HMT

As transformações morfológicas do tipo “tudo ou nada” ou HMT (“*Hit-Miss Transformation*”) resultam em um novo subconjunto caracterizando a estrutura de um objeto X . Esta informação estrutural é representada por transformações da própria imagem, e a sua medida é o resultado da quantização da transformação final.

Seja um elemento estruturante $B_x = (B_x^1, B_x^2)$, centrado em x (X e constituído de duas fases, B_x^1 e B_x^2 , com mesma origem. A transformação HMT é dada por:

$$\forall x \in Z^2, X \otimes B = \{x \in X: B_x^1 \subset X, B_x^2 \subset X^c\} \quad \text{Eq. 3.1}$$

A partir de um elemento estruturante, podemos definir uma família de configurações, representada por rotações deste em torno do seu elemento central. A Figura 3.1 apresenta um elemento estruturante B_x , 3×3 , e sua família de configurações (rotações de 45°). O asterisco “*” indica que o ponto pode pertencer à fase B_1 ou à fase B_2 .

Informalmente, a transformação HMT é realizada através de uma varredura de um elemento estruturante B , de forma conhecida, sobre uma cena X . Este elemento B é deslocado sobre X de tal forma que sua origem (previamente conhecida) passe por todos os pontos do espaço da cena. Para cada posição da origem B_x de B , em X , é feita uma pergunta relativa à união, interseção ou inclusão de B com X . Os pontos correspondendo a respostas positivas constituem o novo conjunto da imagem transformada.

$$\begin{aligned}
 B_x^0 &= \begin{vmatrix} B_1 & B_1 & B_1 \\ * & B_1 & * \\ B_2 & B_2 & B_2 \end{vmatrix} &
 B_x^1 &= \begin{vmatrix} * & B_1 & B_1 \\ B_2 & B_1 & B_1 \\ B_2 & B_2 & * \end{vmatrix} &
 B_x^2 &= \begin{vmatrix} B_2 & * & B_1 \\ B_2 & B_1 & B_1 \\ B_2 & * & B_1 \end{vmatrix} &
 B_x^3 &= \begin{vmatrix} B_2 & B_2 & * \\ B_2 & B_1 & B_1 \\ * & B_1 & B_1 \end{vmatrix} \\
 \\
 B_x^4 &= \begin{vmatrix} B_2 & B_2 & B_2 \\ * & B_1 & * \\ B_1 & B_1 & B_1 \end{vmatrix} &
 B_x^5 &= \begin{vmatrix} * & B_2 & B_2 \\ B_1 & B_1 & B_2 \\ B_1 & B_1 & * \end{vmatrix} &
 B_x^6 &= \begin{vmatrix} B_1 & * & B_2 \\ B_1 & B_1 & B_2 \\ B_1 & * & B_2 \end{vmatrix} &
 B_x^7 &= \begin{vmatrix} B_1 & B_1 & * \\ B_1 & B_1 & B_2 \\ * & B_2 & B_2 \end{vmatrix}
 \end{aligned}$$

Figura 3.1 - Família de configurações de um elemento estruturante B_x .

3.3 Erosão e Dilatação

As duas operações morfológicas de base são a erosão e a dilatação, derivadas da subtração e adição de Minkowski, respectivamente. A partir dessas operações pode-se definir qualquer operação morfológica mais complexa [Har87].

Dilatação é uma operação que combina dois conjuntos utilizando adição vetorial sobre os elementos desses conjuntos. No caso de imagens binárias, em Z^2 , a dilatação pode ser definida formalmente da seguinte maneira:

Sejam X e B subconjuntos de Z^2

$$X \oplus B = D^B(X) = \{c \in Z^2 | c = x + b, \text{ para todo } x \in X \text{ e } b \in B\} \quad \text{Eq. 3.2}$$

Dilatar uma imagem significa expandí-la. O resultado desta expansão depende de um determinado elemento estruturante B . O elemento estruturante é parte fundamental dos operadores de Morfologia Matemática e é através dele que são especificadas as direções, informação bastante explorada neste trabalho, e o tamanho da dilatação, por exemplo. Em termos de conjuntos, o dilatado $A \oplus B$ contém o conjunto original A . O símbolo \oplus denota a operação de dilatação ilustrada na Figura 3.2.

O sistema de coordenadas utilizado na Figura 3.2 e na Figura 3.3 é (y,x) , onde y corresponde a linha e x à coluna no gráfico.

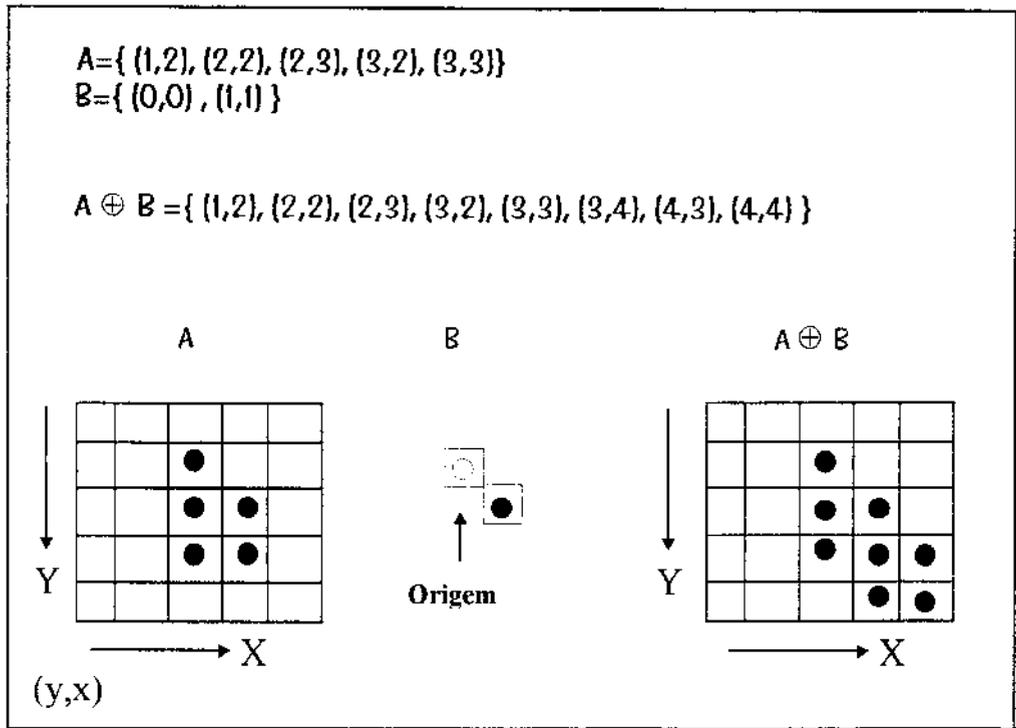


Figura 3.2 - Exemplo de uma operação de dilatação.

Erosão é uma operação que combina dois conjuntos, utilizando subtração vetorial sobre os elementos desses conjuntos. A erosão pode ser definida formalmente, em Z^2 , da seguinte maneira [Har87] :

Sejam X e B subconjuntos de Z^2 ,

$$X \ominus B = E^B(X) = \{ a \in Z^2 \mid a + b \in X, \text{ para todo } b \in B \} \quad Eq. 3.3$$

onde o símbolo \ominus denota a operação de erosão, ilustrada na Figura 3.3.

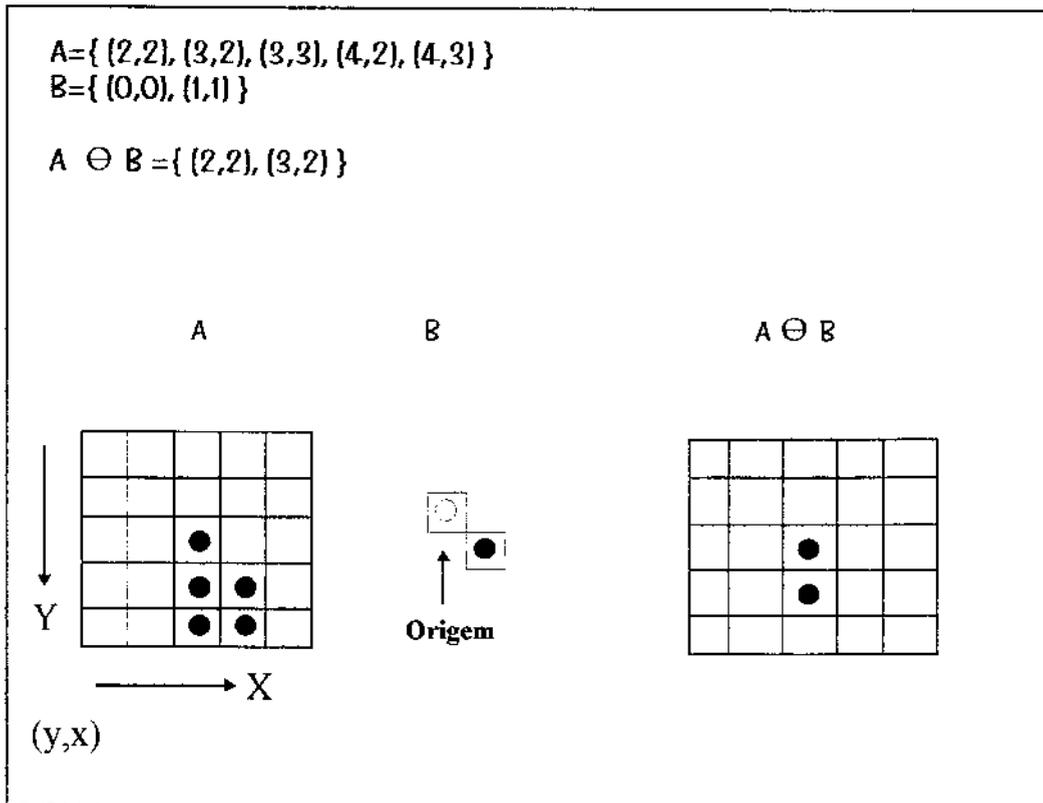


Figura 3.3 - Exemplo de uma operação de erosão.

A erosão pode ser vista como uma contração da imagem original. Em termos de conjuntos, o erodido $A \ominus B$ está contido no conjunto original A .

3.4 Outras Operações Morfológicas

Como exemplos de algumas operações morfológicas, definidas a partir da erosão e dilatação, podemos citar:

- Abertura
- Fechamento
- Afinamento

3.4.1 Abertura e Fechamento

Abertura é uma operação morfológica que tem a propriedade de eliminar partes dos objetos cuja dimensão é inferior à dimensão do elemento estruturante. Geralmente ela suaviza contornos, elimina pequenos istmos, picos e pequenas regiões da imagem. Esta operação pode ser definida formalmente por:

$$X \circ B = O^B(X) = (X \ominus B) \oplus B = D^B(E^B(X)), \quad \text{Eq. 3.4}$$

onde X representa a imagem e B o elemento estruturante.

Fechamento é uma operação morfológica que tem a propriedade de unir objetos cuja distância é inferior à dimensão do elemento estruturante. Geralmente ela preenche espaços entre contornos, funde pequenas linhas quebradas, picos e elimina buracos. Esta operação pode ser definida formalmente por:

$$X \bullet B = F^B(X) = (X \oplus B) \ominus B = E^B(D^B(X)), \quad \text{Eq. 3.5}$$

onde X representa a imagem e B o elemento estruturante.

3.4.2 Afinamento e Espessamento Homotópico

O afinamento e o espessamento são operações homotópicas definidas a partir de uma transformação HMT geral (Eq. 3.1). A operação de afinamento representa uma aproximação, para o caso discreto, do esqueleto definido no espaço euclidiano. Esta operação consiste da supressão de pontos da imagem X , de acordo com um elemento estruturante B , indicando configurações homotópicas na vizinhança de um ponto. Simbolicamente:

$$X \circ B = X \setminus (X \otimes B), \quad \text{Eq. 3.6}$$

onde B representa uma família de configurações homotópicas, representando pontos da imagem que podem ser eliminados sem que a sua conexidade seja alterada. Na prática,

diferentes famílias de elementos estruturantes homotópicos podem ser definidos. Um exemplo é apresentado na Figura 3.4.

O espessamento consiste da adição de pontos à imagem X, de acordo com a configuração de um dado elemento B. Simbolicamente:

$$X \odot B = X \cup (X \otimes B), \text{ Eq. 3.7}$$

O afinamento homotópico de um conjunto X é dado pela aplicação, em paralelo, até a idempotência, da seguinte seqüência de transformações :

$(X \circ B)_\infty = (\dots(((X \circ B) \circ B^1) \circ B^2) \dots \circ B^7)$, onde B^i , $i=0,1,\dots,7$, são elementos estruturantes representando pontos simples da imagem, isto é, pontos cuja remoção não altera nem a conexidade nem o número de componentes conexas de X. Um exemplo destes elementos estruturantes pode ser visto na Figura 3.4.

$$\begin{array}{cccc}
 B^0 = \begin{vmatrix} 0 & * & * \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & * & * \end{vmatrix} &
 B^1 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & * \\ 0 & * & 1 \end{vmatrix} &
 B^2 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ * & 1 & * \\ * & 1 & * \end{vmatrix} &
 B^3 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ * & 1 & 0 \\ 1 & * & 0 \end{vmatrix} \\
 \\
 B^4 = \begin{vmatrix} * & * & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ * & * & 0 \end{vmatrix} &
 B^5 = \begin{vmatrix} 1 & * & 0 \\ * & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} &
 B^6 = \begin{vmatrix} * & 1 & * \\ * & 1 & * \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} &
 B^7 = \begin{vmatrix} 0 & * & 1 \\ 0 & 1 & * \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}
 \end{array}$$

Figura 3.4 - Exemplo de uma família de elementos estruturantes utilizada no afinamento homotópico de uma imagem.

O espessamento de um conjunto X é dado pela aplicação, até a idempotência, da seguinte seqüência de transformações :

$(X \odot B)_\infty = (\dots(((X \odot B^0) \odot B^1) \dots \odot B^j))$, onde B^j , $j=0,1,\dots,7$, são, por exemplo, os elementos estruturantes mostrados na Figura 3.5.

O resultado final da aplicação do espessamento homotópico será um pseudo-envoltório convexo.

As operações de afinamento e espessamento são duais, isto é:

$$X \odot B = (X^c \circ B^c)^c \tag{Eq. 3.8}$$

$$\begin{aligned}
 B^0 &= \begin{vmatrix} 1 & * & * \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & * & * \end{vmatrix} &
 B^1 &= \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & * \\ 1 & * & 0 \end{vmatrix} &
 B^2 &= \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ * & 0 & * \\ * & 0 & * \end{vmatrix} &
 B^3 &= \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ * & 0 & 1 \\ 0 & * & 1 \end{vmatrix} \\
 B^4 &= \begin{vmatrix} * & * & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ * & * & 1 \end{vmatrix} &
 B^5 &= \begin{vmatrix} 0 & * & 1 \\ * & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} &
 B^6 &= \begin{vmatrix} * & 0 & * \\ * & 0 & * \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} &
 B^7 &= \begin{vmatrix} 1 & * & 0 \\ 1 & 0 & * \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}
 \end{aligned}$$

Figura 3.5 - Exemplo de uma família de elementos estruturantes utilizada no espessamento de uma imagem.

O afinamento homotópico utilizando os elementos estruturantes definidos na Figura 3.4 será chamado, neste trabalho, de **Hthin** e o espessamento homotópico utilizando os elementos estruturantes definidos na Figura 3.5, de **Hthick**.

3.5 Algumas Propriedades das Transformações Morfológicas

A seguir, apresentamos algumas propriedades das operações morfológicas. Estas propriedades são úteis a compreensão das funções mais complexas descritas posteriormente.

1) A dilatação é comutativa :

$$X \oplus B = B \oplus X$$

Isto decorre do fato da união ser comutativa e a dilatação ser uma união de conjuntos. A erosão não é comutativa, isto é:

$$X \ominus B \neq B \ominus X$$

2) A dilatação é associativa :

$$X \oplus (B \oplus C) = (X \oplus B) \oplus C$$

Isto decorre do fato da união ser associativa e a dilatação ser uma união de conjuntos. A erosão não é associativa, isto é:

$$X \ominus (B \ominus C) \neq (X \ominus B) \ominus C$$

$$X \ominus (B \oplus C) = (X \ominus B) \ominus C$$

3) A decomposição de um elemento estruturante, numa operação de dilatação, resulta em:

$$X \oplus (B \cup C) = (X \oplus B) \cup (X \oplus C)$$

Assim, uma dilatação com um elemento estruturante de grande dimensão pode ser decomposta em uniões de dilatações com elementos estruturantes menores.

4) A decomposição de um elemento estruturante, numa operação de erosão, resulta em :

$$X \ominus (B \cup C) = (X \ominus B) \cap (X \ominus C)$$

Assim, uma erosão com um elemento estruturante de grande dimensão pode ser decomposta em interseções de erosões com elementos estruturantes menores.

5) A decomposição de um elemento estruturante a partir de uma dilatação, numa operação de erosão, é dada por:

$$X \ominus (B \oplus C) = (X \ominus B) \ominus C$$

6) A decomposição de um elemento estruturante a partir de uma erosão, numa operação de dilatação, é dada por:

$$X \oplus (B \ominus C) \subseteq (X \oplus B) \ominus C$$

7) Dilatação e erosão são operações duais, isto é:

$$(X \oplus B)^c = X^c \ominus B^c$$

8) Abertura e fechamento são transformações idempotentes, ou seja, elas se estabilizam na primeira aplicação da operação. Assim :

$$(X \circ B) \circ B = X \circ B$$

$$(X \bullet B) \bullet B = X \bullet B$$

3.6 Transformações Geodésicas

A finalidade da análise quantitativa de imagens é prover medições (métricas ou topológicas) de imagens [Lan81][Lan84]. Desde que, na prática, estas imagens não são passíveis de uma medição direta, a análise quantitativa de imagens geralmente é realizada através de uma transformação (no sentido de manter somente as informações necessárias à medição subsequente), e de uma quantificação dessa transformação. A imagem em estudo é composta, geralmente, de muitas partículas, das quais desejamos extrair informações individualmente. Um dos objetivos aqui é analisar cada uma destas partículas individualmente. Uma maneira de se restringir o domínio das operações morfológicas de base é através do conceito de transformações geodésicas [Lan81] [Lan84].

3.6.1 Distâncias Geodésicas

Seja a imagem apresentada na Figura 3.6 e os pontos x_1 , x_2 , x_3 das suas componentes. Definimos a distância geodésica $D_X(x_1, x_2)$, entre x_1 e x_2 , como o arco incluído em X , e que corresponde ao menor percurso entre x_1 e x_2 . Caso este arco não exista (a distância geodésica entre x_1 e x_3 , por exemplo), esta distância é considerada infinita, por convenção.

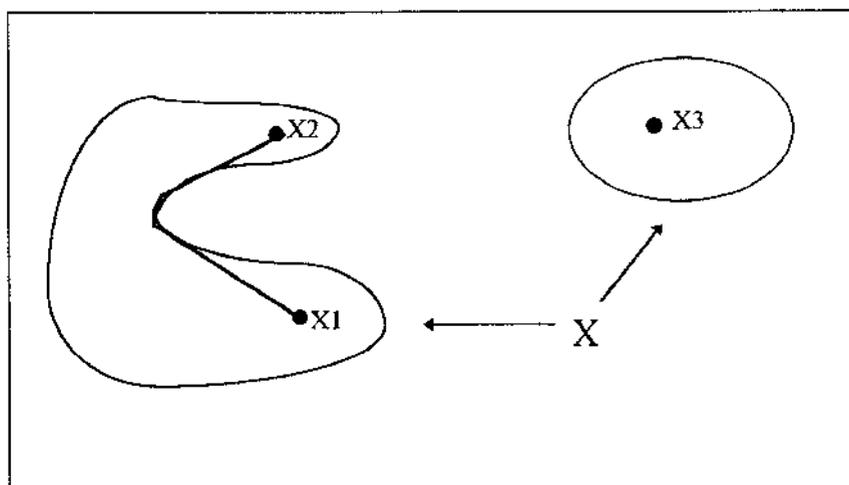


Figura 3.6 - Definição de distância geodésica

Seja o conjunto $B_X(x,R) = \{ y \in X : D_X(x,y) \leq R \}$ de todos os pontos de X cuja distância geodésica até x é menor ou igual a R . Este conjunto é denominado de círculo geodésico de raio R e centro x (Figura 3.7). Observe a diferença entre o círculo geodésico, centrado em x , e o equivalente euclidiano.

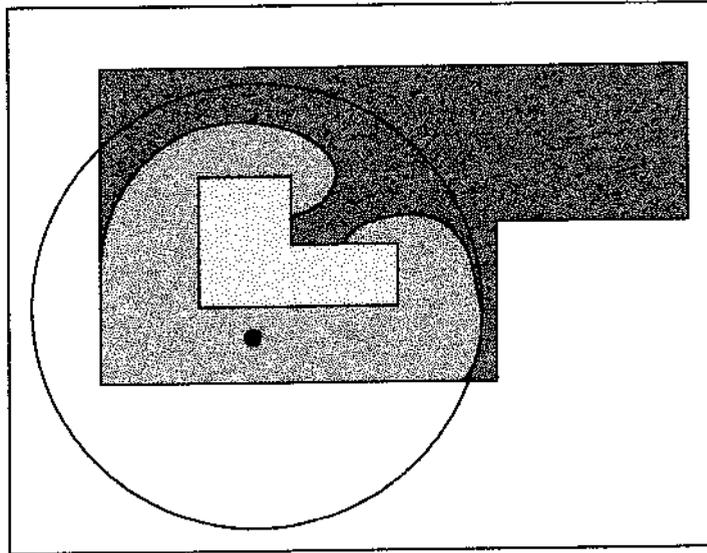


Figura 3.7 - Exemplo de círculo geodésico. A região cinza clara representa o círculo geodésico; o círculo preto representa o círculo euclidiano.

Usando esta métrica, a distância geodésica entre um ponto x ($x \in X$) e um subconjunto Y ($Y \subset X$), $D_X(x,Y)$, é definida como a menor distância geodésica entre x e qualquer ponto y de Y :

$$D_X(x,Y) = \min_{(y \in Y)} D_X(x,y) \quad \text{Eq. 3.9}$$

3.6.2 Erosão e Dilatação Geodésica

Assim, podemos definir todas as transformações morfológicas clássicas (erosão, dilatação, etc.) no espaço métrico geodésico. A Figura 3.8 ilustra a dilatação e a erosão geodésicas.

Se $Y \subset X$, os pontos x de X , tal que $B_X(x,R)$ intercepta Y , constituem o conjunto R -dilatado de Y em X , denotado por:

$$D_X^R(Y) = \{x \in X: B_X(x,R) \cap Y \neq \emptyset\} \quad \text{Eq. 3.10}$$

Y é denominado, geralmente, marcador da função X .

Na prática, a dilatação geodésica de tamanho N , em Z^2 , é feita reiterando-se N vezes uma dilatação geodésica de dimensão 1 (com um elemento estruturante elementar B), restrita ao espaço X , isto é:

$$D_X^1 = (Y \oplus B) \cap X, \quad \text{Eq. 3.11}$$

e assim

$$D_X^N(Y) = \underbrace{D_X^1(D_X^1(\dots D_X^1(Y)\dots))}_{N \text{ vezes}} \quad \text{Eq. 3.12}$$

De forma semelhante, podemos definir o conjunto R -erodido de Y em X como os pontos x de X , tal que $B_X^R(Y)$ esteja totalmente incluído em Y :

$$E_X^R(Y) = \{x \in X: B_X(x,R) \subseteq Y\} \quad \text{Eq. 3.13}$$

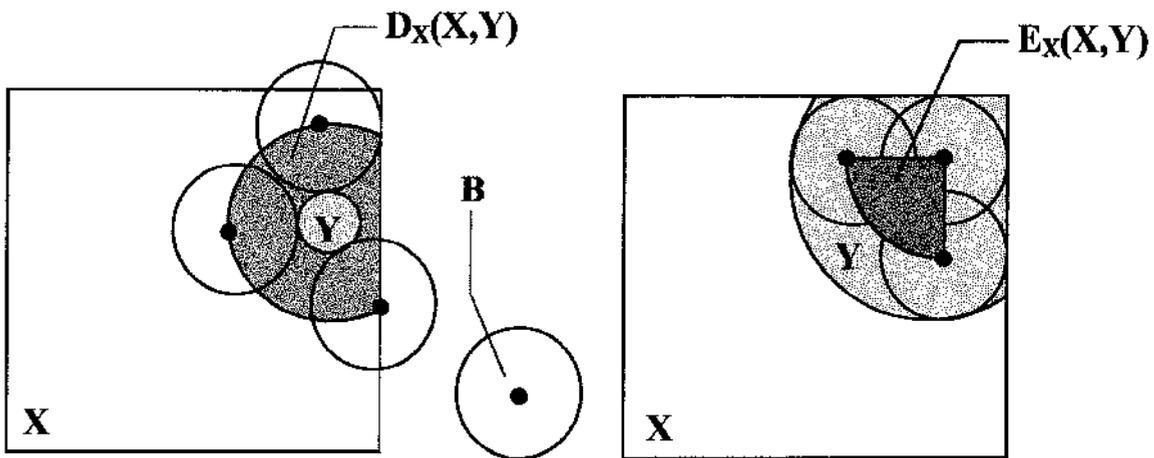


Figura 3.8 - Exemplo de dilatação e erosão geodésicas.

As transformações geodésicas são utilizadas, neste trabalho, para manter a conectividade das componentes da imagem, após a execução de algumas operações morfológicas, e para reconstruir componentes parcialmente eliminadas. Suponha, por exemplo, a aplicação de uma abertura visando remover pequenas partículas de ruído. Esta abertura afeta, naturalmente, as demais componentes da imagem.

Para eliminar este efeito, podemos efetuar dilatações geodésicas sobre esta imagem, utilizando, como máscara, a imagem original (Figura 3.9).

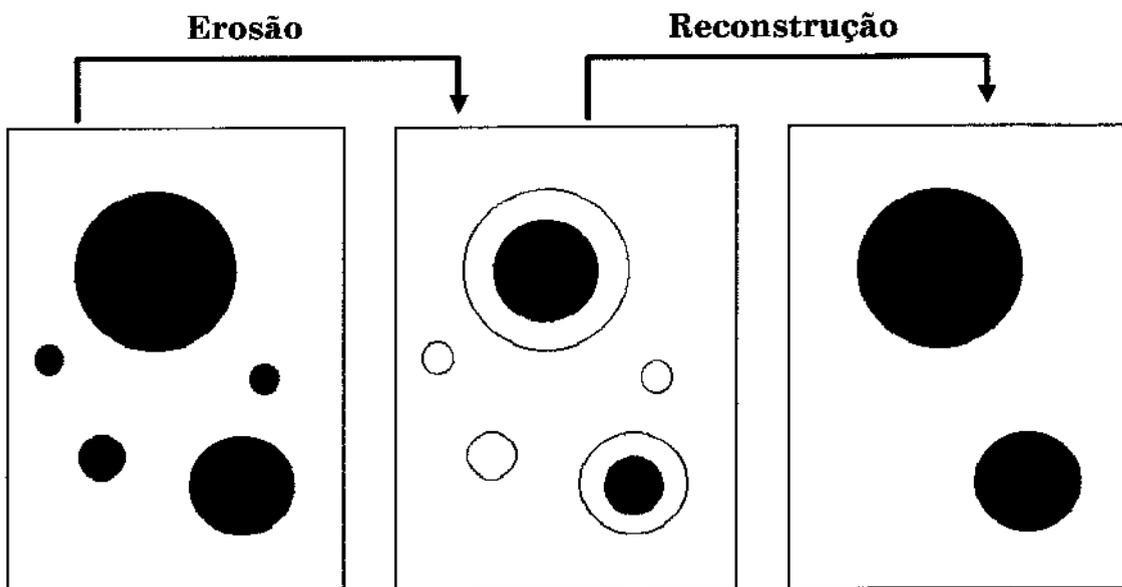


Figura 3.9 - Exemplo de reconstrução geodésica.

Capítulo 4

Segmentação de Cartas Náuticas

Neste capítulo apresentamos algumas das principais funções desenvolvidas para a extração das componentes de cartas náuticas. Estas cartas, digitalizadas numa escala de 1:50000 e resolução de 300 dpi, foram confeccionadas e cedidas pela Marinha do Brasil e constituem uma amostra significativa das cartas utilizadas pela Marinha e instituições privadas brasileiras. Apresentamos ainda as características levadas em consideração no desenvolvimento das funções de segmentação e também o modo como problemas relativos à sobreposição e desconexidade das componentes são resolvidos neste trabalho.

Inicialmente, descrevemos o pré-processamento das cartas náuticas e as funções morfológicas básicas desenvolvidas. Estas funções são utilizadas na definição das operações mais complexas denominadas funções principais. Dentre estas funções podemos destacar as funções responsáveis pela extração das estradas de ferro, isolinhas, canais, coordenadas e caracteres.

Todas as funções básicas e principais são executadas sobre duas amostras de cartas náuticas para facilitar a compreensão das etapas do processamento. Ao final do capítulo ilustramos o resultado da aplicação das funções a uma sequência de outras amostras de cartas náuticas, demonstrando a robustez do método.

4.1 Pré-Processamento das Cartas Náuticas

O pré-processamento das cartas náuticas é bastante simples devido às características intrínsecas à sua confecção. As cartas apresentam um conjunto de cores escuras representando a forma (as componentes de interesse) e cores claras representando o fundo.

Inicialmente, partes de cartas náuticas são digitalizadas como foto preto e branco e, posteriormente, binarizadas. O processo de binarização foi descrito no capítulo 2 deste trabalho.

O objetivo da binarização é definir uma imagem onde forma e fundo estejam nitidamente separados. No nosso caso, ao final do processo, a imagem resultante contém apenas duas cores: preto, representando as componentes de interesse, e branco, o fundo da imagem (Figura 4.2).

O processo de segmentação foi conduzido em uma imagem binária pelas seguintes razões:

- Menor espaço para armazenamento da imagem e maior facilidade de manipulação.
- Menor tempo computacional na execução das operações morfológicas.
- O processo se torna mais genérico pois pode ser aplicado a outros tipos de cartas náuticas sem depender das cores específicas utilizadas na sua confecção.

4.2 Famílias de Operações

4.2.1 Convenções

As seguintes abreviações são consideradas aqui:

- E \equiv Erosão.
- D \equiv Dilatação.
- H \equiv Transformação HMT.
- n \equiv Número de iterações.
- b \equiv Imagem original binarizada.
- B_d \equiv Elemento estruturante. O elemento estruturante B_d pertence a uma das famílias de elementos estruturantes descritas na seção 4.2.2, e corresponde a uma rotação do elemento estruturante B .

- $(X)_d \equiv$ Translação da imagem de um pixel na direção d , de acordo com as direções indicadas na Figura 4.1.

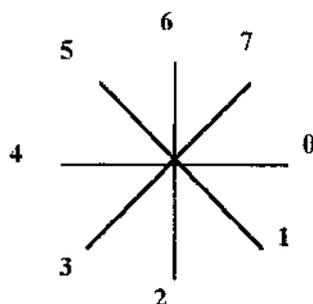


Figura 4.1 - As direções d utilizadas neste trabalho.

De modo geral, as funções são definidas da seguinte forma:

f_d^{Nome} , onde Nome identifica a função e d , a direção de aplicação da função, de acordo com a Figura 4.1. A transformação resultante desta operação é dada pela união dos conjuntos definidos considerando-se as diferentes direções:

$$f^{Nome} = \bigcup_{d=0}^7 f_d^{Nome} \quad Eq 4.1$$

4.2.2 Erosão e Dilatação

As operações de erosão e dilatação podem ser descritas da seguinte forma:

$$E^{nB_d}(X) = \{a \in Z^2 : a + b \in X \text{ para todo } b \in B_d\} \quad e \quad Eq 4.2$$

$$D^{nB_d}(X) = \{a \in Z^2 : a = x + b \text{ para todo } x \in X \text{ e } b \in B_d\}, \quad \text{Eq 4.3}$$

onde n corresponde ao número de iterações e B_d ao elemento estruturante que pertence a uma das seguintes famílias:

$$\bullet \quad B_0 = \begin{bmatrix} x & x & x \\ x & 1 & 1 \\ x & x & x \end{bmatrix} \text{ e suas rotações de } 45^\circ.$$

$$\bullet \quad C_0 = \begin{bmatrix} x & x & 1 \\ x & 1 & 1 \\ x & x & 1 \end{bmatrix} \text{ e suas rotações de } 45^\circ.$$

$$\bullet \quad J_0 = \begin{bmatrix} x & 1 & x \\ x & 1 & x \\ x & 1 & x \end{bmatrix} \text{ e suas rotações de } 45^\circ.$$

$$\bullet \quad E^{L_d} = \bigcup_{d-1}^{d+1} E^{J_d} \quad \text{e} \quad D^{L_d} = \bigcup_{d-1}^{d+1} D^{J_d}$$

onde 1 corresponde ao objeto e x significa 1 ou 0, indiferentemente.

O elemento estruturante B , sem índice, corresponde ao elemento estruturante elementar 3×3 :

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

4.2.3 Erosão e Dilatação Geodésicas

Da mesma forma, erosão e dilatação geodésica podem ser dadas por:

$D_Y^{B_d}(X)$ e $E_Y^{B_d}(X)$ onde B_d é o elemento estruturante pertencente a uma das famílias descritas na seção 4.2.2, e Y corresponde ao espaço de restrição das operações (ver seção 3.6).

4.2.4 Abertura e Fechamento Geodésicas

Exemplos de abertura e fechamento considerados aqui são:

- Abertura $\equiv D_Y^{B_d}(E^{B_d}(X))$
- Fechamento $\equiv E^{B_d}(D_Y^{B_d}(X))$,

onde B_d é o elemento estruturante pertencente a uma das famílias descritas na seção 4.2.2.

Nas operações de abertura, utilizamos o símbolo * para indicar que a dilatação geodésica está restrita ao conjunto X inicial obtido antes da aplicação das erosões, isto é:

$$D_*^{B_d}(E^{B_d}(X)) \equiv D_Y^{B_d}(E^{B_d}(X))$$

4.3 Funções Morfológicas

As funções morfológicas apresentadas são de dois tipos: básicas e principais. As funções básicas são responsáveis pela segmentação de características importantes das componentes e são utilizadas como ponto de partida para sua segmentação pelas funções principais.

A Figura 4.2 apresenta duas amostras de cartas náuticas. Nelas podemos identificar diferentes componentes, tais como, isolinhas, rios, caracteres, pequenos símbolos, canais, estradas de ferro, etc. Estas componentes são extraídas a partir das funções principais, as funções básicas sendo responsáveis pela extração de características,

tais como, arestas, contorno, objetos pequenos e grandes, linhas paralelas, etc. A seção 4.3.1, a seguir, descreve as funções básicas e principais.

Finalmente as seções posteriores ilustram as operações de segmentação, definidas a partir de combinação do conjunto dessas funções morfológicas.

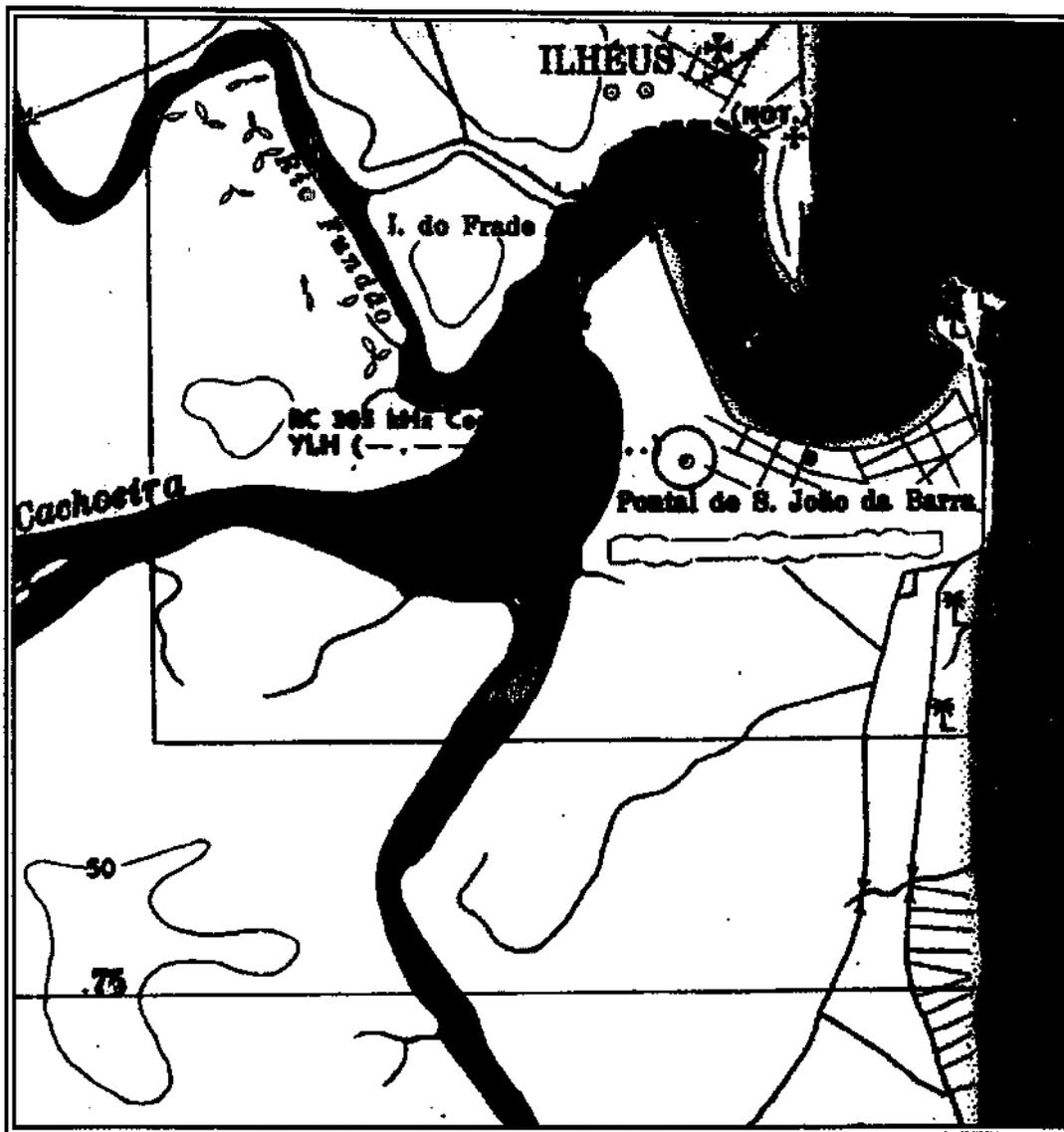


Figura 4.2 (a) - Imagem original de uma carta náutica binarizada



Figura 4.2 (b) - Outra amostra de uma imagem original binarizada

4.3.1 Classificação das Funções Morfológicas

Como mencionado anteriormente, as funções morfológicas estão classificadas em básicas e principais.

As funções básicas são:

- espessas
- filtragem_inicial
- contorno
- aresta
- filtra_aresta
- longas_inicial
- paralelas
- longas
- curtas

As funções principais são:

- coordenadas
- ferrovia
- isolinhas
- isolinhas_ref
- canais
- prédios
- antenas
- caracteres
- lagos_e_rios

4.3.2 Funções Básicas

4.3.2.1 Espessas

Em imagens de cartas náuticas (Figuras 4.2(a) e 4.2(b)) observamos a presença de grandes componentes escuras. A segmentação destas componentes é bastante simples e facilita a extração das outras componentes. Esta segmentação é dada por:

$$\underline{\underline{f^{espessas} = D_b^{20B}(E^{6B}(b))}} \quad Eq\ 4.4$$

A seguir (Figura 4.3) mostramos os resultados intermediários da aplicação da função *espessas* sobre a amostra da Figura 4.2(a).

$$f^{espessas} = \sqrt[3]{D_b^{20B} \left(\sqrt[2]{E^{6B} \left(\sqrt{b} \right)} \right)}$$

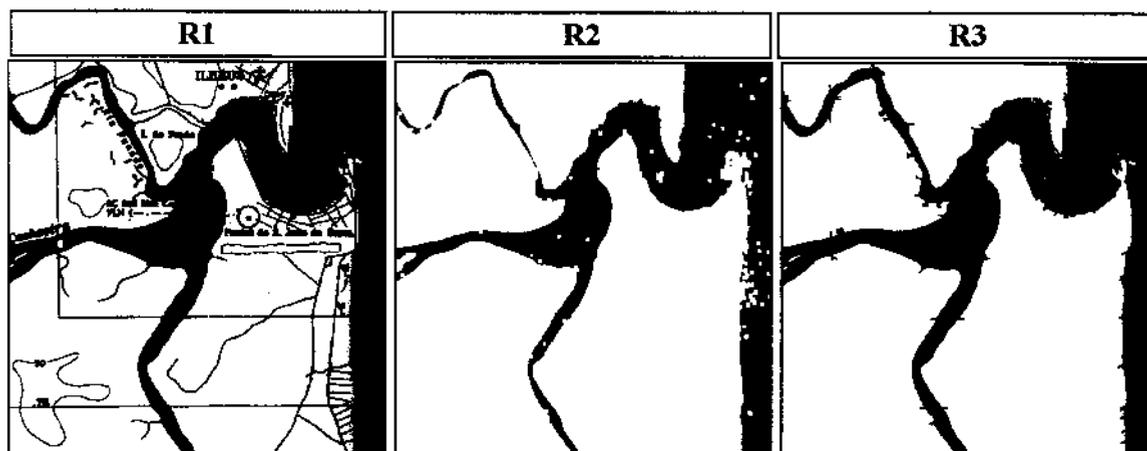


Figura 4.3 - Resultados intermediários da função *espessas*

A função *espessas* é definida por um conjunto de erosões utilizando o elemento estruturante **B**. Estas erosões eliminam componentes delgadas da imagem, conservando apenas partes de componentes espessas (R2).

Obviamente, após a aplicação destas erosões, as componentes espessas se encontram com sua forma original alterada, e em alguns casos podem estar desconexas (a erosão não é uma operação homotópica). Como exemplo, podemos citar os rios que em algumas regiões podem apresentar partes menos espessas que desaparecem com a erosão.

As dilatações geodésicas da Eq. 3.10 visam corrigir este problema. Através dessas dilatações restauramos as componentes parcialmente eliminadas e desconexas sem recuperar as demais componentes, completamente eliminadas pelas erosões (R3).

Após a restauração, algumas componentes podem apresentar, ainda, pequenos segmentos de outras componentes, tais como caracteres e canais, que se encontrem, eventualmente, conectados às mesmas.

As Figuras 4.4 (a) e 4.4 (b) ilustram a execução da função *espessas* sobre as imagens das Figura 4.2 (a) e 4.2 (b) respectivamente.

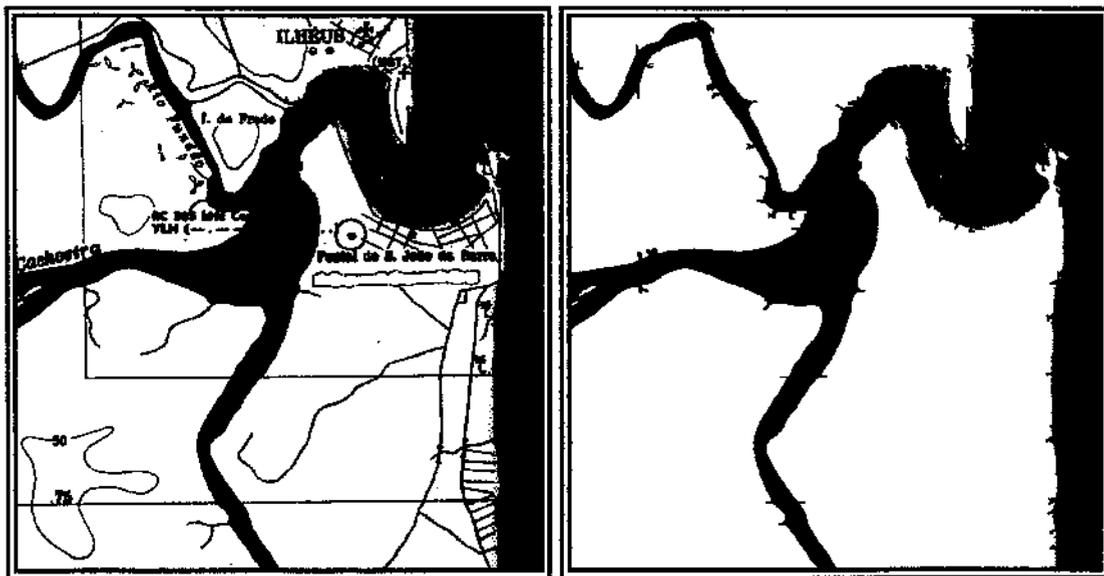


Figura 4.4 (a)- Resultado da aplicação da função *espessas* à amostra da Figura 4.2 (a)



Figura 4.4 (b)- Resultado da aplicação da função espessas à amostra da Figura 4.2 (b)

4.3.2.2 Função Filtragem_Inicial

A função básica *Filtragem_Inicial* corresponde à imagem original sem as componentes espessas. A partir de uma imagem deste tipo, são definidas algumas das demais funções do sistema. Esta função é dada por:

$$\underline{\underline{f^{Filtragem_Inicial} = D_b^{15B} (E^B (b \cap \overline{f^{espessas}}))}} \quad Eq\ 4.5$$

A função *filtragem_Inicial* é definida, naturalmente, considerando a função *espessas* seguida de uma erosão e de um conjunto de dilatações geodésicas que corrigem algumas imperfeições na imagem resultante. A Figura 4.5 mostra os resultados intermediários da função *filtragem_inicial* e as Figuras 4.6 (a) e 4.6 (b) ilustram a aplicação desta função sobre as imagens das Figuras 4.2 (a) e 4.2 (b) respectivamente.

$$f_{\text{Filtragem_Inicial}} = D_b^{15B} \left(E^B \left(b \cap \overbrace{f_{\text{espessas}}}^{\text{R1}} \right) \right) \overbrace{\quad}^{\text{R2}} \overbrace{\quad}^{\text{R3}}$$

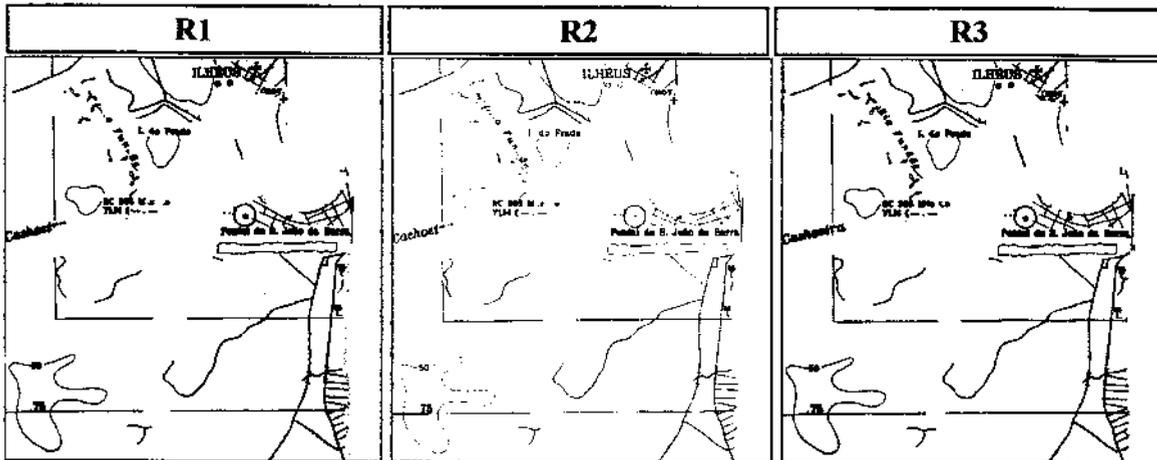


Figura 4.5 - Resultados intermediários da função *filtragem_inicial*

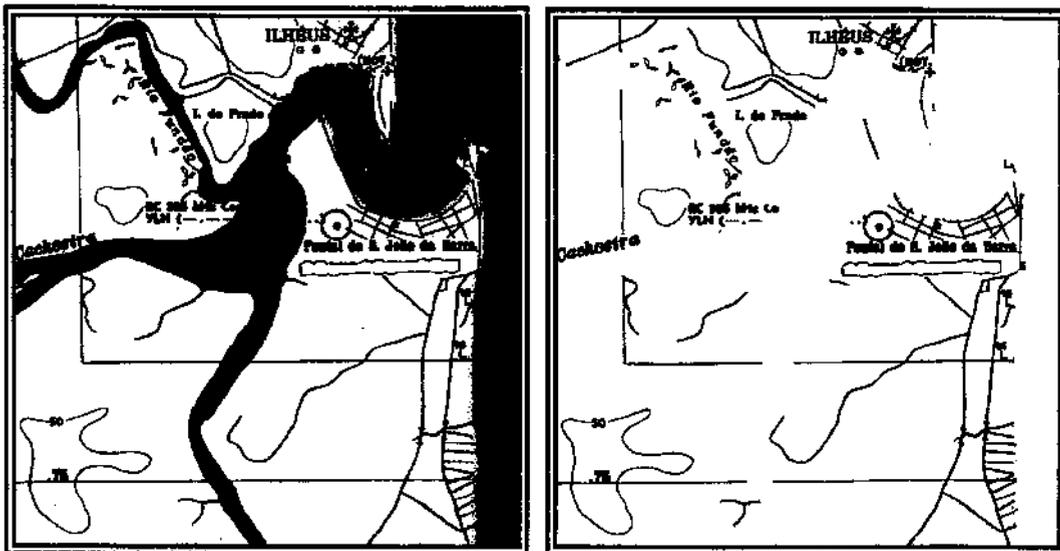


Figura 4.6 (a) - Resultado da aplicação da função *filtragem_inicial* sobre a imagem 4.2(a).



Figura 4.6 (b) - Resultado da aplicação da função *filtragem_inicial* sobre a imagem 4.2(b).

4.3.2.3 Contorno dos Objetos

A função básica *contorno* extrai o contorno dos objetos presentes na imagem. Devido à sua generalidade, esta função pode ser aplicada a qualquer tipo de imagem e em qualquer resolução. A função *contorno* pode ser dada por:

$$\underline{\underline{f_d^{contorno} = H^{M_d}(f_{filtragem_inicial})}}, \quad Eq\ 4.6$$

onde $d=0,1,\dots,7$ e $M_0 = \begin{bmatrix} x & x & x \\ x & 1 & 0 \\ x & x & x \end{bmatrix}$ e suas rotações de 45°

A função *contorno* é definida a partir de uma transformação HMT com a família de elementos estruturantes acima. Ela é executada, aqui, sobre o resultado da função *filtragem_inicial*.

Como indicado na seção 4.2.1, a função *contorno*, sem índice, corresponde à união do resultado da aplicação da função em todas as direções consideradas na sua definição (Eq 4.6).

$$\overline{f^{\text{contorno}} = \bigcup_{d=0}^7 f_d^{\text{contorno}}}$$

Eq 4.7

O contorno de duas amostras de cartas náuticas calculadas de acordo com a Eq 4.7 pode ser visto nas Figuras 4.7 (a) e 4.7 (b).

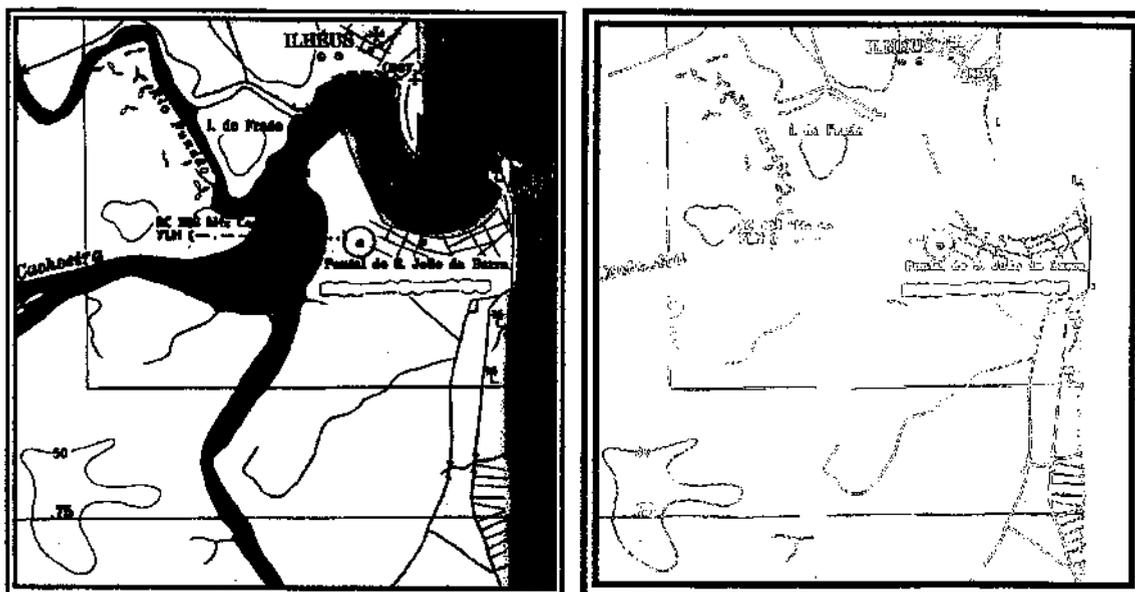


Figura 4.7 (a) - Contorno da amostra 4.2 (a)



Figura 4.7 (b) - Contorno da amostra 4.2 (b).

4.3.2.4 Arestas

A função *aresta* é também uma função básica genérica e pode ser aplicada a qualquer carta náutica binarizada. Ela representa um refinamento da função contorno. Na função *contorno*, pontos pertencentes ao resultado da aplicação da função nas direções diagonais ($d = 1,3,5,7$) também estão presentes no resultado da aplicação da função considerando as direções horizontal e vertical, o que é indesejável. A função *aresta* que corrige este problema é dada por:

$$\underline{f_d^{aresta} = f_d^{contorno} \cap ((f_d^{contorno})_{d-2} \cup (f_d^{contorno})_{d+2}),}$$

onde $d = 0, 2, 4, 6$. Eq 4.8

$$\underline{f_d^{aresta} = \{f_{d-1}^{contorno} \cap ((f_{d-1}^{contorno})_{d-2} \cup (f_{d-1}^{contorno})_{d+2})\} \cup \{f_{d+1}^{contorno} \cap ((f_{d+1}^{contorno})_{d-2} \cup (f_{d+1}^{contorno})_{d+2})\}}$$

onde $d = 1, 3, 5, 7$. Eq 4.9

A função *aresta* sem índice de direção, corresponde à união do resultado desta função aplicada às 8 direções definidas anteriormente.

4.3.2.5 Filtra_aresta

A função *aresta* pode ser distorcida pela presença de ruídos ao longo do contorno. A função *filtra_aresta* conecta pontos de contorno entre componentes conexas resultantes da função *aresta*.

A função *filtra_aresta* é dada por:

$$f_d^{filtra_aresta} = D_*^{2L_d} (E^{2L_d} (f_d^{aresta} \cup E^{4L_d} (f_d^{aresta} \cup D_{f_d^{contorno}}^{2C_{d-2}} (term_{d-2}(f_d^{aresta})) \cup D_{f_d^{contorno}}^{2C_{d+2}} (term_{d+2}(f_d^{aresta}))))))$$

Eq 4.10

onde *term* é uma macro que identifica os pontos terminais na direção d.

$$term_d(X) = X \cap \bigcup_{d-1}^{d+1} E^{B_d}(X)$$

Eq 4.11

C_d pertence à família de elementos estruturantes \mathbf{C} definida na seção 4.2.2.

Os resultados intermediários da aplicação da função *filtra_aresta* para a direção $d=0$ sobre a amostra da Figura 4.2 (a) podem ser vistos a seguir nas Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 e o resultado final da aplicação desta função sobre as amostras das Figuras 4.2 (a) e 4.2 (b) podem ser vistos nas Figuras 4.12 (a) e 4.12 (b).

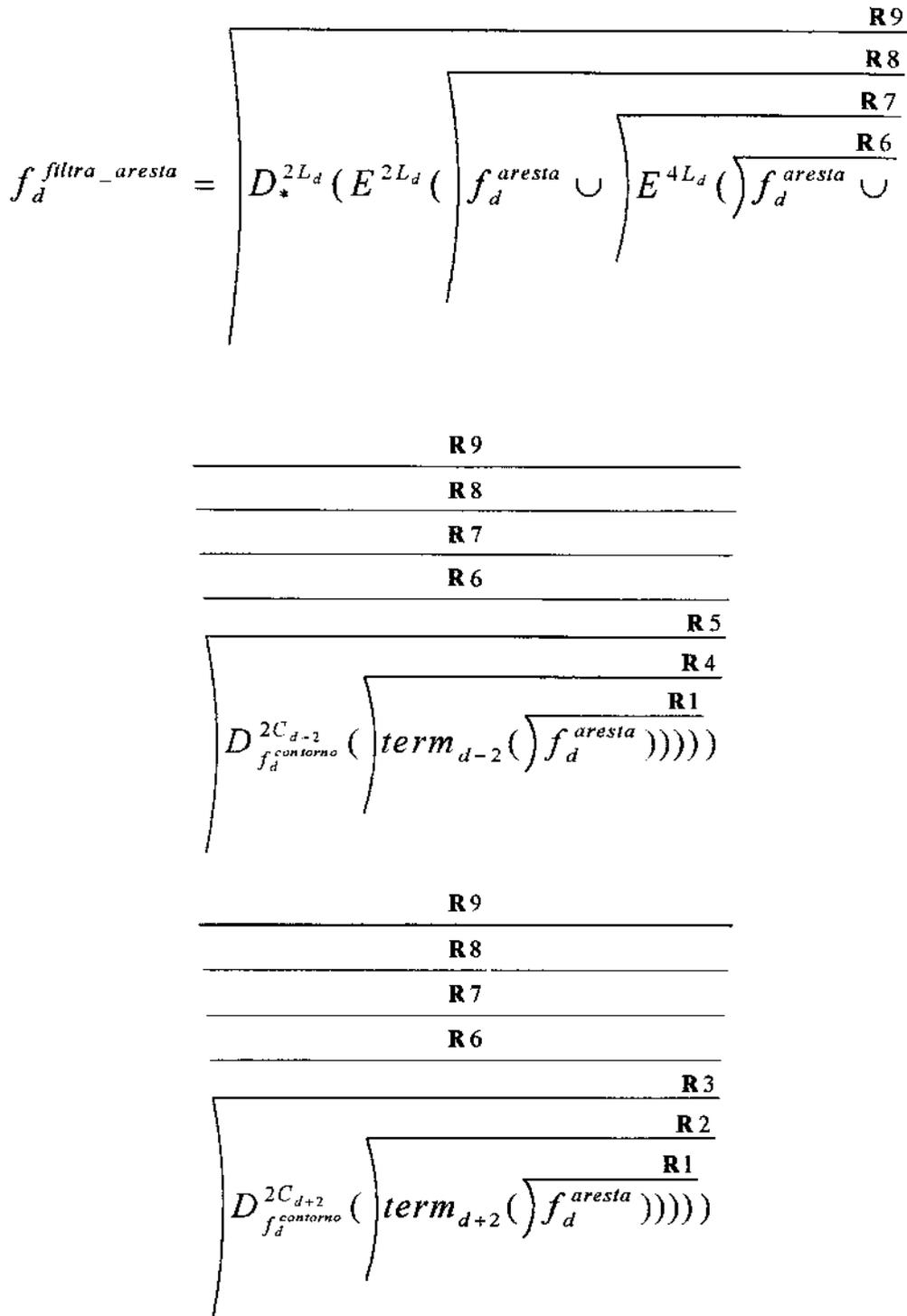


Figura 4.8 - Indicação dos resultados intermediários da função filtra_aresta.

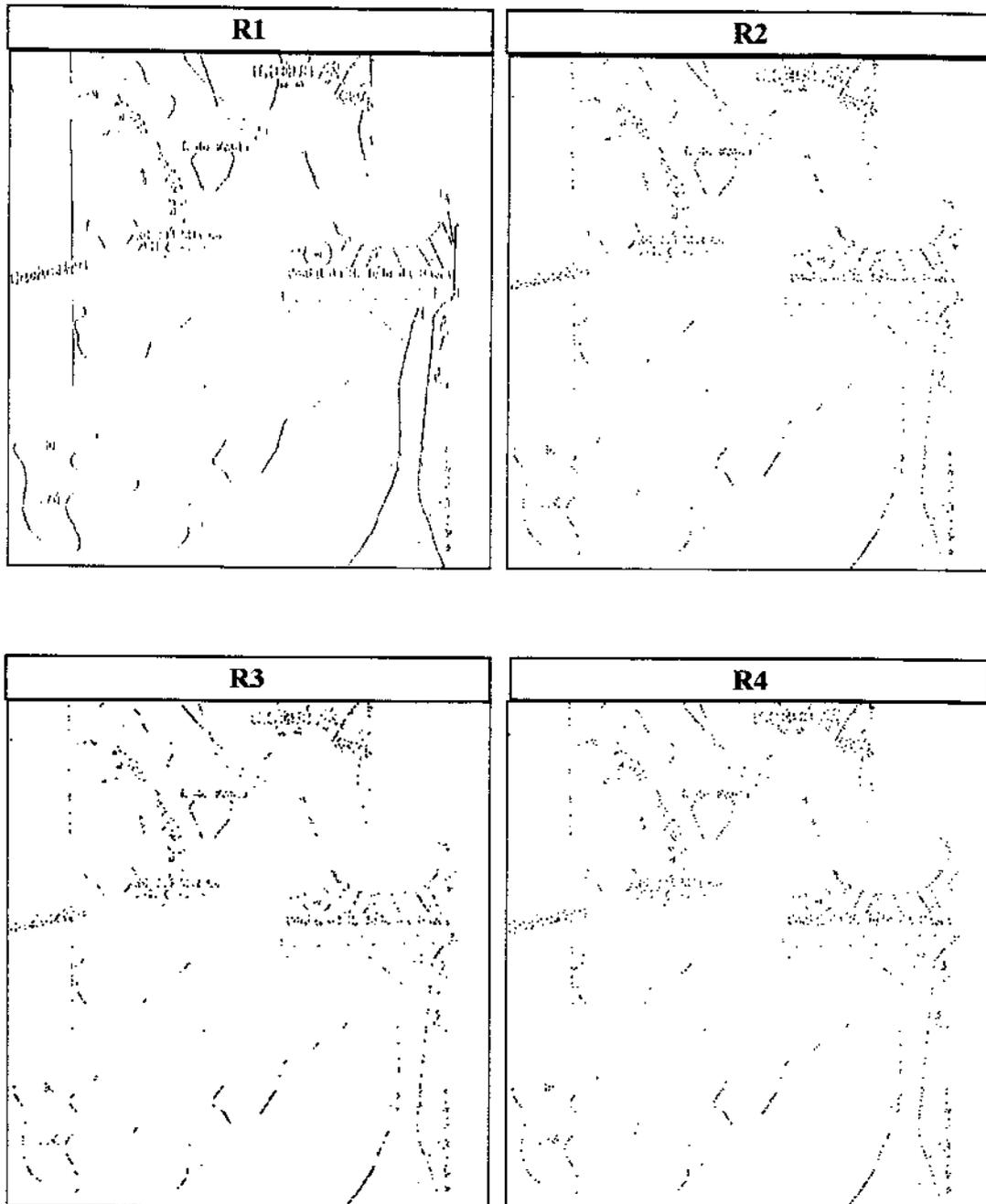


Figura 4.9 - Resultados intermediários R1,R2,R3 e R4 da função *filtra_aresta* aplicada para a direção $d=0$ sobre a amostra 4.2 (a).

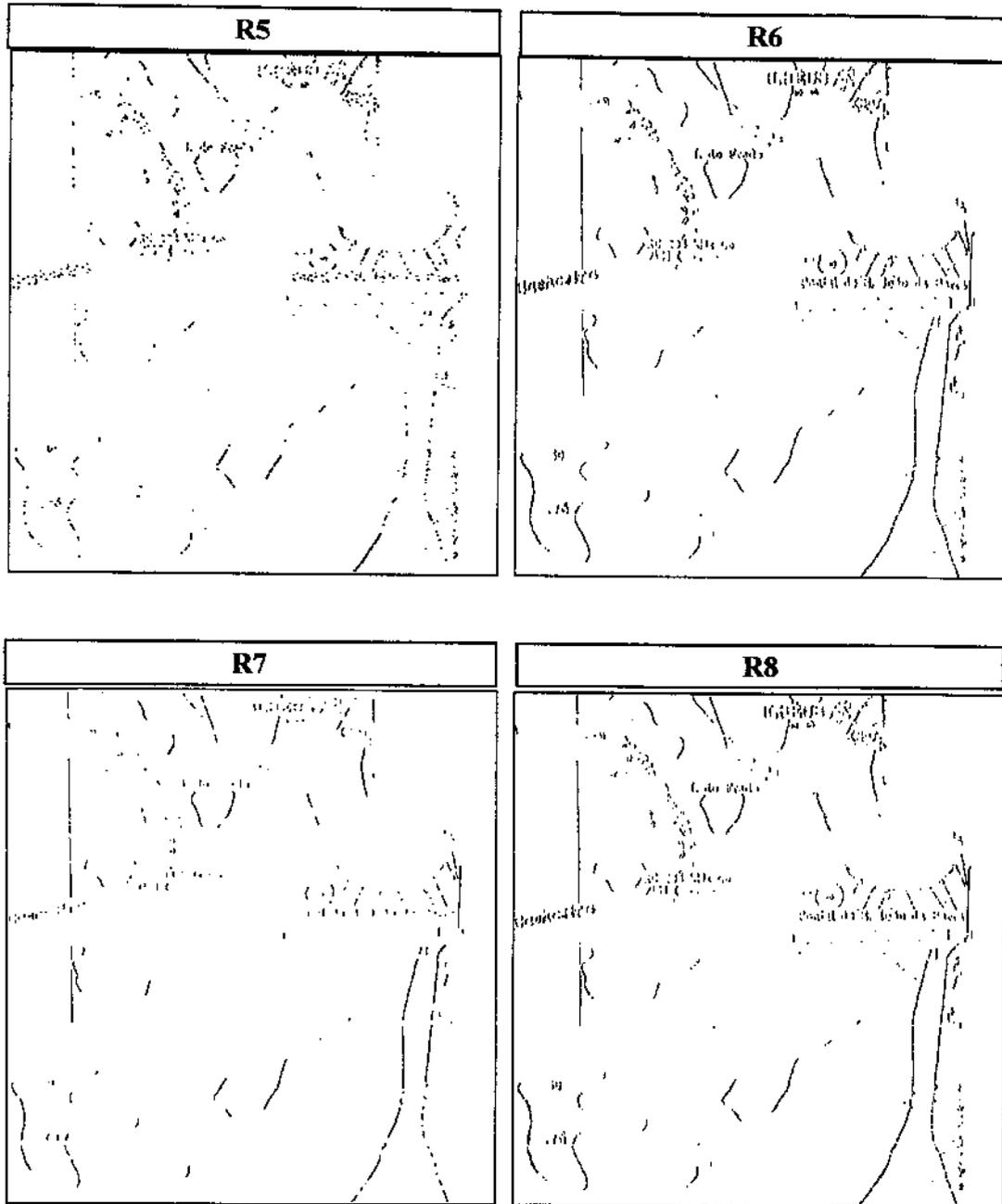


Figura 4.10 - Resultados intermediários R5,R6,R7 e R8 da função `filtra_aresta` aplicada para a direção $d=0$ sobre a amostra 4.2 (a).

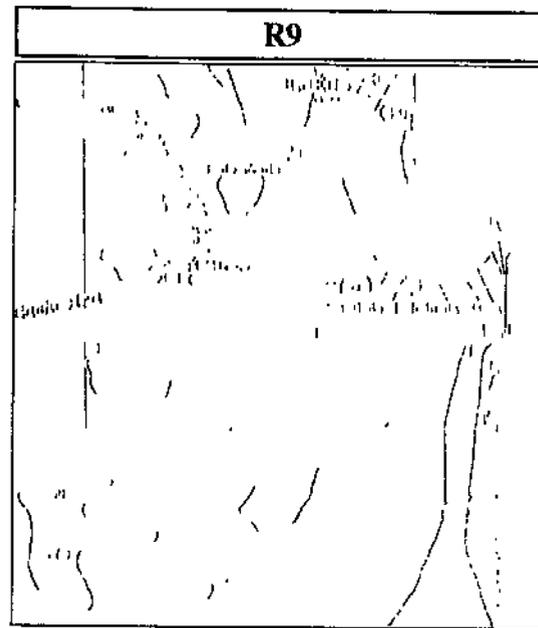


Figura 4.11 - Resultado intermediário R9 da função filtra_aresta aplicada para a direção $d=0$ sobre a amostra 4.2 (a).

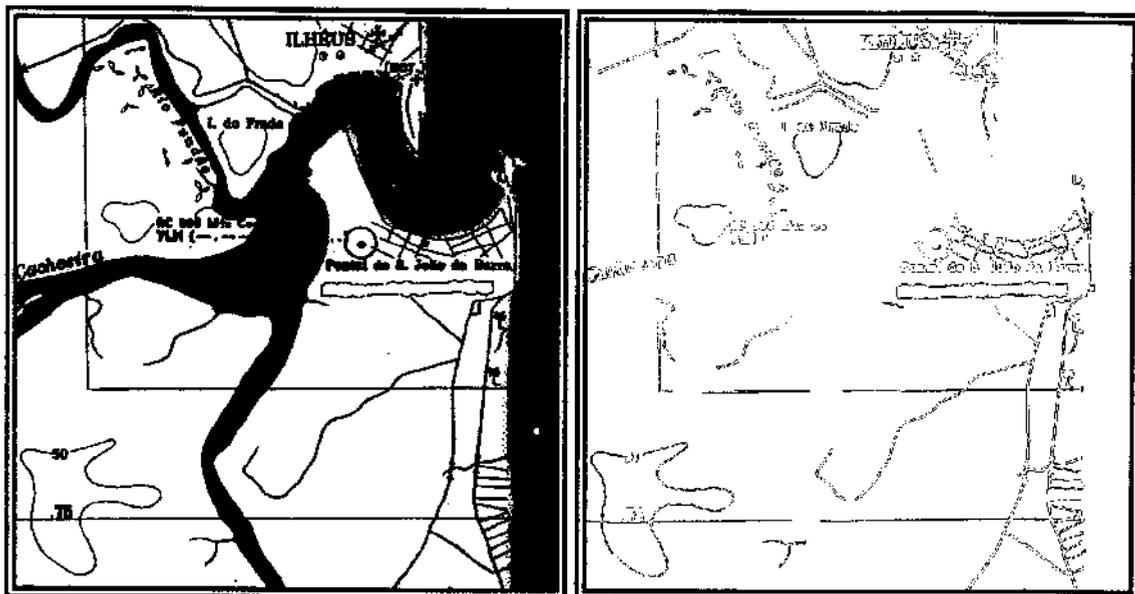


Figura 4.12 (a)- Resultado final da aplicação da função filtra_aresta sobre a amostra da Figura 4.2 (a).

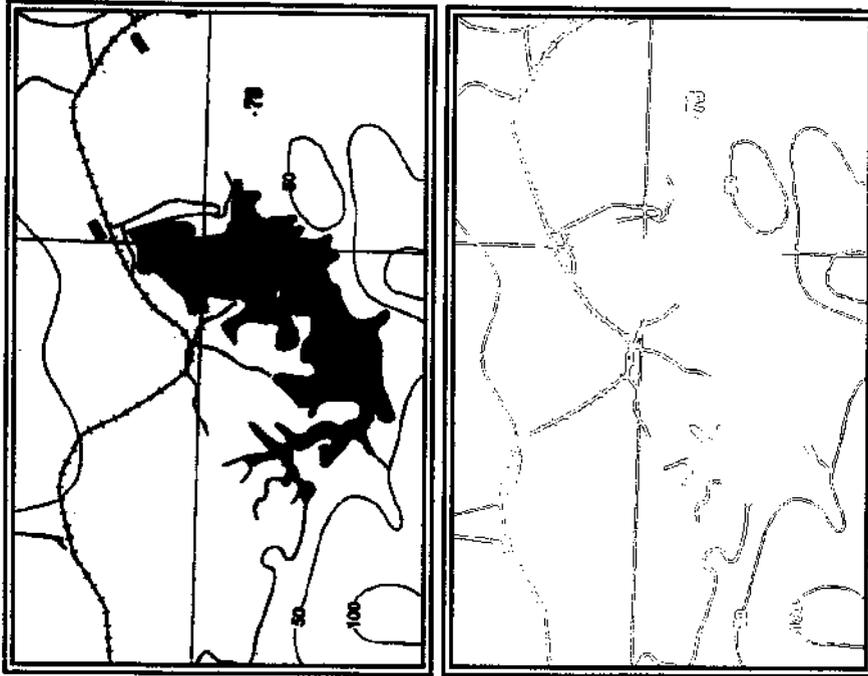


Figura 4.12 (b)- Resultado final da aplicação da função *filtra_aresta* sobre a amostra da Figura 4.2 (b).

4.3.2.6 Longas_inicial

As imagens de cartas náuticas contêm naturalmente componentes longas como, por exemplo, canais, isolinhas, coordenadas, e componentes curtas, tais como símbolos e caracteres. Naturalmente, estas características são importantes na segmentação final deste conjunto de componentes.

A função *longas_inicial* elimina segmentos curtos da imagem e é dada por:

$$\underline{\underline{f_d^{longas_inicial} = D_*^{15L_d} (E^{15L_d} (f_d^{filtra_aresta}))}} \quad Eq \ 4.12$$

Após a aplicação da função *longas_inicial* sobre a imagem *filtra_aresta* verificamos a presença de segmentos longos na imagem resultante. Algumas destas componentes podem se apresentar desconectadas. As funções *paralelas* e *longas*, definidas a seguir, visam conectar estas componentes adequadamente.

A Figura 4.13 ilustra a aplicação da função *longas_inicial* sobre as amostras das Figuras 4.2 (a) e 4.2 (b).

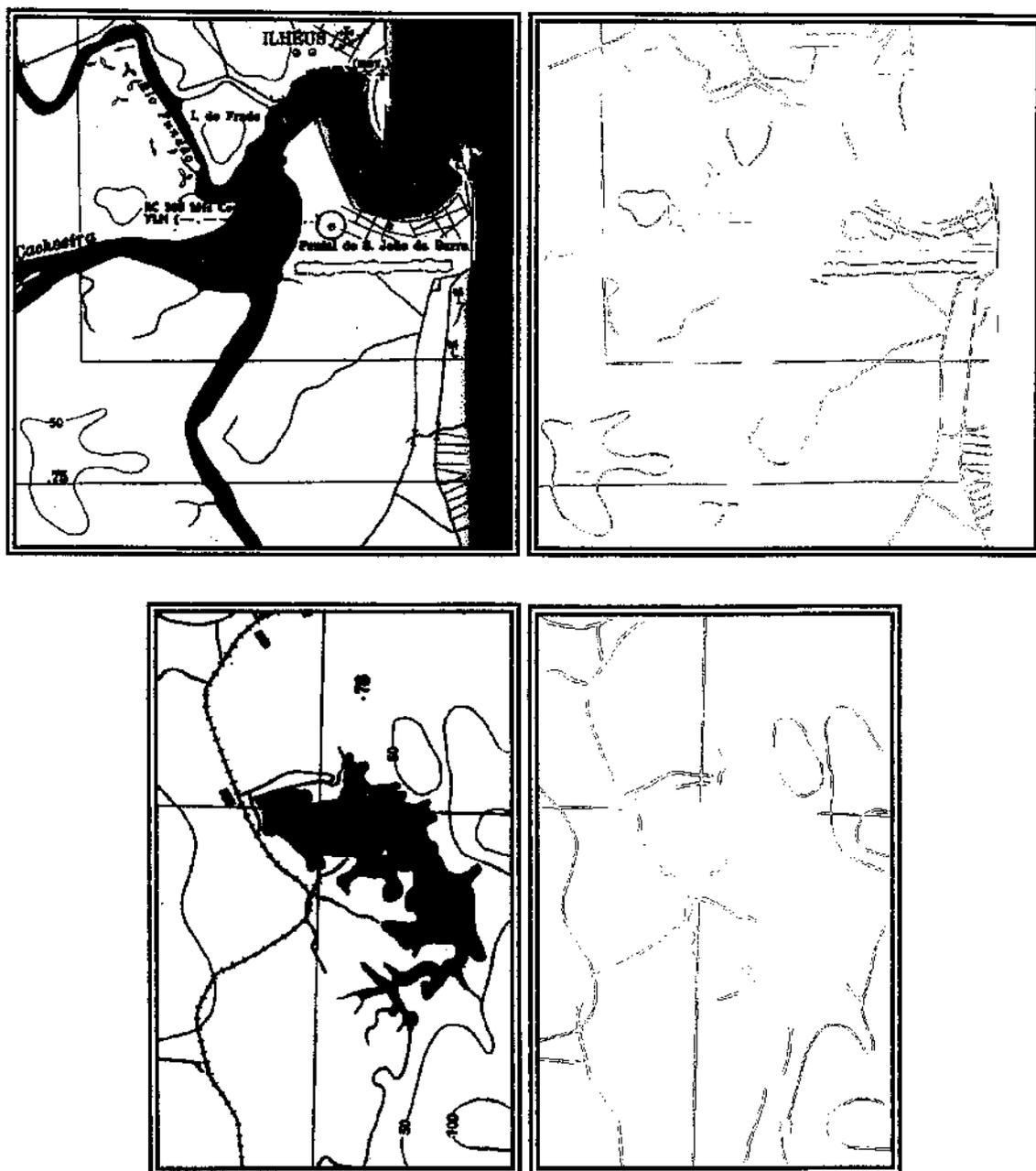


Figura 4.13 - Segmentos longos extraídos pela função *longas_inicial* aplicada sobre as amostras 4.2 (a) e 4.2 (b).

4.3.2.7 Linhas Paralelas

Esta função de base é bastante utilizada na definição de outras funções de segmentação, como veremos a seguir. Esta função extrai componentes cujos contornos definem linhas longas e paralelas

Numa imagem de contorno de uma carta náutica (Figura 4.7), observamos que muitas componentes são formadas por longas linhas paralelas como, por exemplo, canais, coordenadas e isolinhas. Esta característica será explorada na segmentação posterior destas componentes.

Na função *paralelas* procuramos resolver o problema das desconexões das componentes da imagem resultante da aplicação da função *longas_inicial*. Para isto, aplicamos um conjunto de dilatações geodésicas visando restaurar integralmente as componentes longas da imagem original.

A função *paralelas* é definida por:

$$\underline{\underline{f_d^{paralelas} = f_{aresta} \cap D_{f_{filtragem_inicial}}^{5L_d} (f^{longas_inicial})}}, \quad d=0,1,2,3$$

Eq 4.13

Nesta função utilizamos apenas 4 direções, em razão da função extrair linhas de contorno paralelas (as demais direções são paralelas às consideradas originalmente).

4.3.2.8 Longas

De modo geral, a função *longas* reconstitui as componentes longas, obtidas pela função *paralelas*, a partir de uma sequência de dilatações.

$$\underline{\underline{f_d^{longas} = D_{f_{filtragem_inicial}}^{2B} (f_d^{paralelas})}} \quad \text{Eq 4.14}$$

O resultado da aplicação da função *longas*, às amostras de cartas náuticas, pode ser visto na Figura 4.14.

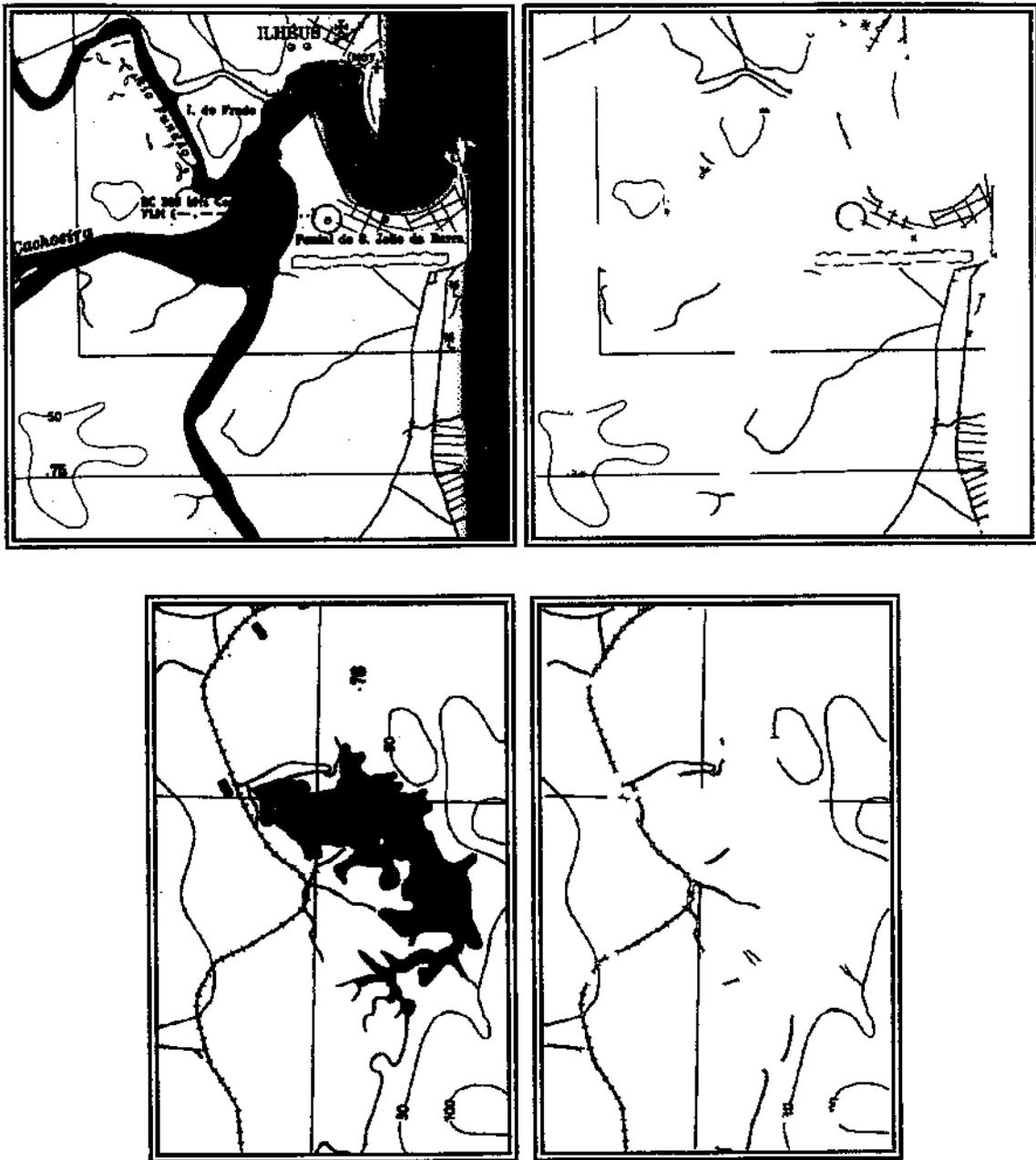


Figura 4.14 - Resultado da aplicação da função *longas* sobre as amostra de cartas náuticas das Figuras 4.2 (a) e 4.2 (b).

4.3.2.9 Curtas

Como vimos, a carta náutica contém uma série de componentes curtas, tais como símbolos náuticos e caracteres. A função *curtas* é definida visando auxiliar a segmentação dessas componentes. Ela é obtida a partir da extração das componentes longas da imagem inicial. Abaixo temos a definição da função *curtas*.

$$f^{curtas} = f^{filtragem_inicial} \cap \bigcup_{d=0}^3 D_*^{10L_d} (E^{10L_d} (D^{3B} (f^{filtragem_inicial} \cap \overline{f^{longas}} \cap \overline{f^{ferrovia}})))) \quad Eq \ 4.15$$

A função *curtas* apresenta, na sua definição, a função principal *ferrovia*, responsável pela extração das estradas de ferro, e será definida posteriormente. Ela é utilizada nesta função já que, devido às suas características, ela não é extraída diretamente pela função *longas*.

A Figura 4.15 ilustra a aplicação da função *curtas* sobre a imagem da Figura 4.2(a).

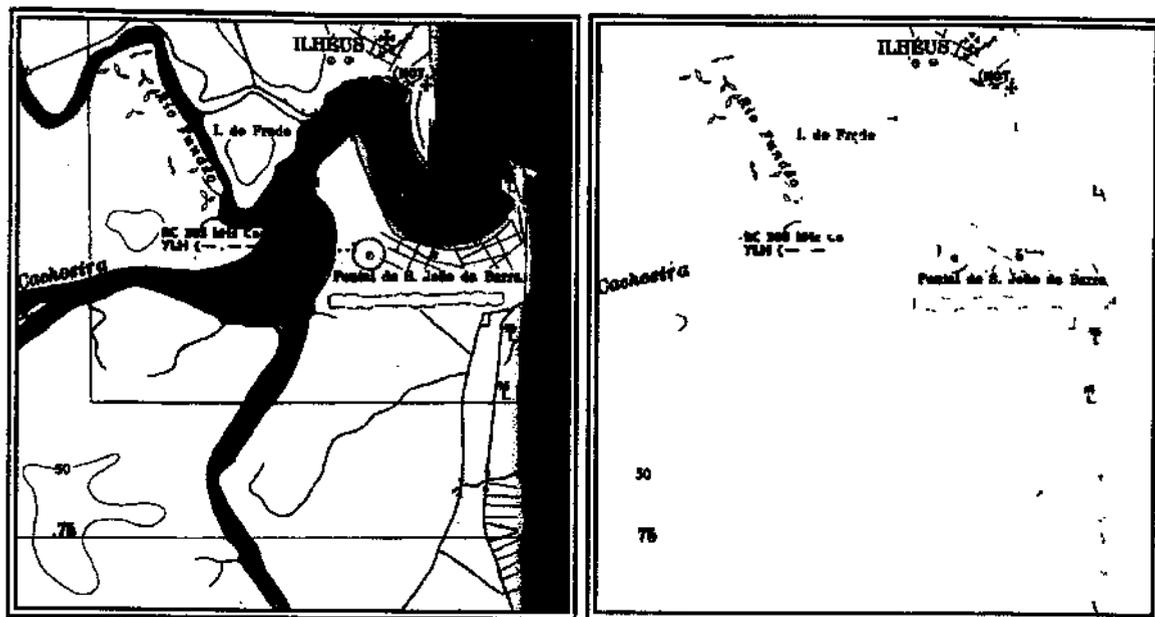


Figura 4.15 - Resultado da aplicação da função *curtas* sobre a imagem da Figura 4.2 (a).

4.3.3 Funções Principais

4.3.3.1 Coordenadas

As coordenadas e demarcações são componentes importantes a serem extraídas de uma carta náutica. Estas componentes são linhas longas na vertical e na horizontal. As funções *coordv* e *coordh*, a seguir, extraem estas duas componentes:

$$\underline{\underline{f^{coordh} = D_b^{200J_2} E^{100J_2} (b)}} \quad \text{Eq 4.16}$$

$$\underline{\underline{f^{coordv} = D_b^{100J_0} E^{100J_0} (b)}} \quad \text{Eq 4.17}$$

A função *coord*, definida abaixo, é responsável pela extração das coordenadas e demarcações nas direções vertical e horizontal.

$$\overline{f^{coord} = D_{f_{filtragem_inicial}}^{2B} (f^{coordv} \cup f^{coordh})} \quad Eq \ 4.18$$

A Figura 4.16 ilustra a aplicação da função *coord* à amostra da Figura 4.2 (a).

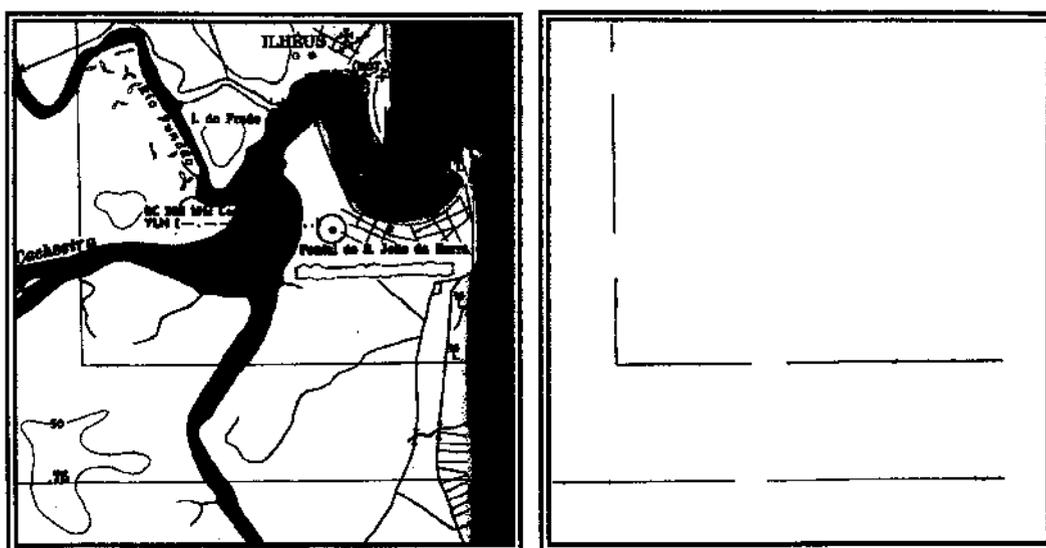


Figura 4.16 - Resultado da aplicação da função *coord* à imagem 4.2(a).

4.3.3.2 Estrada de Ferro

A estrada de ferro, presente em algumas cartas náuticas, é uma componente difícil de ser extraída pela sua forma complexa e por estar conectada geralmente a diversas outras componentes.

Esta segmentação é feita em diferentes etapas:

$$f^{aux1} = E^{J_0} E^{J_2} E^{2B} (D^{J_0} D^{J_2} D^B (f^{aresta})) \cap \bigcup_{d=0}^3 D_*^{20L_d} (E^{20L_d} (E^{J_0} E^{J_2} E^{2B} (D^{J_0} D^{J_2} D^B (f^{aresta}))))$$

Eq 4.19

A aplicação da função *aux1* sobre a imagem resultante da função *aresta*, na amostra da Figura 4.2(b), define um conjunto de pequenos segmentos da estrada de ferro, como mostrado na Figura 4.17.

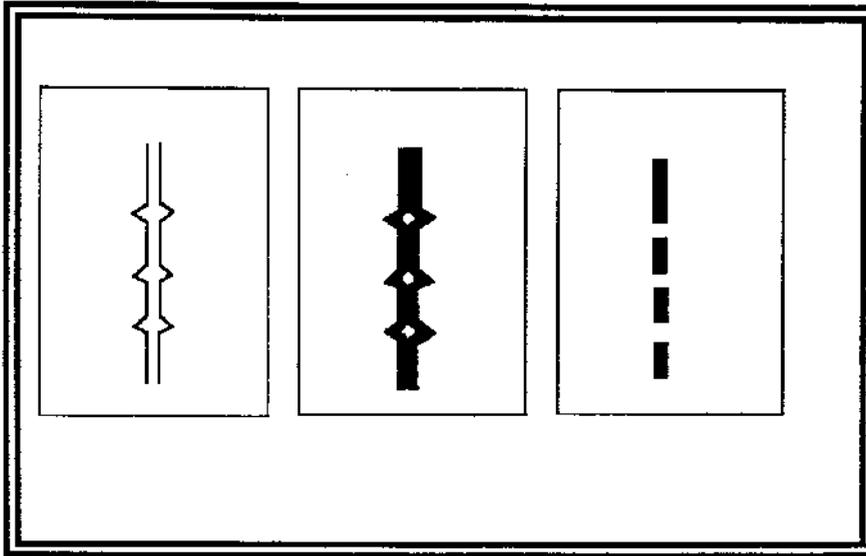


Figura 4.17 - Resultado da aplicação da função *aux1* sobre uma imagem contendo estrada de ferro.

Os resíduos espessos de outras componentes são extraídos pela segunda função *aux2*.

$$f^{aux2} = f^{aux1} \cap D_{f^{aux1}}^{3B} (E^{3B} (f^{aux1}))$$

Eq 4.20

Finalmente a função *ferrovia* conecta os pequenos segmentos, utilizando para isto dilatações geodésicas. As operações de abertura eliminam resíduos de outras componentes da imagem.

$$f^{ferrovia} = \bigcup_{d=0}^3 (D_*^{50L_d} (E^{50L_d} (D_{f\text{ filtragem_inicial}}^{15B} (f^{aux2} \cap D_{f\text{ filtragem_inicial}}^{5B} (f_d^{aresta})))))) \tag{Eq 4.21}$$

Os resultados intermediários das funções aux1, aux2 e ferrovia aplicados sobre a amostra da Figura 4.2 (b) podem ser vistos nas Figura 4.18 - 4.26 e o resultado final da aplicação da função ferrovia sobre a mesma amostra é mostrado na Figura 4.27.

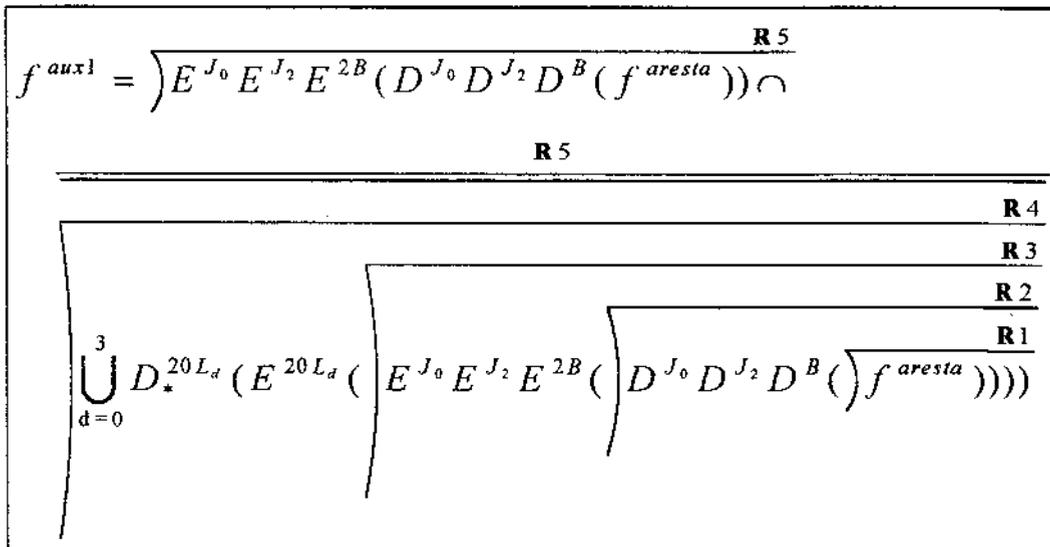


Figura 4.18 - Indicação dos resultados parciais da função aux1

As imagens da Figura 4.17 correspondem aos resultados intermediários R1,R2 e R3 da Figura 4.18 nesta ordem. Através de um conjunto de dilatações as outras componentes ficam completamente preenchidas ao contrário das ferrovias, pois estas

possuem pequenas evoluções no seu contorno o que impede o seu preenchimento completo (R2). Ao aplicar as erosões as outras componentes voltam a sua forma original porém mais delgadas, entretanto as ferrovias se transformam num conjunto de tracejados (R3). As operações seguintes (R4 e R5) visam isolar os tracejados das outras componentes através de uma abertura de tamanho igual a 20.



Figura 4.19 - Resultados parciais da função aux1 aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (b).

$$f^{aux2} = f^{aux1} \cap \left(D_{f^{aux1}}^{3B} \left(E^{3B} \left(f^{aux1} \right) \right) \right)$$

Figura 4.20 - Indicação dos resultados intermediários da função aux2.

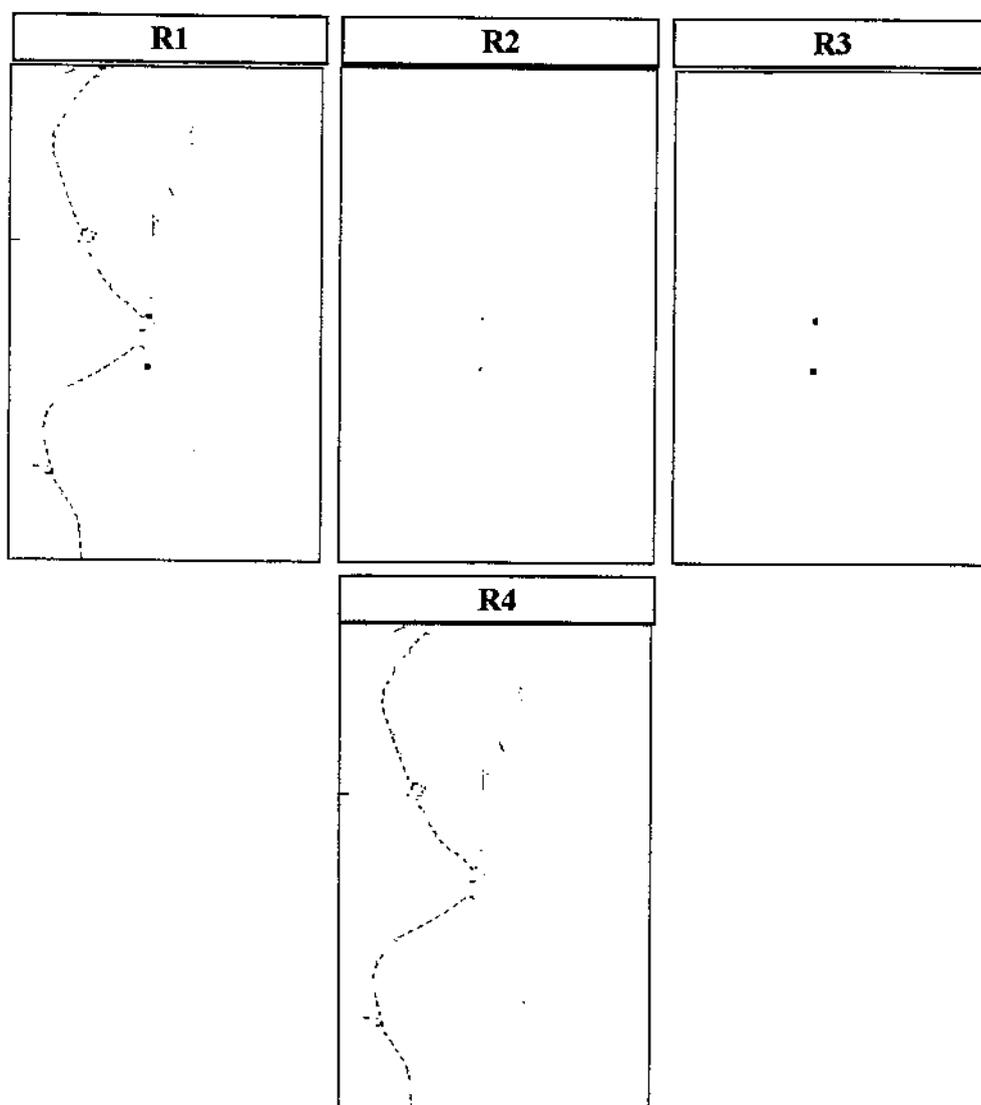


Figura 4.21 - Resultados intermediários da função aux2 aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (b).

A função *aux2* extrai os resíduos espessos de outras componentes. Os resultados intermediários da função *aux2* indicados na Figura 4.20 e apresentados na Figura 4.21 mostram que inicialmente é aplicado um conjunto de erosões (R2) seguida de um conjunto de dilatações geodésicas (R3) que eliminam todas as componentes da imagem, restando apenas resíduos de maior espessura. Em seguida este resultado é subtraído da imagem inicial, resultado da função *aux1*, obtendo uma imagem sem os resíduos espessos (R4).

$$f_{ferrovia} = \bigcup_{d=0}^3 (D_*^{50L_d} (E^{50L_d} (D_{f_{filtrogeom_inicial}}^{15B} (f_{aux2} \cap D_{f_{filtrogeom_inicial}}^{5B} (f_d^{cresta}))))))$$

Figura 4.22 - Indicação dos resultados intermediários da função ferrovia.

A função ferrovia inicialmente realiza a interseção do resultado da função *aux2* com a função *aresta* dilatada geodesicamente (R1, R2 e R3). Esta operação visa eliminar resíduos que possam ter sido criados nas etapas anteriores (funções *aux1* e *aux2*). Em seguida são aplicadas dilatações geodésicas (R4) com a finalidade de conectar os tracejados obtendo assim a ferrovia na sua forma original. Finalmente é aplicada uma abertura de tamanho igual a 50 para eliminar outras componentes que possam ter sido restauradas pelas dilatações geodésicas (R5). Estas operações são aplicadas para as quatro direções básicas (d=0,1,2,3) e no final é feita a união dos resultados.

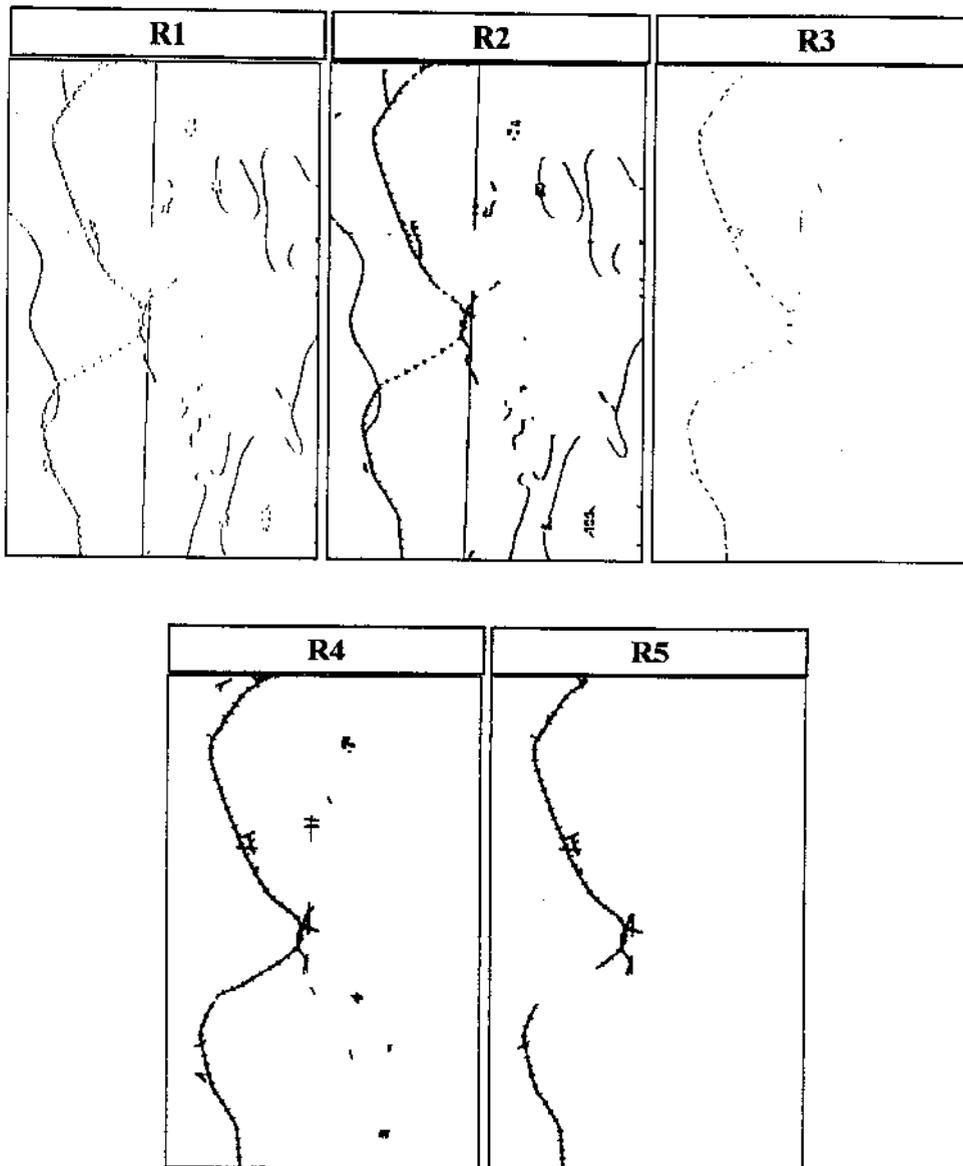


Figura 4.23 - Resultados intermediários da função ferrovias para a direção $d=0$ aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (b).

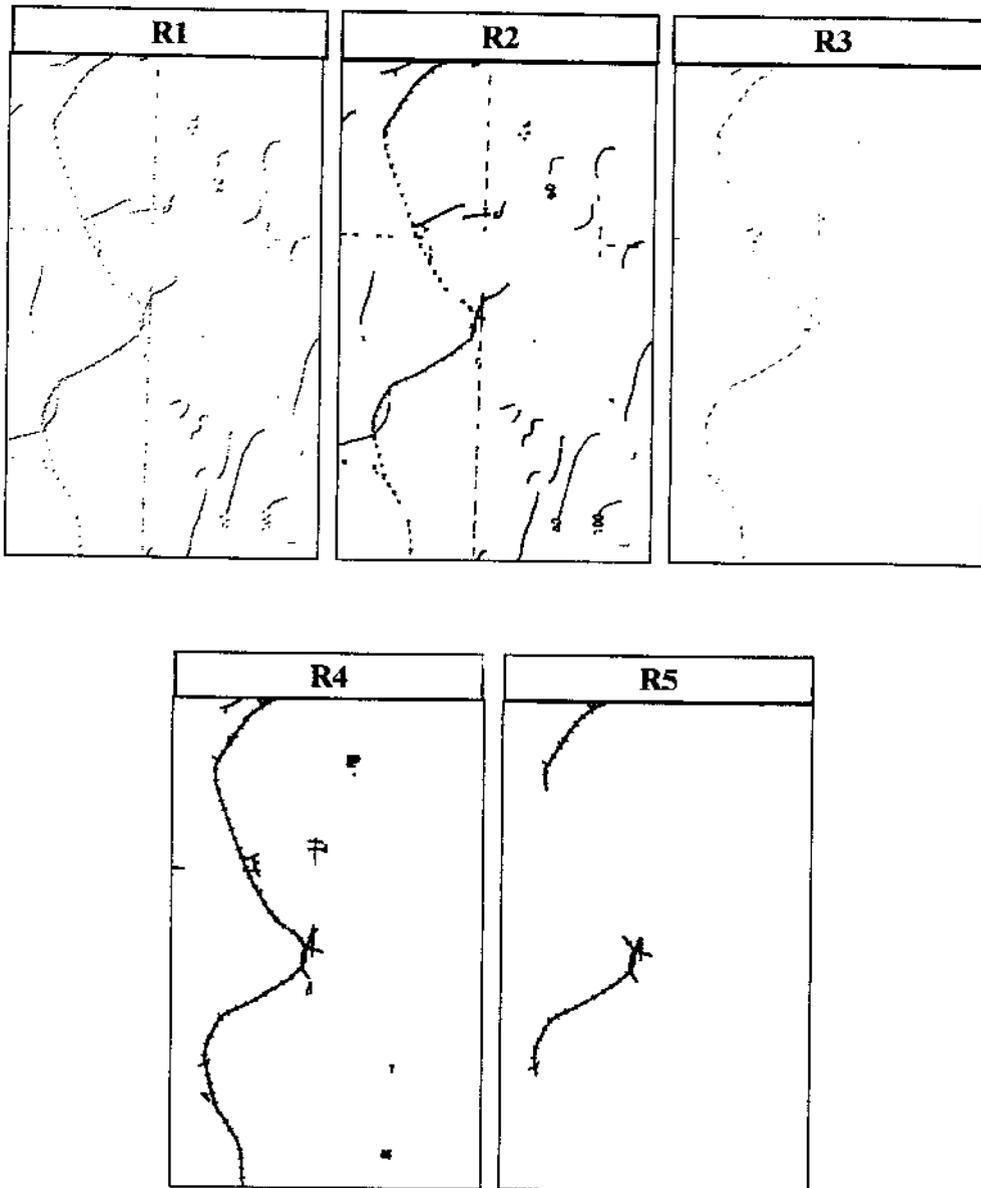


Figura 4.24 - Resultados intermediários da função ferrovia para a direção $d=1$ aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (b).

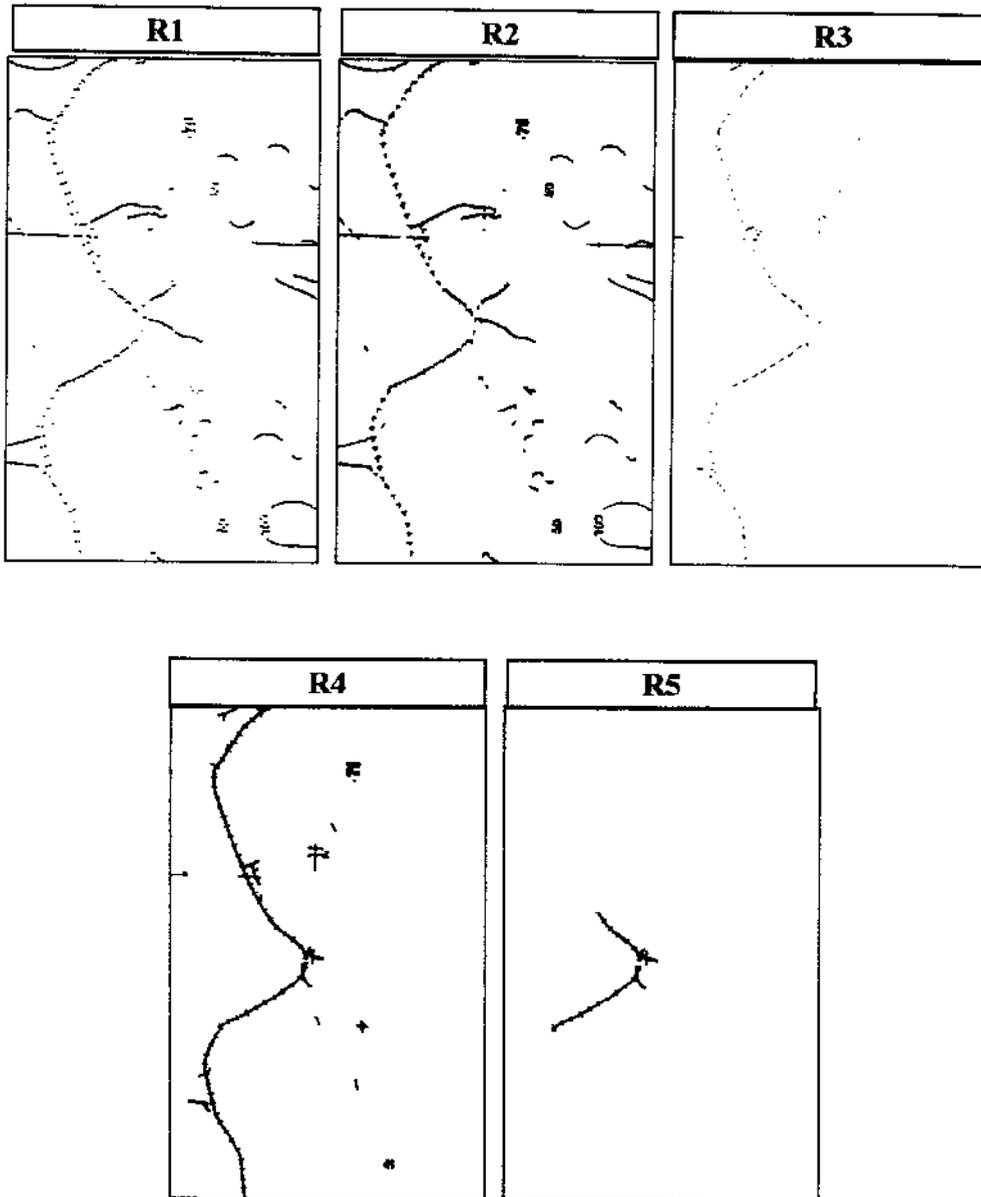


Figura 4.25 - Resultados intermediários da função ferrovia para a direção $d=2$ aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (b).

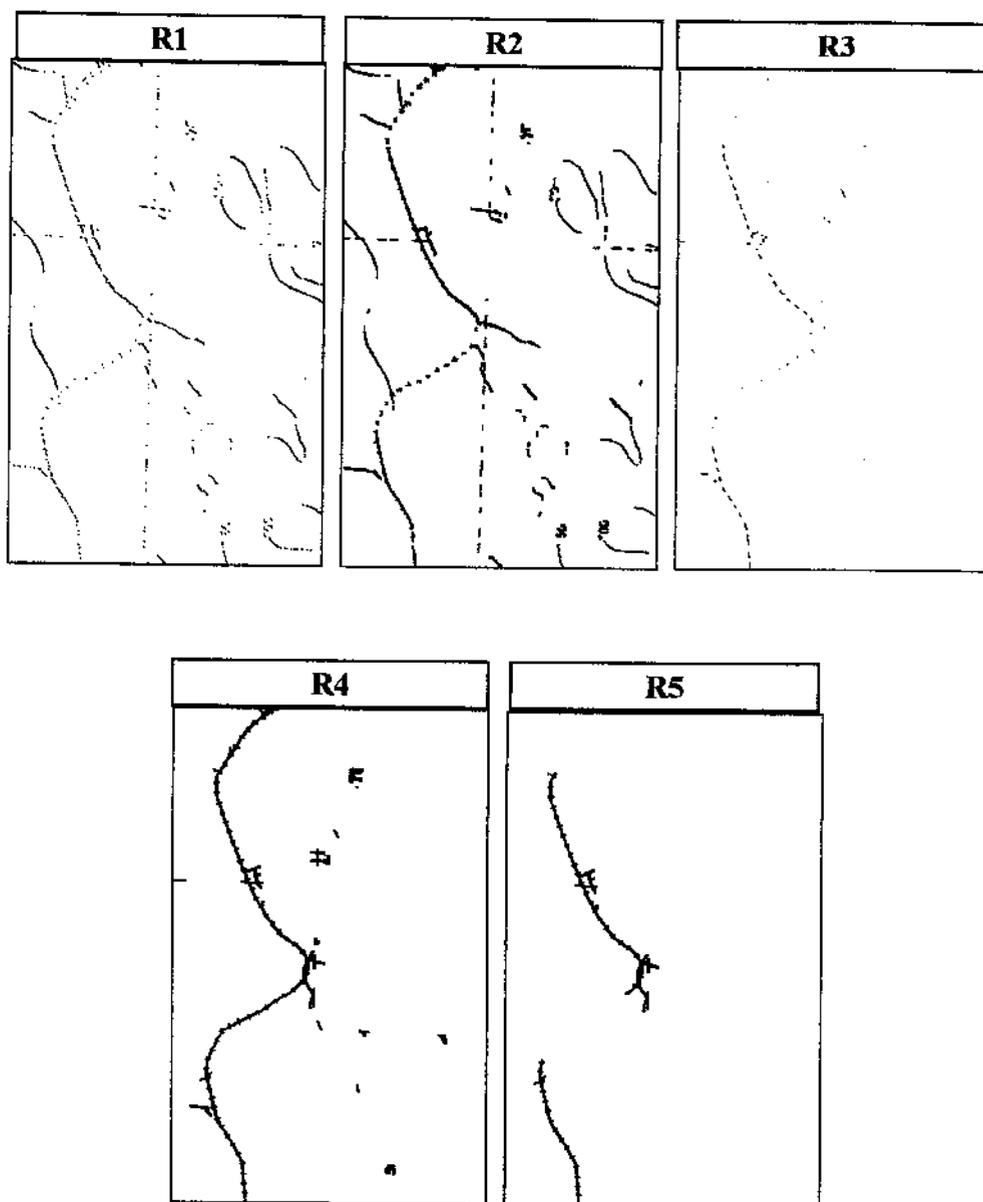


Figura 4.26 - Resultados intermediários da função ferrovia para a direção $d=3$ aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (b).



Figura 4.27 - Resultado final da aplicação da função ferrovia sobre a imagem da Figura 4.2(b).

4.3.3.3 Isolinhas

As isolinhas são componentes que contêm informações sobre a área náutica mapeada na carta. O processo de segmentação destas componentes é dificultado pelo fato de possuírem formas e tamanhos variados. A característica comum entre elas é a espessura que, por sua vez, pode se confundir com a das coordenadas. Assim, o processo de segmentação destas componentes deve levar em conta a espessura das linhas e outras componentes de mesma espessura. A função para a segmentação das isolinhas é dada por:

$$f_d^{isolinhas} = D_*^{15L_d} (E^{15L_d} (E^{15L_d} (D_{f^{longas}}^{15L_d} (E^{2B} (D^B (f_d^{paralelas} \cap \overline{f^{ferrovia}} \cap \overline{f^{coord}}))))))$$

Eq 4.22

A figura 4.28 apresenta a indicação dos resultados intermediários da função isolinhas.

$$\begin{array}{r}
 \begin{array}{l}
 \text{R 5} \\
 \text{R 4} \\
 \text{R 3} \\
 \text{R 2}
 \end{array} \\
 f_d^{isolinhas} = D_*^{15L_d} (E^{15L_d} (E^{15L_d} (D_{f\text{longas}}^{15L_d} (E^{2B} (D^B (\\
 \begin{array}{l}
 \text{R 5} \\
 \text{R 4} \\
 \text{R 3} \\
 \text{R 2}
 \end{array} \\
 \begin{array}{l}
 \text{R 1} \\
 \left. f_d^{paralelas} \cap f_{ferrovia} \cap f_{coord} \right) \right) \right) \right) \right) \right)
 \end{array}$$

Figura 4.28 - Indicação dos resultados intermediários da função isolinhas.

A função *isolinhas* considera inicialmente a função *paralelas*, que contém todas as linhas longas e paralelas. A seguir, são eliminadas deste conjunto outras componentes, tais como coordenadas e estrada de ferro (R1). As operações de dilatação e erosão seguintes eliminam componentes longas que não têm a mesma espessura das isolinhas (R2 e R3). As operações finais conectam as linhas quebradas eliminando descontinuidades e em seguida eliminam resíduos (R4 e R5).

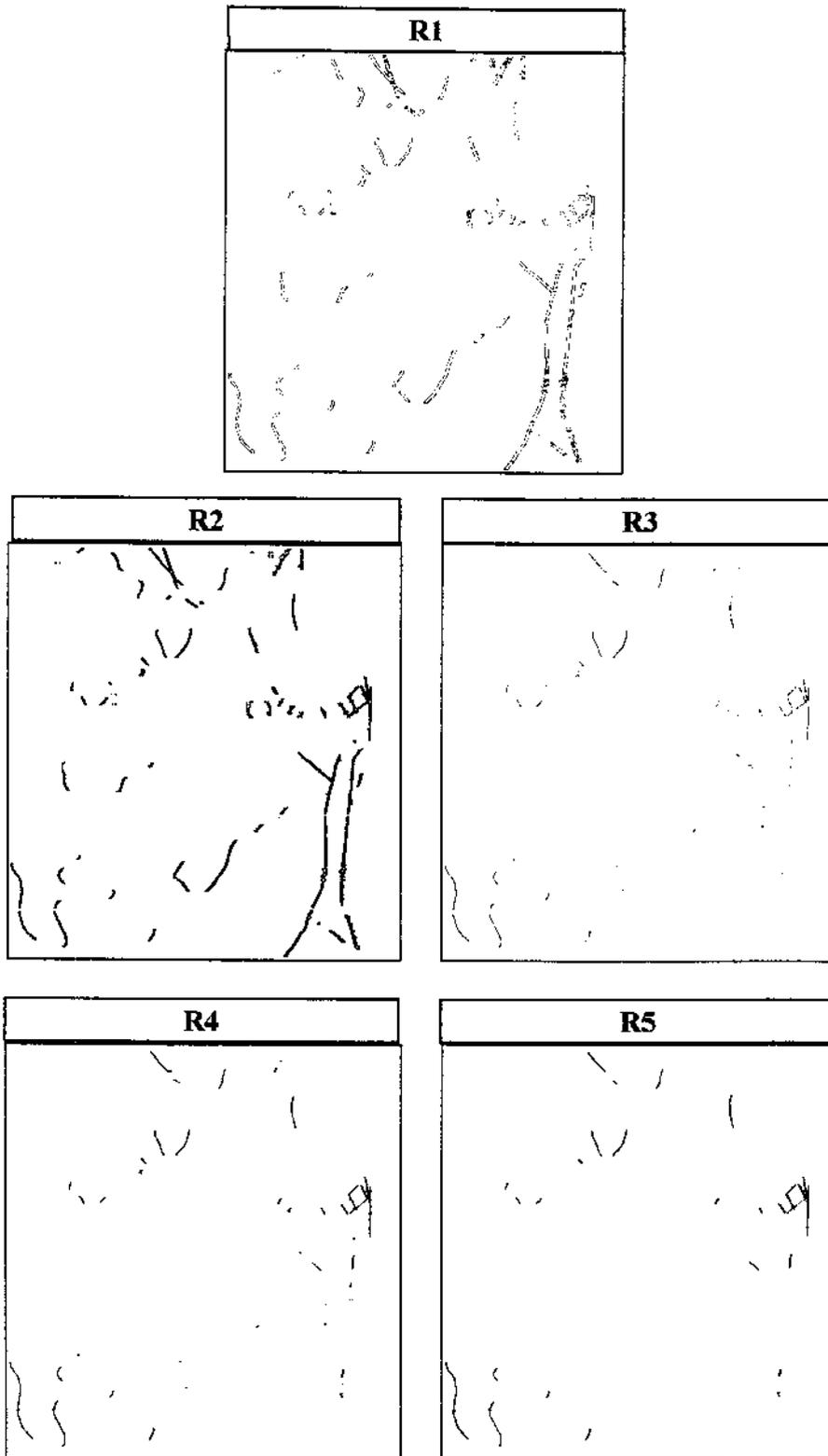


Figura 4.29 - Resultados intermediários da função isolinhas para a direção $t=0$
 ($f_0^{isolinhas}$) aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (a).

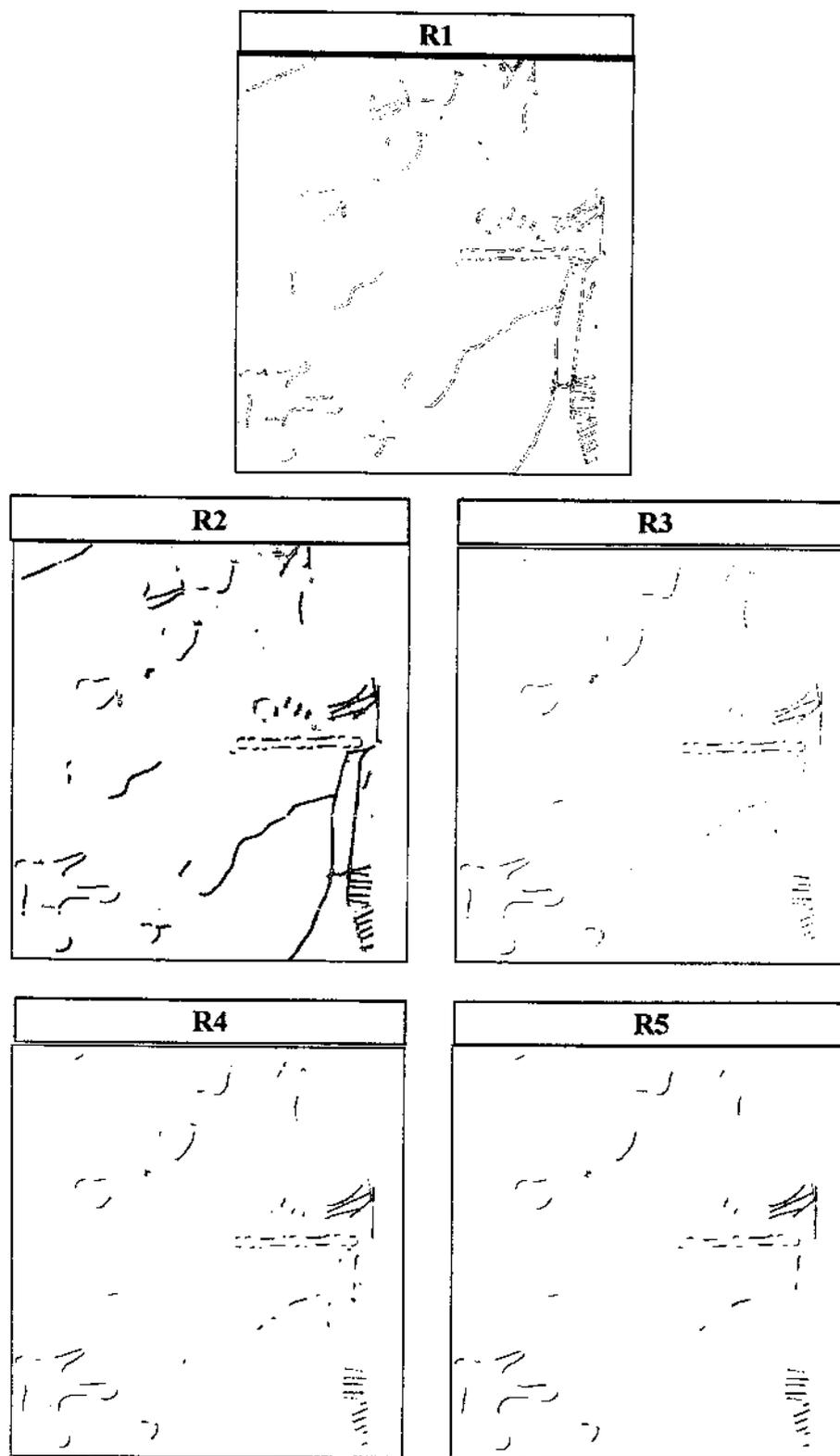


Figura 4.30 - Resultados intermediários da função isolinhas para a direção $d=1$ ($f_1^{isolinhas}$) aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (a).

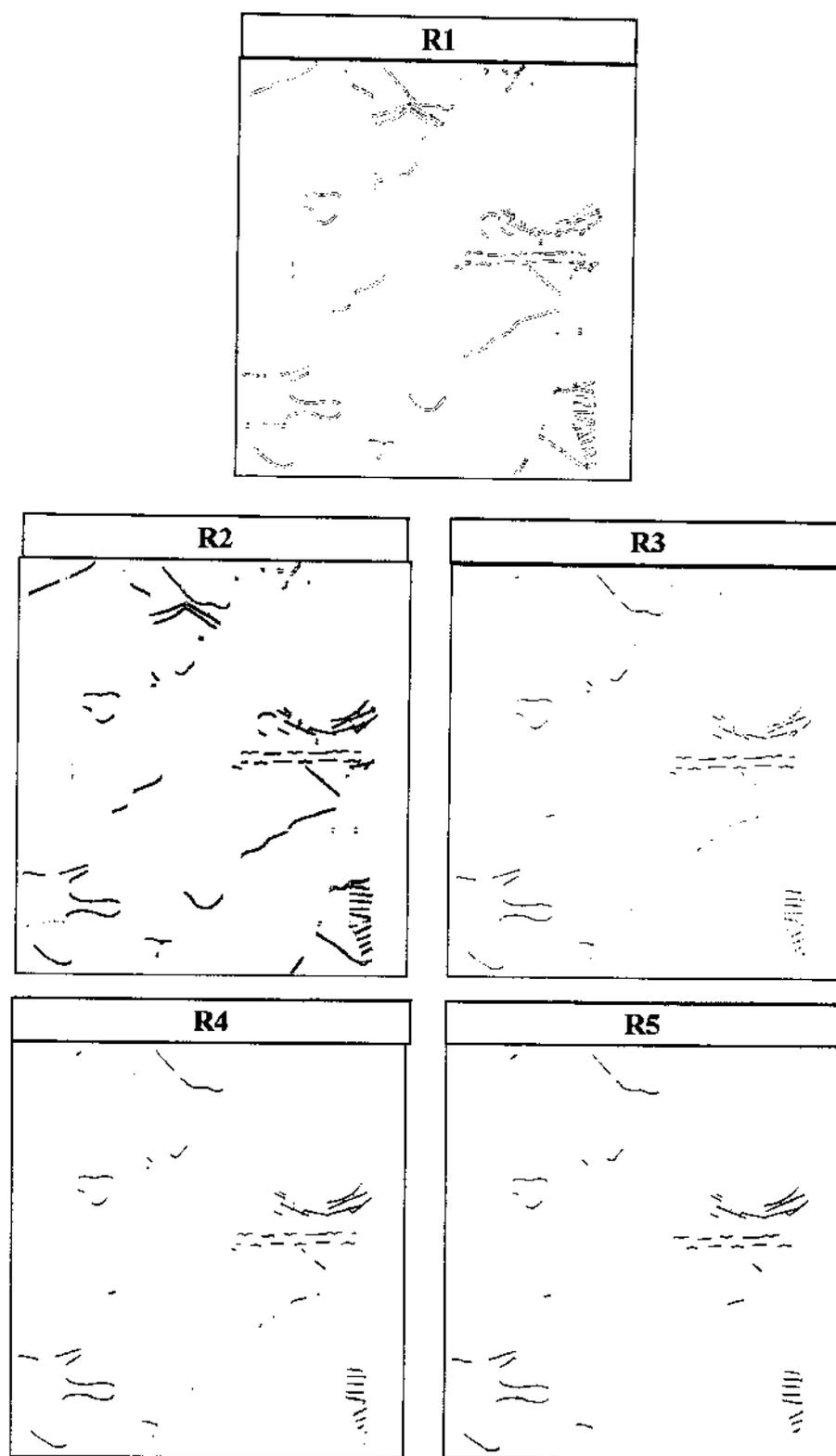


Figura 4.31 - Resultados intermediários da função isolinhas para a direção $d=2$ ($f_2^{isolinhas}$) aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (a).

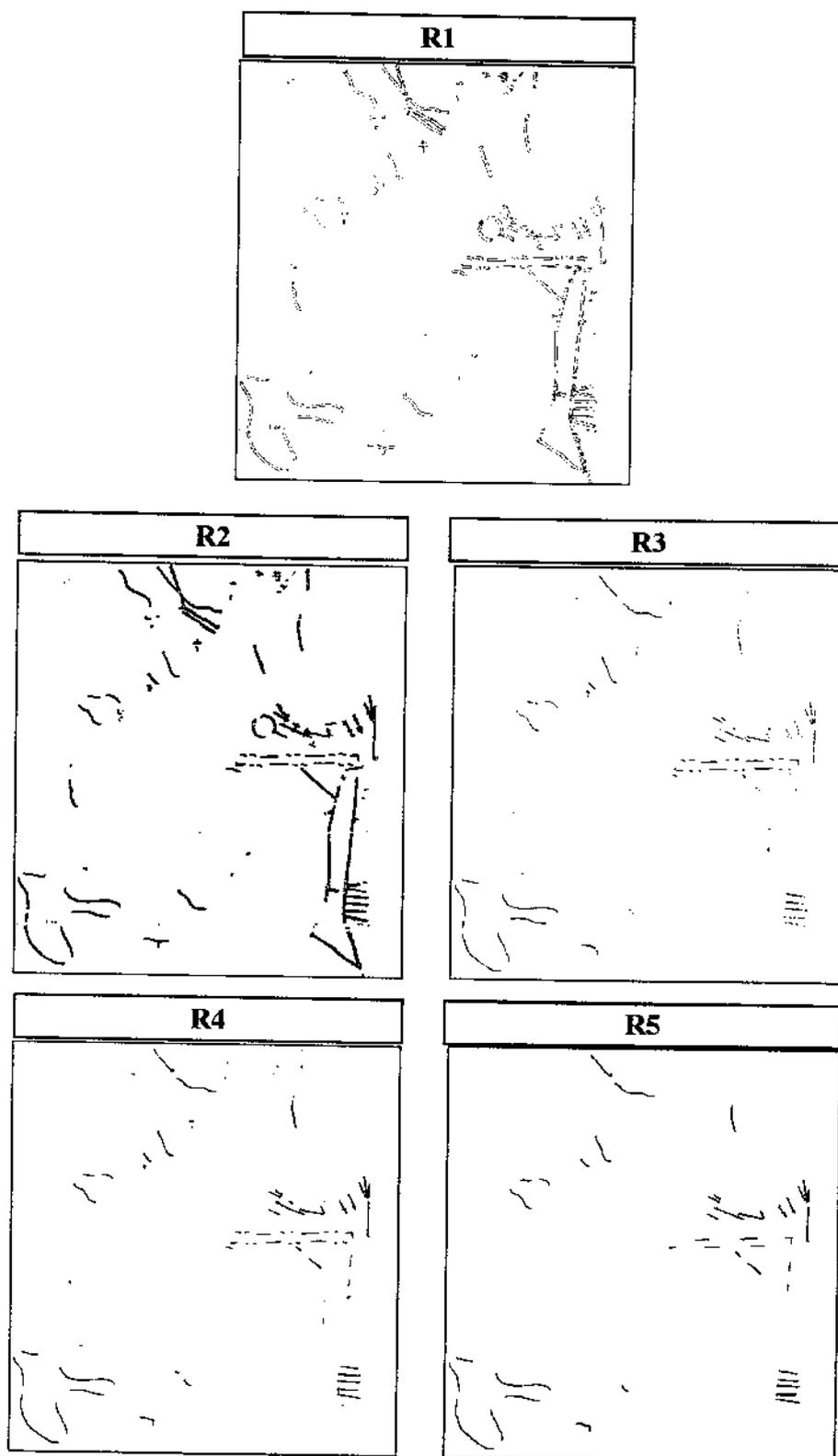


Figura 4.32 - Resultados intermediários da função isolinhas para a direção $d=3$ ($f_3^{\text{isolinhas}}$) aplicada sobre a amostra da Figura 4.2 (a).

A Figura 4.33 apresenta o resultado final da função *isolinhas*.

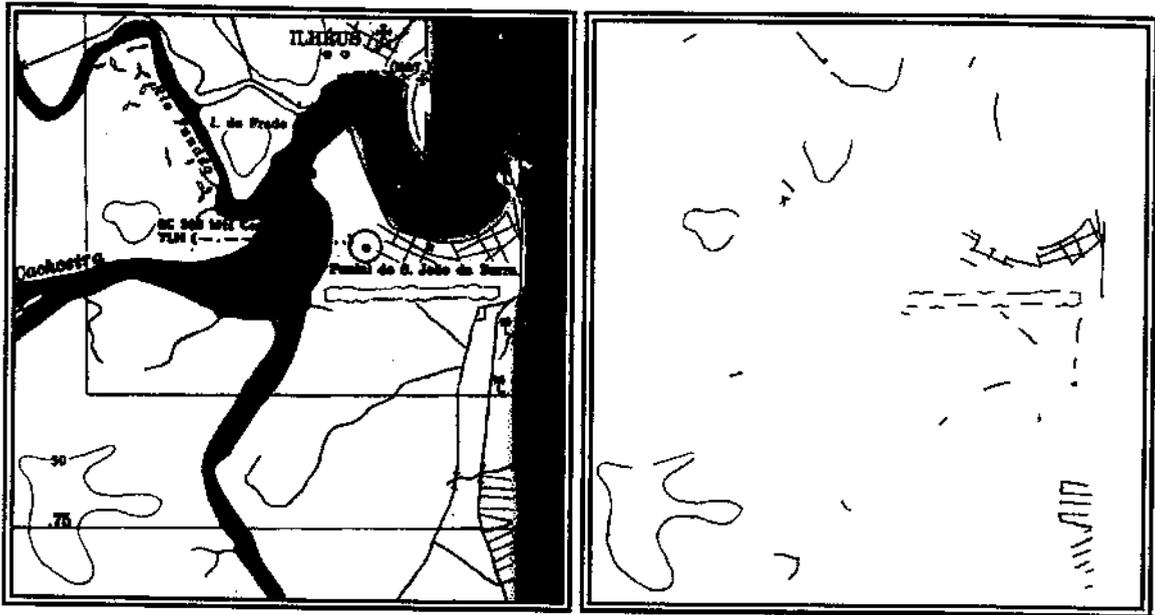


Figura 4.33- Isolinhas extraídas pela função *isolinhas* aplicada sobre a imagem da Figura 4.2(a).

A imagem resultante da função *isolinhas* pode conter resíduos de outras componentes (Figura 4.33). A função *isolinhas_ref* filtra esta imagem considerando que essas componentes são objetos contínuos, relativamente grandes e de forma variada.

$$f^{isolinhas_ref} = D_{f^{isolinhas}}^{200B} \left(\bigcup_{d=0,2} D_*^{4L_d} (E^{4L_d} \left(\bigcup_{d=0,2} (D_{f^{isolinhas}}^{70B} (E^{35L_d} (f_d^{isolinhas})))) \right) \cap \overline{f_d^{isolinhas}} \right)$$

Eq 4.23

A aplicação da função *isolinhas_ref* à amostra da Figura 4.33 pode ser vista na Figura 4.34, em que podemos observar a menor quantidade de resíduos de outras componentes.

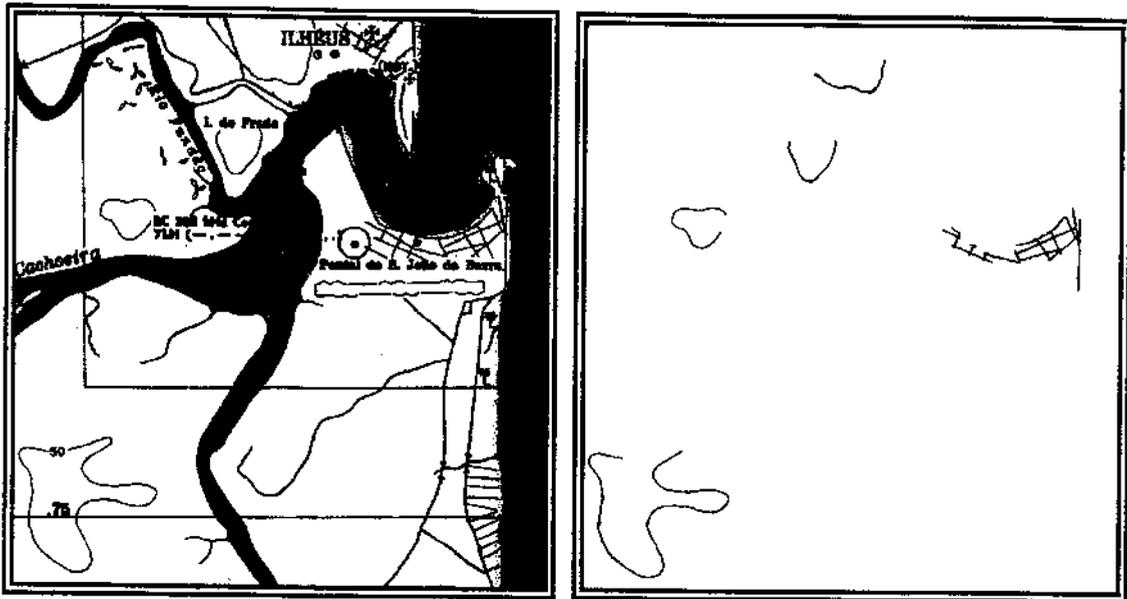


Figura 4.34 - Aplicação da função *isolinhas_ref* sobre a imagem da Figura 4.33.

4.3.3.4 Canais

Os canais são percursos de água, representados nas cartas náuticas por linhas longas e espessas, ligados a lagos, rios e praias. A espessura dos canais é diferente das isolinhas e esta característica é levada em consideração na sua segmentação. A função *canais* é dada por:

$$f^{canais} = D_{f^{longas}}^{6B} \left(\bigcup_{d=0}^3 D_*^{15L_d} \left(E^{15L_d} \left(f^{longas} \cap \overline{f^{isolinhas}} \cap \overline{f^{ferrovia}} \cap \overline{f^{coord}} \right) \right) \right) \quad Eq\ 4.24$$

O resultado da aplicação da função *canais* à amostra da Figura 4.2(a) é apresentado na Figura 4.35. A presença de resíduos pode ser maior ou menor, dependendo da quantidade e da complexidade de outras componentes interconectadas. Essa interconexão é um dos fatores que dificulta o processo de segmentação desse tipo de componente.

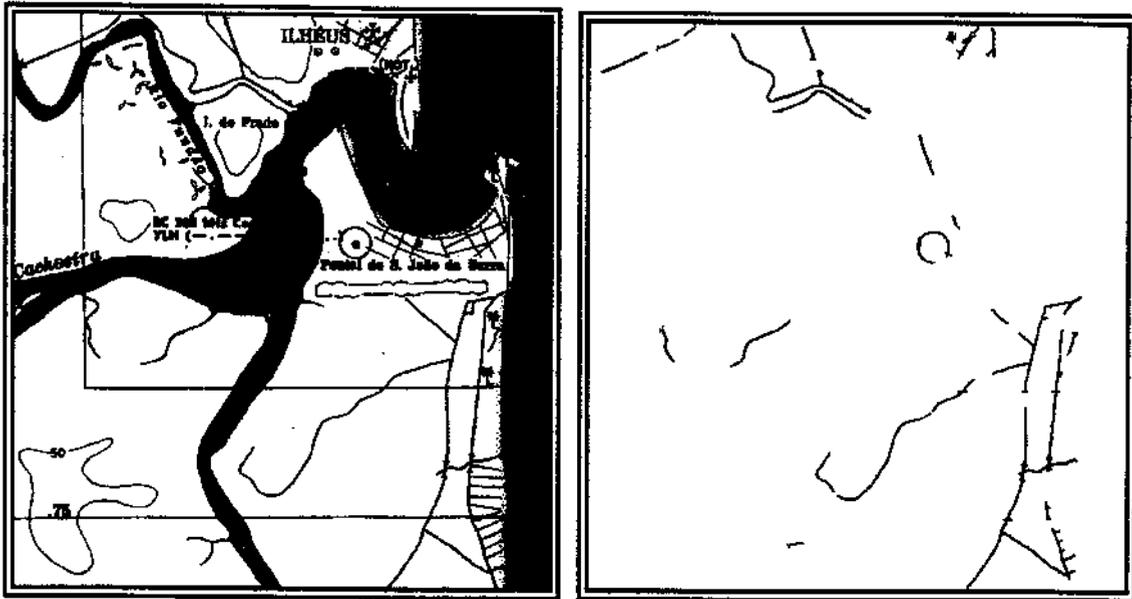


Figura 4.35 - Imagem resultante da aplicação da função canais sobre a imagem 4.2(a).

4.3.3.5 Prédios

Os símbolos são componentes importantes em uma carta náutica por representarem objetos de interesse para a navegação. Através dos símbolos é possível localizar, por exemplo, faróis, igrejas, antenas de rádio, praias e prédios, numa determinada região.

Na imagem da Figura 4.2(b), observamos a existência de dois pequenos retângulos preenchidos. Estes retângulos correspondem à representação de prédios em imagens de cartas náuticas. Estas componentes podem ser extraídas através de um conjunto de aberturas, como a seguir:

$$f^{predios} = b \cap \overline{f^{filtragem_inicial}} \cap \bigcup_{d=0}^3 D_*^{30L_d} (E^{30L_d} (b \cap \overline{f^{filtragem_inicial}}))$$

Eq 4.25

Os resultados intermediários da aplicação da função *prédios* podem ser vistos na figura 4.36 e a imagem resultante pode ser vista na Figura 4.37.

Inicialmente subtraímos a imagem resultante da função filtragem inicial, da imagem original, obtendo assim, uma imagem onde estão presentes todas as componentes espessas sem resíduos conectados a elas (R1). A seguir aplicamos uma abertura de tamanho igual a 30 visando eliminar as componentes prédios (R2). Finalmente subtraímos o resultado R2 do resultado R1 obtendo assim uma imagem onde estão presentes somente as componentes prédios (R3).

$$f^{prédios} = b \cap \overline{f^{filtragem_inicial}} \cap \left(\bigcup_{d=0}^3 D_{\star}^{30L_d} (E^{30L_d} (b \cap \overline{f^{filtragem_inicial}})) \right)$$

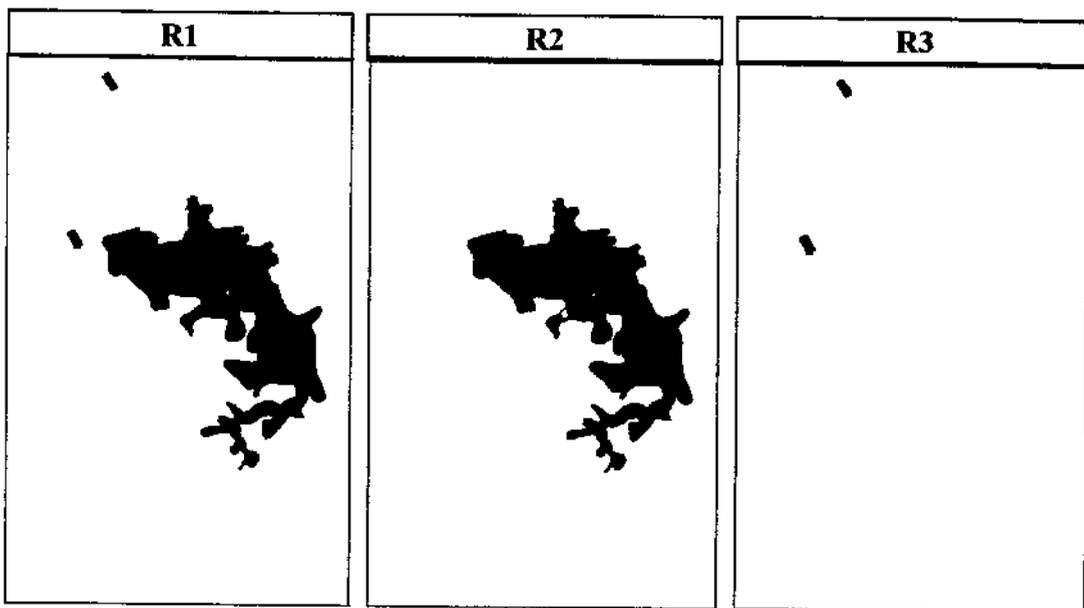


Figura 4.36 - Resultados intermediários da aplicação da função *prédios* sobre a imagem da figura 4.2(b).

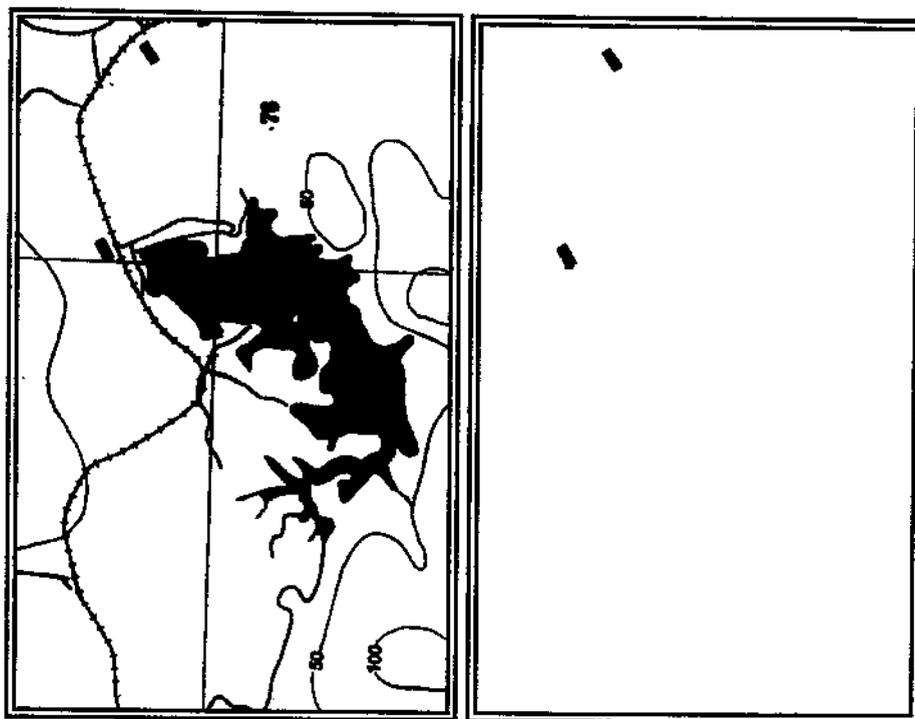


Figura 4.37 - Aplicação da função *prédios* sobre a imagem da Figura 4.2(b).

4.3.3.6 Antenas de Rádio

Um outro exemplo de extração de símbolo considerado aqui, refere-se a antenas de rádio. Essas antenas indicam posições de uma determinada região onde é possível a comunicação por rádio. Estes símbolos são representados por pequenos círculos contendo um ponto no seu centro (Figura 4.2(a)). A função de segmentação dessas antenas é dada por:

$$\underline{\underline{f^{a1} = Hthick(f^{curtas})}}$$

Eq 4.26

$$\underline{\underline{f^{a2} = Hthin(E^B(f^{a1} \cup H^{E1}(f^{a1})))}}$$

Eq 4.27

$$\underline{\underline{f^{antenas} = D_{f_{curtas}}^B D^{2B} (f^{a2} \cap H^{E2} (f^{a2}))}} \quad \text{Eq 4.28}$$

onde,

$$E1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad E2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

A Figura 4.38 a seguir indica os resultados parciais da função *antenas* e a Figura 4.39 ilustra os resultados parciais da aplicação da função *antenas* sobre uma pequena parte da imagem da Figura 4.2(a).

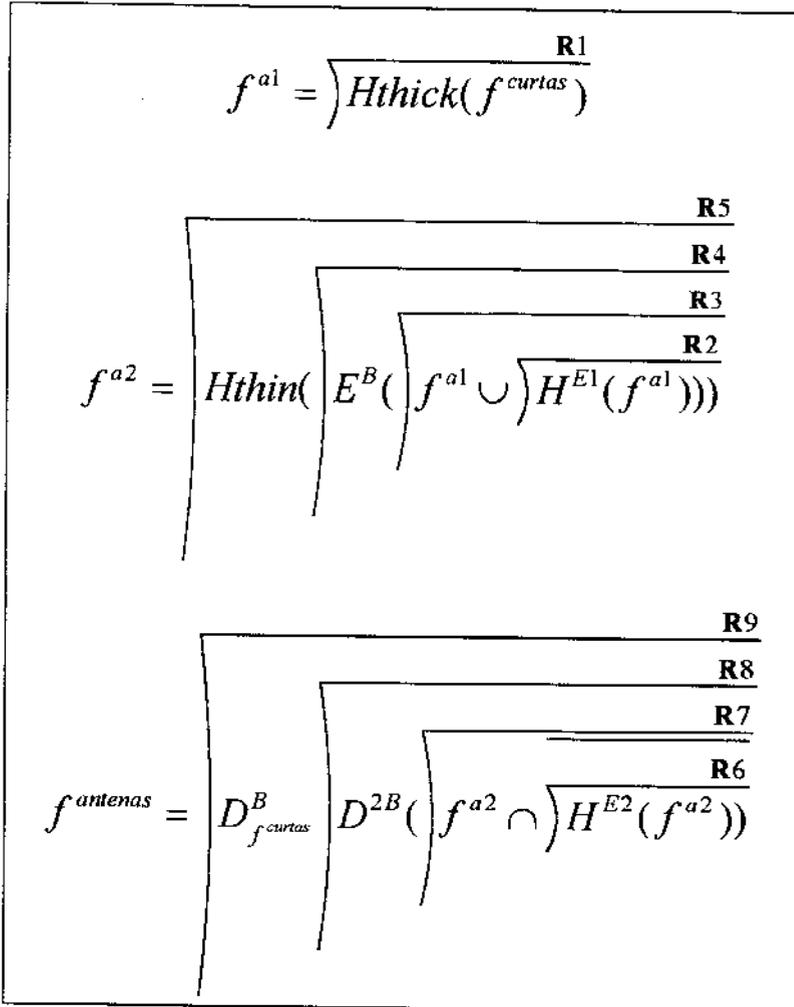


Figura 4.38 - Indicação dos resultados parciais da função *antenas*

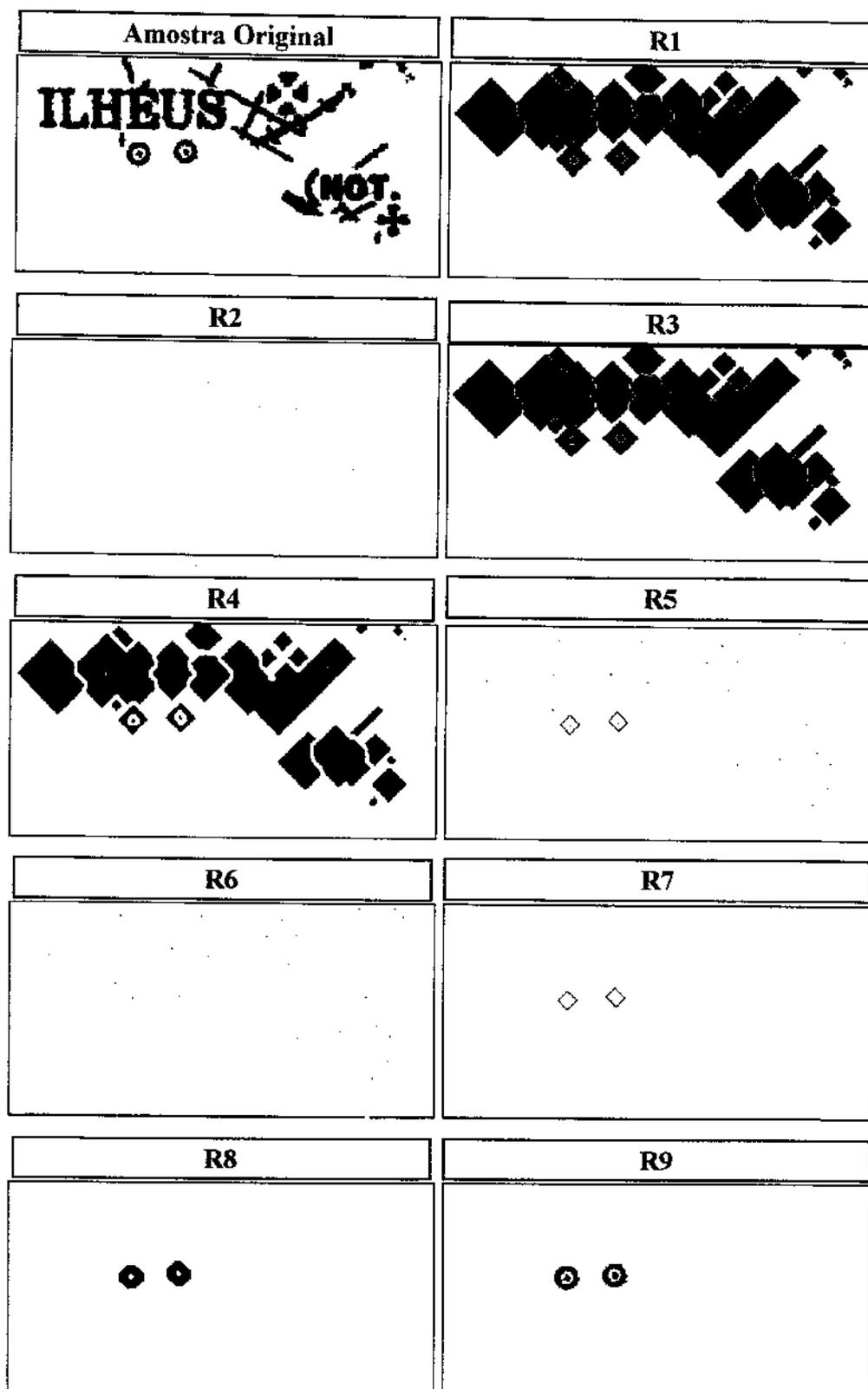


Figura 4.39 - Resultados parciais da aplicação da função antenas sobre uma pequena parte da amostra da imagem 4.2(a)

Inicialmente é aplicado um espessamento homotópico (H_{thick}) até a idempotência (seção 3.4.2) resultando em pseudo envoltórios convexos, pois preserva a homotopia das componentes. As antenas ficarão com um pequeno círculo interno não preenchido e os contornos fechados não preenchidos ficarão com um ponto isolado não preenchido (R1).

A função $a2$ (Eq 4.27) preenche estes pontos isolados (R2 e R3) e aplica uma erosão que elimina os falsos contornos fechados que podem aparecer durante o espessamento (R4). A seguir é aplicado um afinamento homotópico até a idempotência (H_{thin}) que afina as antenas sem alterar a sua forma e transforma as outras componentes em pontos isolados (R5).

A função *antenas* (Eq 4.28) elimina os pontos isolados (R6 e R7) e restaura as antenas (R8 e R9).

A seguir, na Figura 4.40, temos o resultado da aplicação da função *antenas* à amostra da Figura 4.2(a).

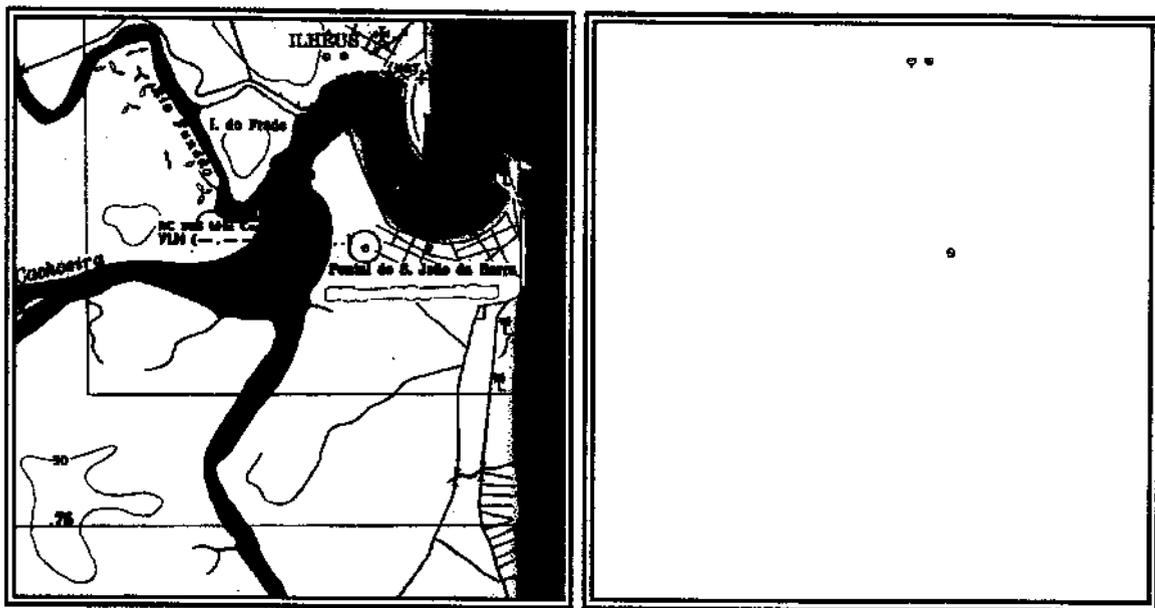


Figura 4.40 - Imagem resultante da aplicação da função *antenas* à imagem da Figura 4.2(a).

4.3.3.7 Caracteres

Os caracteres alfanuméricos fazem parte da grande quantidade de informações contidas numa carta náutica. Estes caracteres podem ter diversos tamanhos e formatos e estar conectados a outras componentes. A função *caractere* é dada por:

$$f^{caractere} = D_b^{8B} (D_{f^{curtas}}^{8B} (E^{13B} (D^{8B} (f^{curtas} \cap f^{filtra_aresta}))))) \cap \overline{f^{antenas}}$$

Eq 4.29

O método inicial utilizado baseia-se na formação de sequência de caracteres ou cadeias. Neste caso, caracteres completamente isolados podem não ser devidamente segmentados.

Os resultados intermediários da aplicação da função *caractere* sobre a imagem da Figura 4.2(a) podem ser vistos na Figura 4.41 (a) e 4.41 (b) e o resultado final da aplicação desta função sobre às imagens das figuras 4.2(a) e 4.2(b) é apresentado na Figura 4.42.

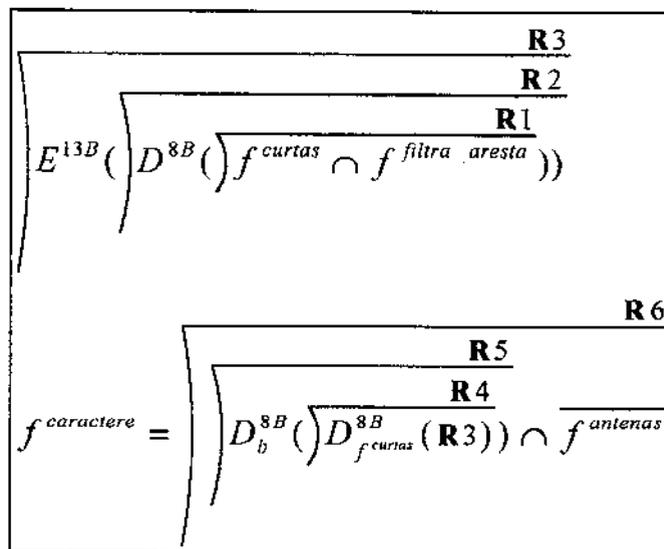


Figura 4.41 (a) - Indicação dos resultados intermediários da função caractere.

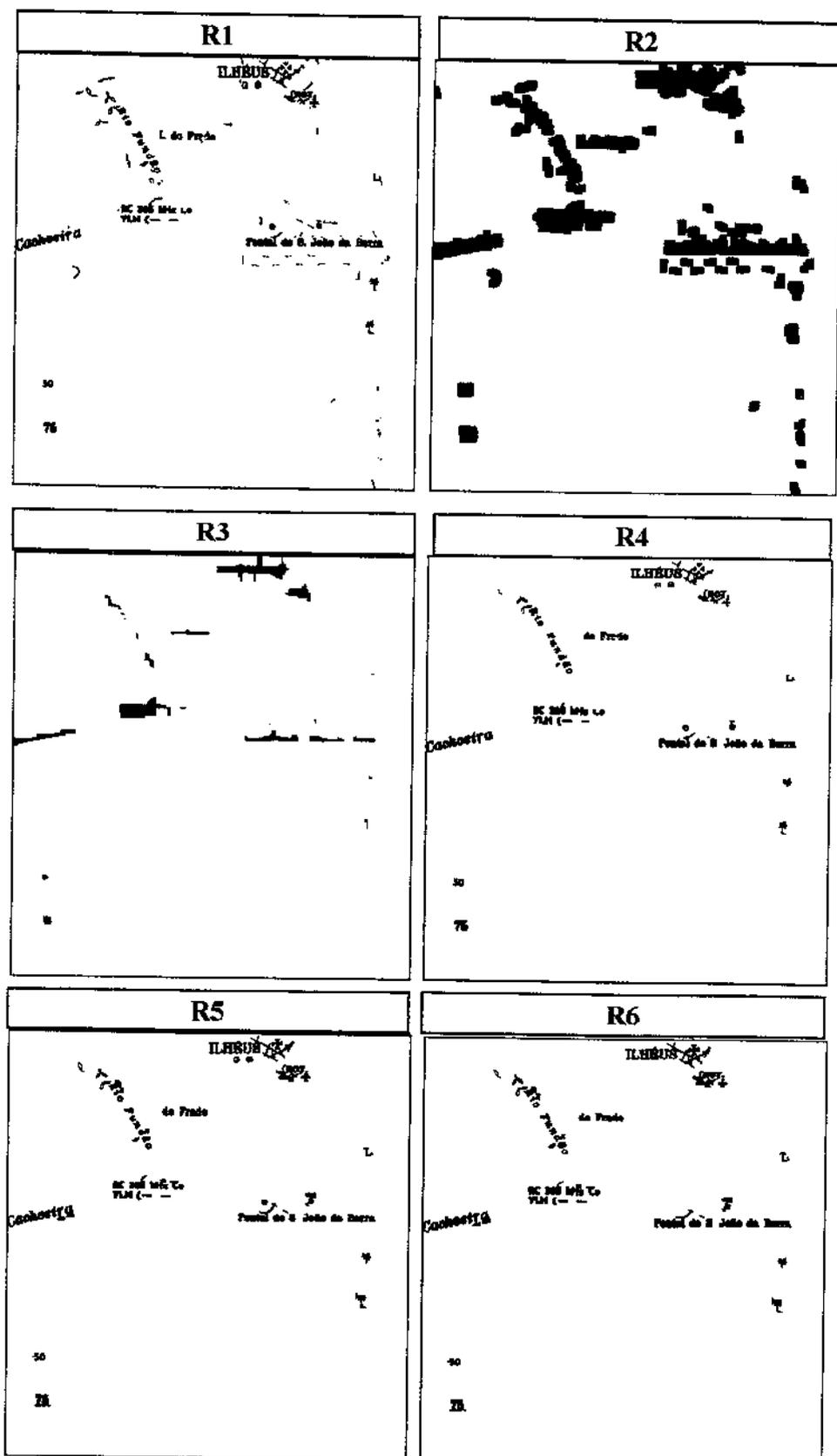


Figura 4.41 (b) Resultados intermediários da aplicação da função caractere sobre a amostra da Figura 4.2(a).

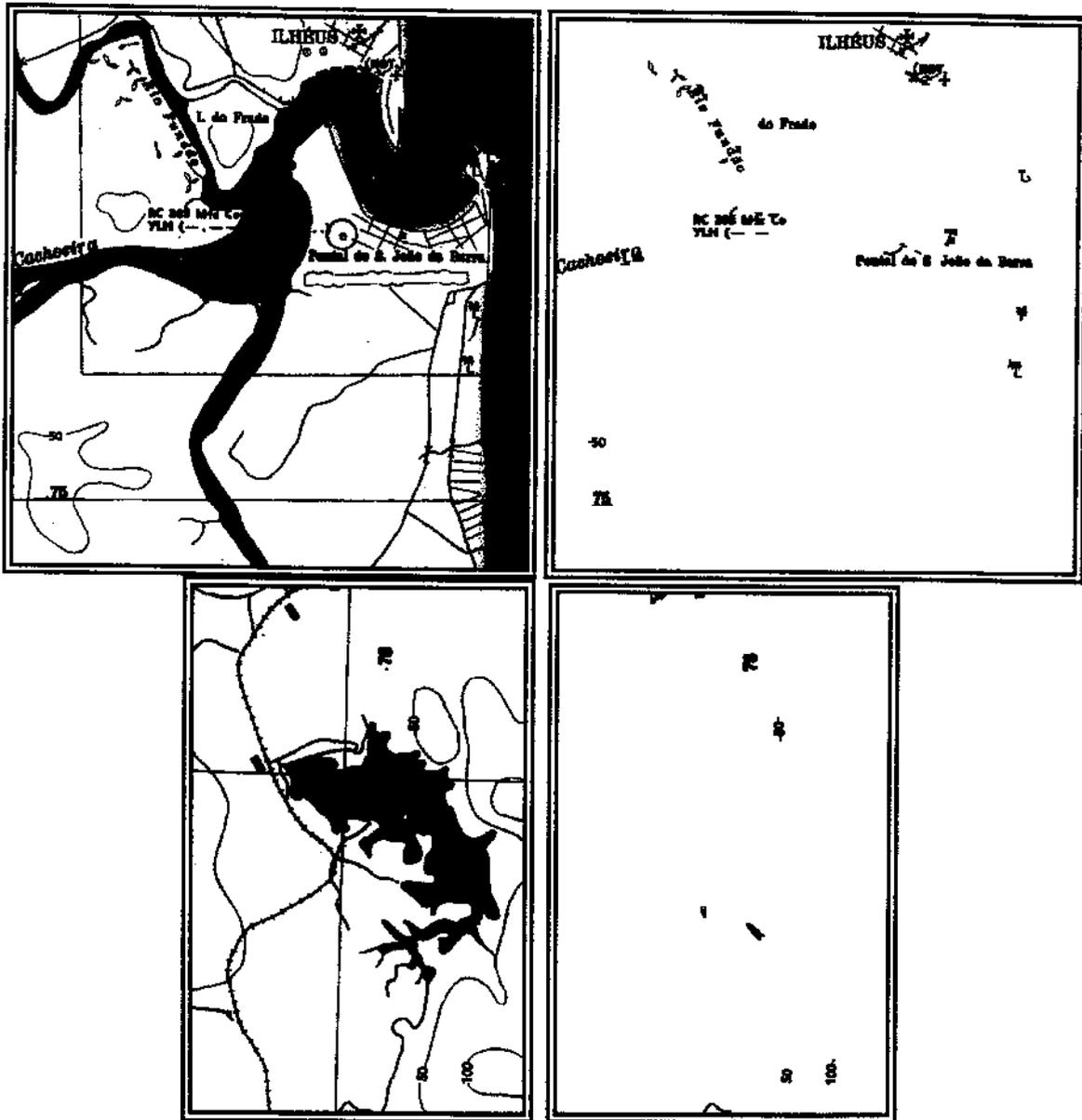


Figura 4.42 - Função caractere aplicada sobre as amostras das Figuras 4.2(a) e 4.2(b).

4.3.3.9 Lagos, rios e praias

As lagoas, rios e praias presentes na imagem de cartas náuticas podem ser segmentadas através da seguinte função morfológica:

$$f_{\text{lagos_e_rios}} = b \cap f_{\text{filtragem_inicial}} \cap f_{\text{predios}} \quad \text{Eq 4.30}$$

O resultado da função *lagos_e_rios* aplicada sobre as amostras das Figuras 4.2 (a) e 4.2 (b) pode ser visto abaixo. Observe que esta função representa um refinamento da função *espessas*.



Figura 4.43 - Resultado da aplicação da função *lagos_e_rios* sobre as amostras das Figuras 4.2 (a) e 4.2 (b).

4.4 Outros exemplos

Esta seção ilustra o resultado das funções desenvolvidas neste trabalho a outras amostras de cartas náuticas.

Amostra 1

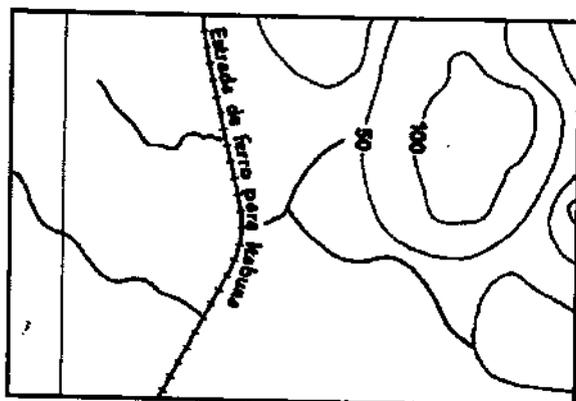


Figura 4.44 - Imagem original (amostra 1)

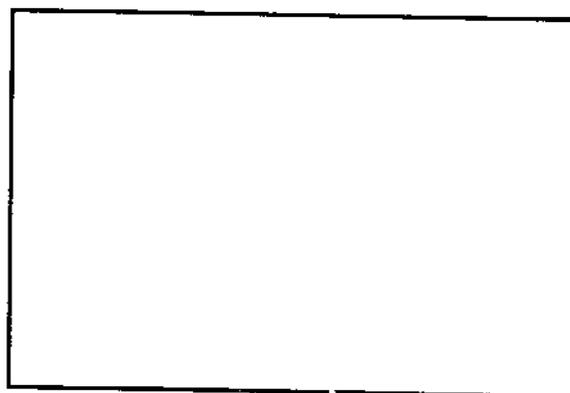


Figura 4.45 - Lagos e Rios (amostra 1)

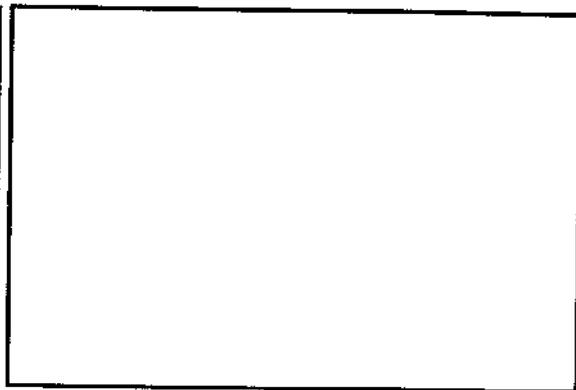


Figura 4.46 - prédios (amostra 1)

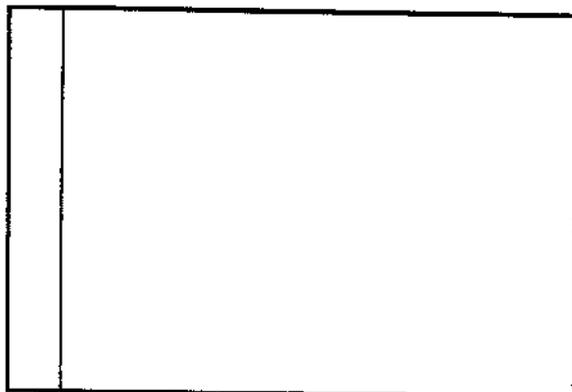


Figura 4.47 - Coordenadas (amostra 1)

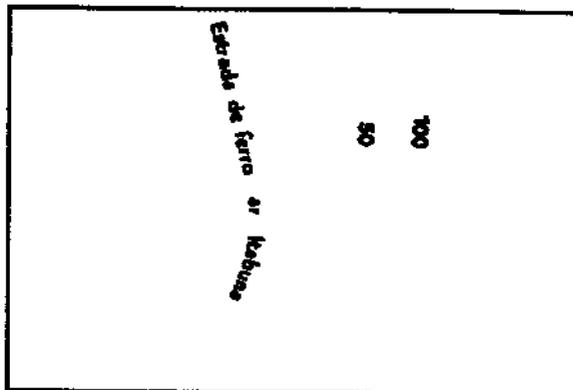


Figura 4.48 - Caracteres (amostra 1)

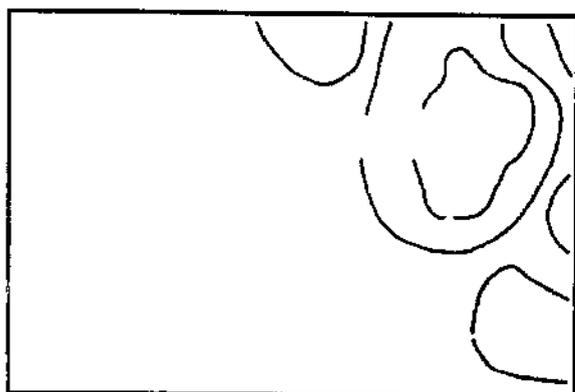


Figura 4.49 - Isolinhas (amostra 1)

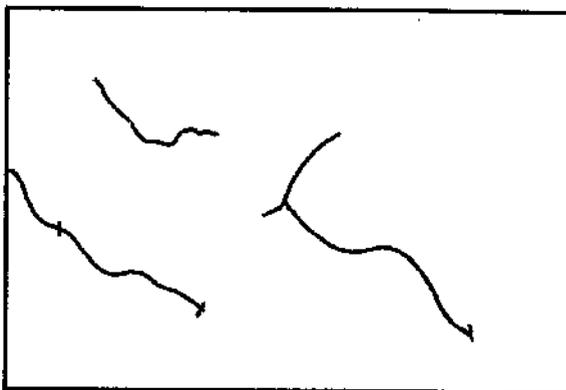


Figura 4.50 - Canais (amostra 1)

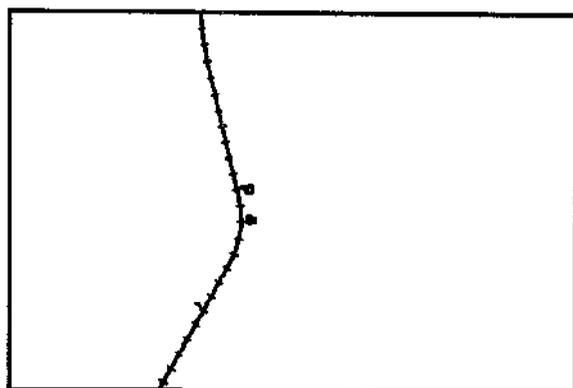


Figura 4.51 - Ferrovia (amostra 1)

Amostra 2

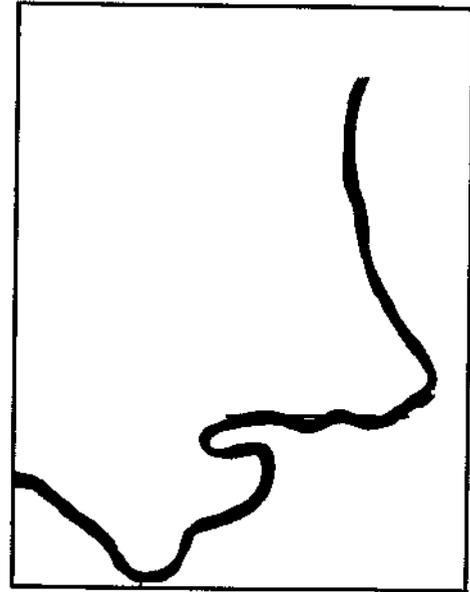


Figura 4.52 - Imagem original (amostra 2) Figura 4.53 - Lagos e Rios (amostra 2)

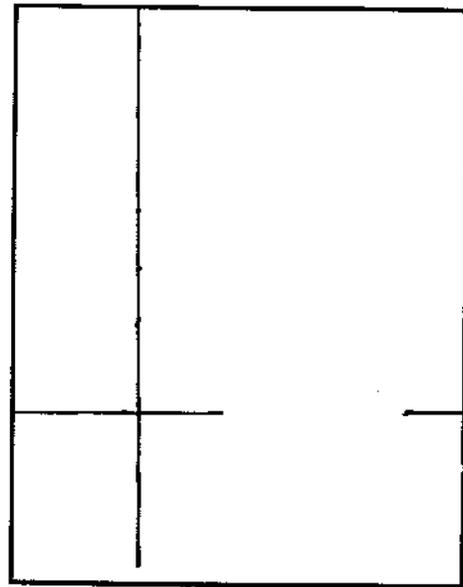
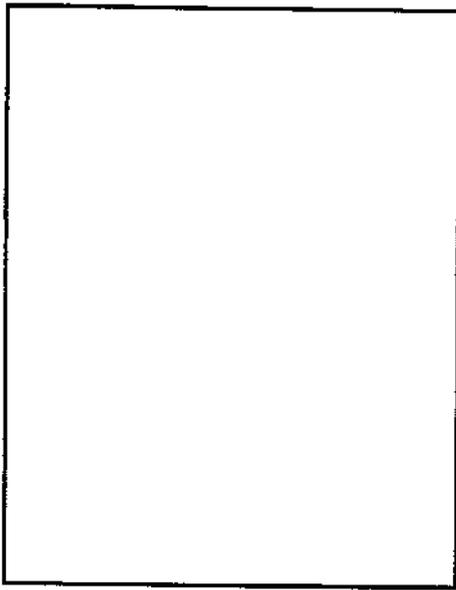


Figura 4.54 - Prédios (amostra 2)

Figura 4.55 - Coordenadas (amostra 2)

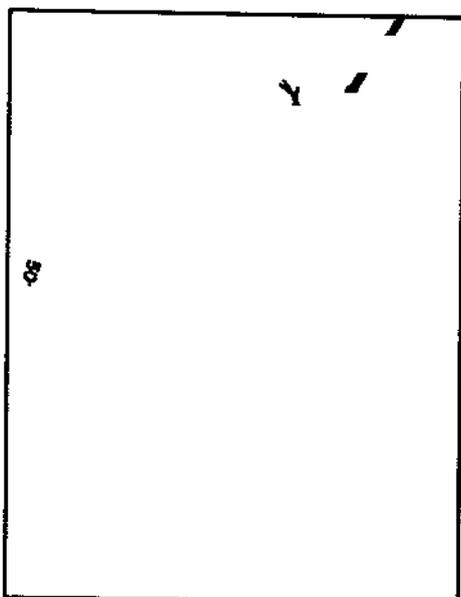


Figura 4.56 - Caracteres (amostra 2)

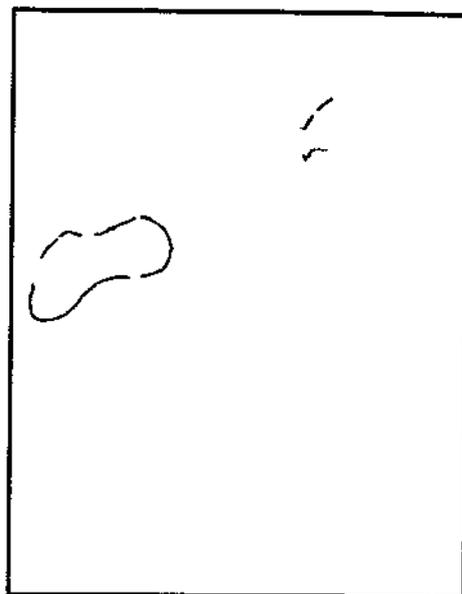


Figura 4.57 - Isolinhas (amostra 2)



Figura 4.58 - Canais (amostra 2)

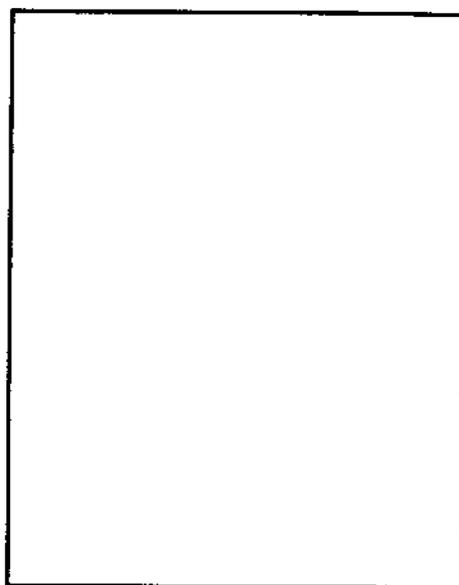


Figura 4.59 - Ferrovia (amostra 2)

Amostra 3



Figura 4.60 - Imagem original (amostra 3)



Figura 4.61 - Lagos e rios (amostra 3)

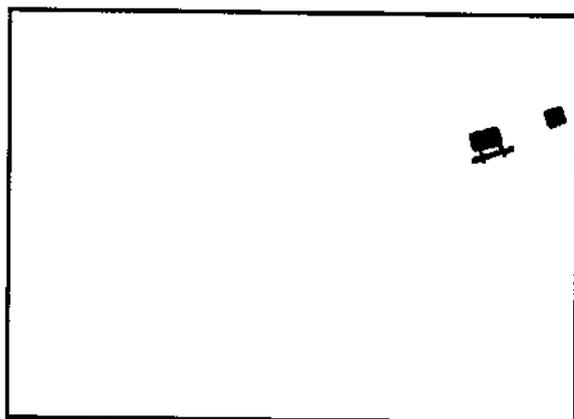


Figura 4.62 - Prédios (amostra 3)

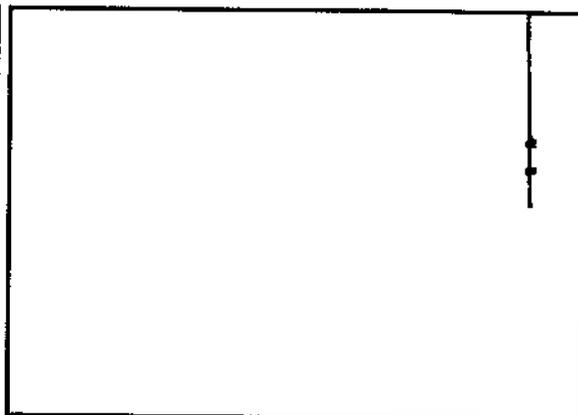


Figura 4.63 - Coordenadas (amostra 3)

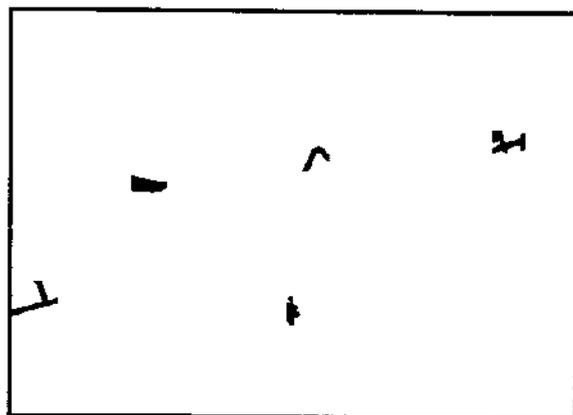


Figura 4.64 - Caracteres (amostra 3)

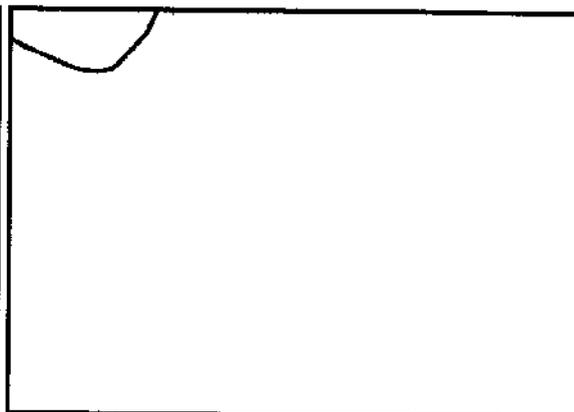


Figura 4.65 - Isolinhas (amostra 3)

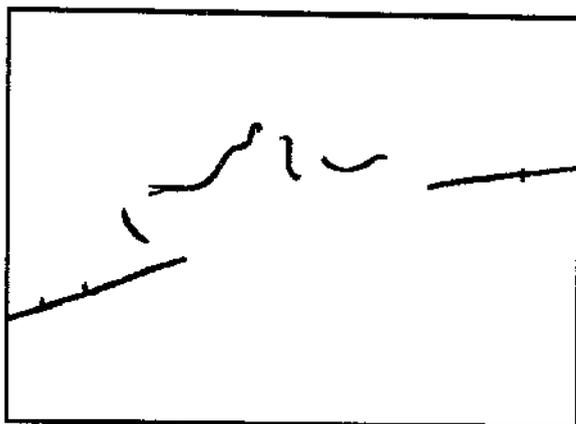


Figura 4.66 - Canais (amostra 3)

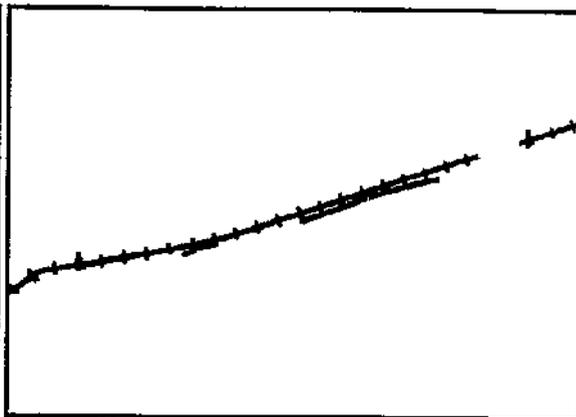


Figura 4.67 - Ferrovia (amostra 3)

Amostra 4

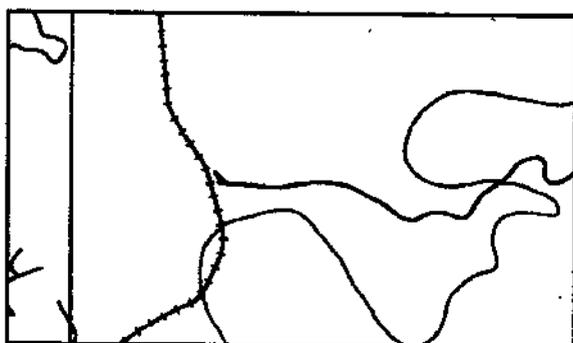


Figura 4.68 - Imagem original (amostra 4)

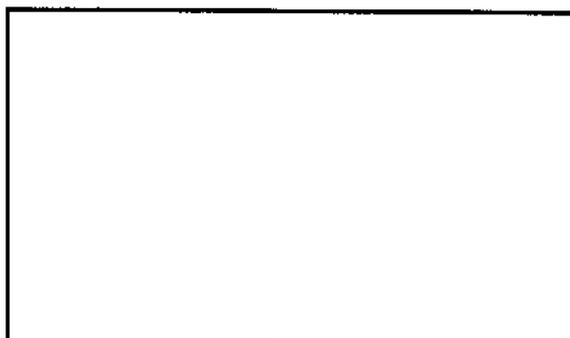


Figura 4.69 - Lagos e rios (amostra 4)



Figura 4.70 - Prédios (amostra 4)

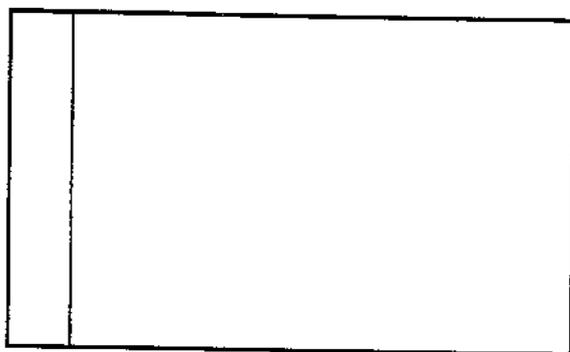


Figura 4.71 - Coordenadas (amostra 4)

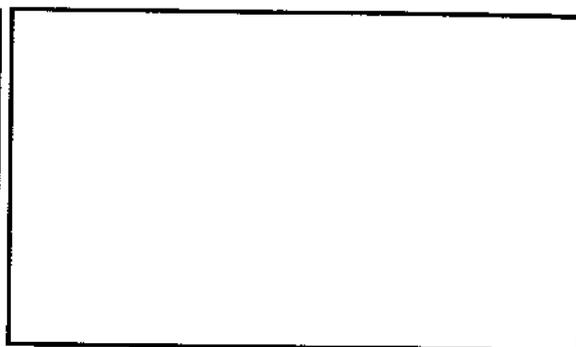


Figura 4.72 - Caracteres (amostra 4)



Figura 4.73 - Isolinhas (amostra 4)

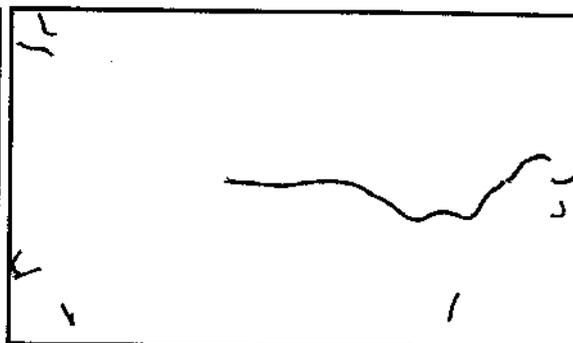


Figura 4.74 - Canais (amostra 4)

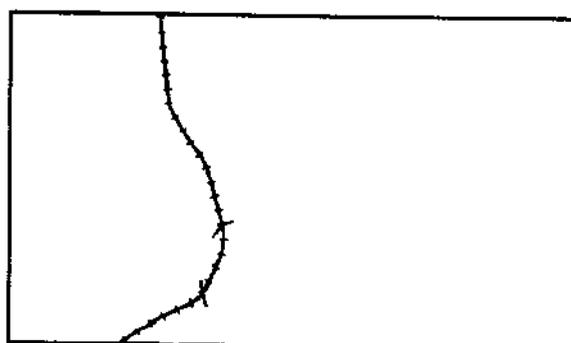


Figura 4.75 - Ferrovia (amostra 4)

Amostra 5

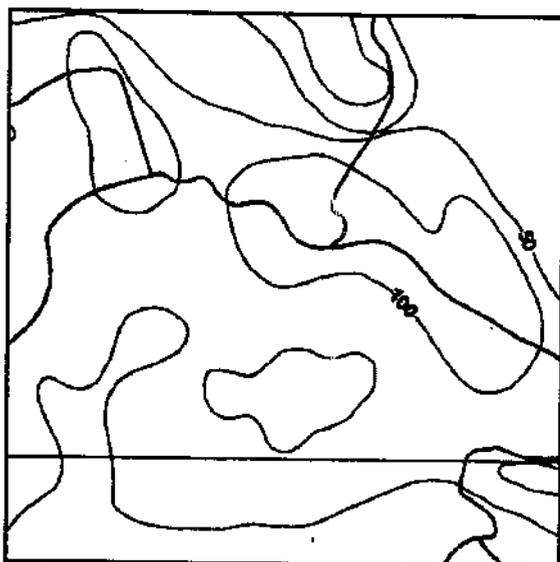


Figura 4.76 - Imagem original (amostra 5)

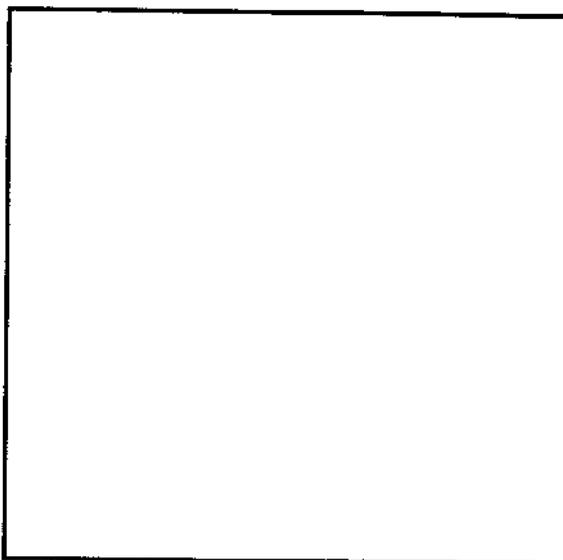


Figura 4.77 - Lagos e rios (amostra 5)

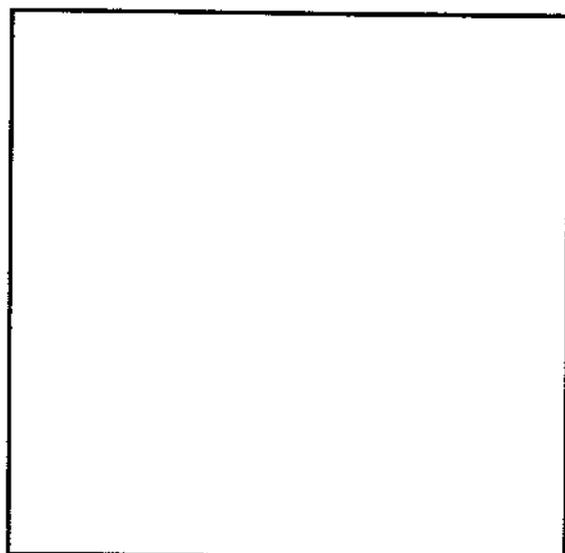


Figura 4.78 - Prédios (amostra 5)

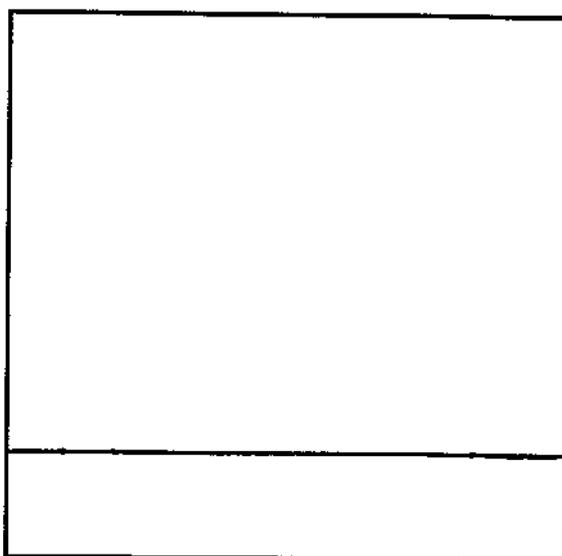


Figura 4.79 - Coordenadas (amostra 5)

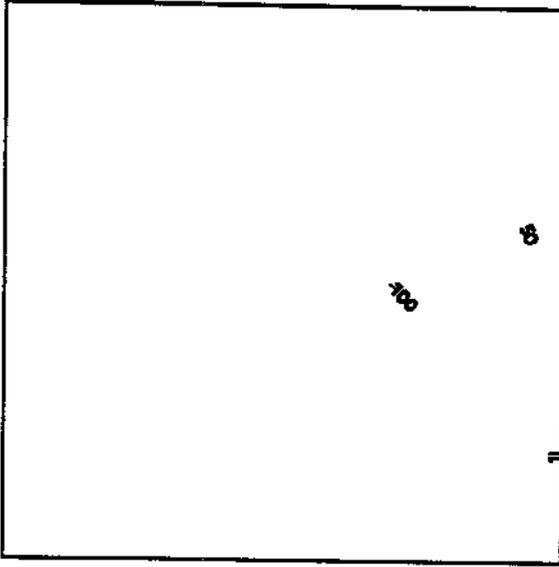


Figura 4.80 - Caracteres (amostra 5)

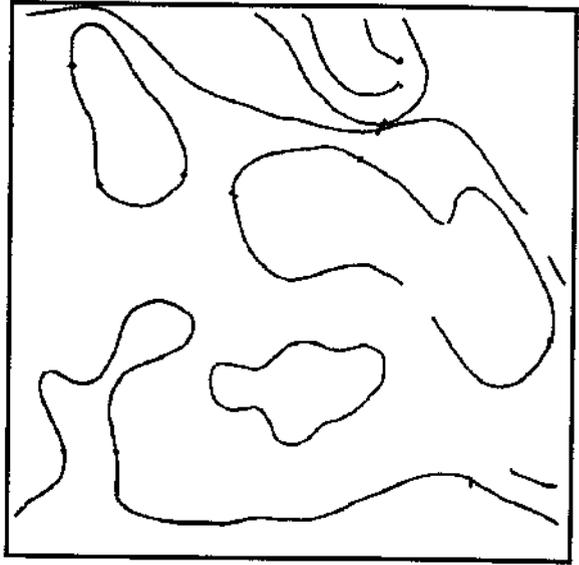


Figura 4.81 - Isolinhas (amostra 5)

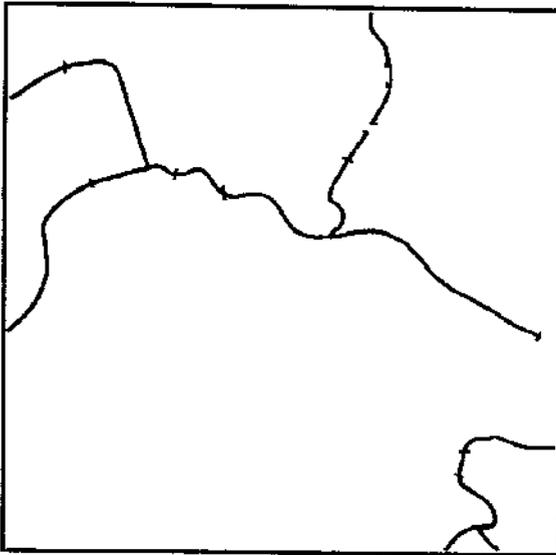


Figura 4.82 - Canais (amostra 5)

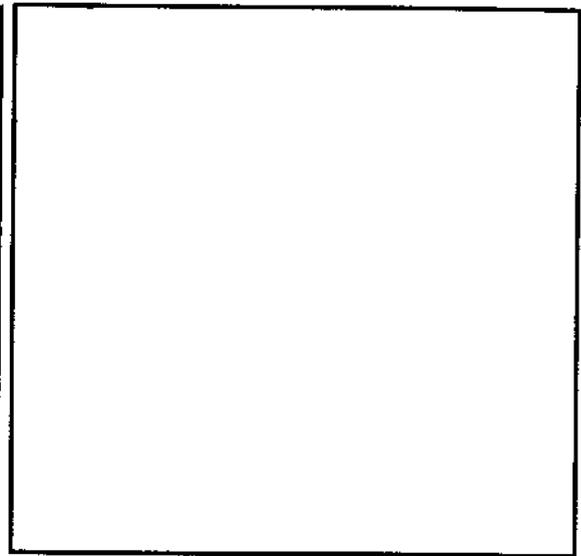


Figura 4.83 - Ferrovia (amostra5)

Capítulo 5

Conclusão

Neste trabalho abordamos o problema da segmentação de componentes de cartas náuticas a partir da teoria da Morfologia Matemática, diretamente relacionada com a análise/descrição de formas em imagens.

Foi desenvolvido em C++ um conjunto de funções para cartas em escala de 1:50000 e resolução de 300 dpi. Todas as transformações complexas utilizam como base as operações morfológicas de erosão e dilatação e, como extensão destas, abertura, fechamento, afinamento e espessamento.

As funções específicas desenvolvidas aqui incluem: extração de caracteres alfanuméricos, coordenadas e demarcações, isolinhas, estradas de ferro, prédios, símbolos, canais, rios e lagos. O problema de sobreposição e de não conexidade de algumas componentes segmentadas foi resolvido utilizando-se conceitos de reconstrução geodésica, bastante úteis neste tipo de aplicação.

Uma extensão natural deste trabalho inclui a segmentação das demais componentes e de outros tipos de cartas marítimas visando a obtenção do conjunto das informações indispensáveis a um sistema de cartas náuticas eletrônico, por exemplo. Um outro problema concerne a compatibilidade das operações com mudança de escala. Teoricamente, as operações morfológicas de base são compatíveis com as homotetias (invariância à mudança de escala). Uma avaliação prática, neste sentido, serviria para colocar em evidência a relação entre as funções de segmentação e uma alteração em escala (e/ou resolução) da imagem original.

Apêndice

Funções para a segmentação de cartas náuticas utilizando morfologia matemática

$$f^{espessas} = D_b^{20B}(E^{6B}(b))$$

$$f^{Filtragem_Inicial} = D_b^{15B}(E^B(b \cap \overline{f^{espessas}}))$$

$$f_d^{contorno} = H^{M_d}(f^{principal})$$

$$f^{aresta} = f_d^{contorno} \cap ((f_d^{contorno})_{d-2} \cup (f_d^{contorno})_{d+2})$$

onde $d=0,2,4,6$.

$$f_d^{aresta} = \{f_{d-1}^{contorno} \cap ((f_{d-1}^{contr})_{d-2} \cup (f_{d-1}^{contr})_{d+2})\} \cup \\ \{f_{d+1}^{contorno} \cap ((f_{d+1}^{contr})_{d-2} \cup (f_{d+1}^{contr})_{d+2})\}$$

onde $d=1,3,5,7$.

$$f_d^{filtra_aresta} = D_*^{2L_d}(E^{2L_d}(f_d^{aresta} \cup E^{4L_d}(f_d^{aresta} \cup D_{f_d^{contr}}^{2C_{d-2}}(\\ term_{d-2}(f_d^{aresta})) \cup D_{f_d^{contr}}^{2C_{d+2}}(term_{d+2}(f_d^{aresta}))))))$$

onde, $term_d(X) = X \cap \bigcup_{d-1}^{d+1} E^{B_d}(X)$

$$f_d^{\text{longas_inicial}} = D_*^{15L_d} (E^{15L_d} (f_d^{\text{filtra_aresta}}))$$

$$f_d^{\text{paralelas}} = f^{\text{aresta}} \cap D_{f^{\text{filtragem_inicial}}}^{5L_d} (f^{\text{longas_inicial}}), \quad d=0,1,2,3$$

$$f_d^{\text{longas}} = D_{f^{\text{principal}}}^{2B} (f_d^{\text{paralelas}})$$

$$f^{\text{curtas}} = f^{\text{filtragem_inicial}} \cap \bigcup_{d=0}^3 D_*^{10L_d} (E^{10L_d} (D^{3B} (f^{\text{filtragem_inicial}} \cap \overline{f^{\text{longas}}} \cap \overline{f^{\text{ferrovia}}}))$$

$$f^{\text{coordh}} = D_b^{200J_2} E^{100J_2} (b)$$

$$f^{\text{coordv}} = D_b^{200J_0} E^{100J_0} (b)$$

$$f^{\text{coord}} = D_{f^{\text{filtragem_inicial}}}^{2B} (f^{\text{coordv}} \cup f^{\text{coordh}})$$

$$f^{\text{aux1}} = E^{J_0} E^{J_2} E^{2B} (D^{J_0} D^{J_2} D^B (f^{\text{aresta}} \cap \overline{\bigcup_{d=0}^3 D_*^{20L_d} (E^{20L_d} (E^{J_0} E^{J_2} E^{2B} (D^{J_0} D^{J_2} D^B (f^{\text{aresta}}))))}))$$

$$f^{\text{aux2}} = f^{\text{aux1}} \cap \overline{D_{f^{\text{aux1}}}^{3B} (E^{3B} (f^{\text{aux1}}))}$$

$$f^{ferrovia} = \bigcup_{d=0}^3 (D_*^{50L_d} (E^{50L_d} (D_{f^{filtragem_inicial}}^{15B} (f^{aux2} \cap D_{f^{filtragem_inicial}}^{5B} (f_d^{aresta}))))))$$

$$f^{isolinhas} = D_*^{15L_d} (E^{15L_d} (E^{15L_d} (D_{f^{longas}}^{15L_d} (E^{2B} (D^B (f_d^{paralelas} \cap \overline{f^{ferrovia}} \cap \overline{f^{coord}}))))))$$

$$f^{isolinhas_ref} = D_{f^{isolinhas}}^{200B} \left(\bigcup_{d=0,2} D_*^{4L_d} (E^{4L_d} \left(\bigcup_{d=0,2} (D_{f^{isolinhas}}^{70B} (E^{35L_d} (f_d^{isolinhas})))) \cap \overline{f_d^{isolinhas}} \right) \right)$$

$$f^{canais} = D_{f^{longas}}^{6B} \left(\bigcup_{d=0}^3 D_*^{15L_d} (E^{15L_d} (f^{longas} \cap \overline{f^{isolinhas}} \cap \overline{f^{ferrovia}} \cap \overline{f^{coord}}))) \right)$$

$$f^{predios} = b \cap \overline{f^{filtragem_inicial}} \cap \bigcup_{d=0}^3 D_*^{30L_d} (E^{30L_d} (b \cap \overline{f^{filtragem_inicial}}))$$

$$f^{a1} = Hthick(f^{curtas})$$

$$f^{a2} = Hthin(E^B(f^{a1} \cup H^{E1}(f^{a1})))$$

$$f^{antenas} = D_{f^{curtas}}^B D^{2B}(f^{a2} \cap \overline{H^{E2}(f^{a2})})$$

$$f^{caractere} = D_b^{8B}(D_{f^{curtas}}^{8B}(E^{13B}(D^{8B}(f^{curtas} \cap f^{filtra_aresta})))) \cap \overline{f^{antenas}}$$

$$f^{lagos_e_rios} = b \cap \overline{f^{filtragem_inicial}} \cap \overline{f^{predios}}$$

Bibliografia

- [Banon94] Banon G. J. F. e Barreira J., "*Bases da Morfologia Matemática Para a Análise de Imagens Binárias*", IX Escola de Computação, Recife, 1994.
- [Boatto92] Boatto L. et al, "*An Interpretation System for Land Register Maps*", Computer, July, 1992.
- [Fu81] Fu K. S. and Mui J. K., "*A Survey on Image Segmentation*", Pattern Recognition, No 13, pp 3-16, 1981.
- [Gonzalez77] Gonzalez, R. C. and Wintz P., "*Digital Image Processing*", Addison-Wesley, Mass, 1977.
- [Gor94] Gorman L., "*Document Image Analysis*", IEEE PRESS, 1994.
- [Har87] Haralick R. M. et al, "*Image Analysis Using Mathematical Morphology*", IEEE PAMI, Vol. 9, No. 4, July, 1987.
- [Heij92] Heijmans H. J. A. M., "*Mathematical Morphology: a Geometrical Approach in Image Processing*", Nieuw Archief voor Wiskunde, November, 1992.
- [Kas89] Kasturi R. et al., "*Map data processing in Geographic Information Systems*", Computer, December, 1989.
- [Kurdy89] Kurdy M. B. and Junlin D., "*Directional Mathematical Morphology Operations.*", 5th European Congress for Stereology, September 4-8, 1989, Freiburg.
- [Lan81] Lantuejol C. and Bencher S., "*On the use of Geodesic Metric in Image Analysis*", Journal of Microscopy, Vol. 121, pp 39-49, January, 1981.

- [Lan84] Lantuejol C. and Maisonneuve F., "*Geodesic Methods in Quantitative Image Analysis*", Pattern Recognition, Vol. 17, No. 2, pp. 177-187, 1984.
- [Low91] Low A. , "*Introductory Computer Vision and Image Processing*", McGraw-Hill Book Company, London, 1991.
- [Marques95] Marques C. M., "*Cartas Náuticas Eletrônicas : Operações e Estruturas de Dados*", Dissertação de Mestrado, 1995, IC-UNICAMP.
- [Mus88] Musavi M. T. et al., "*A vision based method to automate map processing*", Pattern Recognition, vol. 21, No. 4, pp 319-326, 1988.
- [Pav77] T. Pavlidis, "*Structural Pattern Recognition*", Springer, New York, 1977.
- [Ros82] Rosenfeld A. and Kak A. C., "*Digital Picture Processing*", volume 2 Academic Press, San Diego, 1982.
- [Russ92] Russ J. C., "*The Image Processing Handbook*", CRC Press, Boca Raton, 1992.
- [Serra82] Serra, J. P. F., "*Image analysis and Mathematical Morphology*", vol 1, Academic Press, London, 1982.
- [Sonka93] Sonka M. et al, "*Image processing, Analysis and Machine Vision*", Chapman & Hall, London, 1993.
- [Suz87] Suzuki S. et al., "*Automatic line drawing recognition of large scale maps*", Optical Engineering, vol. 26, No. 7, July, 1987.
- [Suz90] Suzuki S. and Yamada T., "*MARIS: Map Recognition Input System*", Pattern Recognition, vol. 23, No. 8, pp 919-933, 1990.
- [Varella92] Varella L. E. S. e Braga L. P. V., "*Reconhecimento de Mapas de Isovalores Digitalizados via Scanners*", SIBGRAP V, pp 203-212, 1992.

- [Yam91] Yamada, H. et al., "*Map : Multi-Angled parallelism For Feature Extraction from Topographical Maps*", Pattern Recognition, vol. 24, no. 6, pp. 479-488, 1991.
- [Yam93] Yamada, H., Yamamoto, K. and Hosokama, K., "*Directional Mathematical Morphology and Reformalized Hough transformation for the Analysis of topographic Maps*", IEEE PAMI, vol. 15, no. 4, 1993.