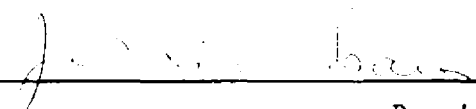




AUTORES AUTHORS	MORFOLOGIA DETEÇÃO BORDAS	PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS		AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY <i>Ralf Gielow</i> Ralf Gielow Pres. Cons. Pós-Graduação	
	AUTOR RESPONSÁVEL RESPONSIBLE AUTHOR <i>Erivaldo Antonio da Silva</i> Erivaldo A. da Silva	DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION ☐ INTERNA / INTERNAL ☒ EXTERNA / EXTERNAL ☐ RESTRITA / RESTRICTED		REVISADA POR / REVISED BY <i>Nelson Mascarenhas</i> Nelson D.A. Mascarenhas	
CDU/UDC 621.376.5				DATA / DATE Dezembro 1989	
TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO INPE-5012-TDL/400			ORIGEM ORIGIN PG/DPI	
	COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE DETETORES DE BORDA MORFOLÓGICOS			PROJETO PROJECT SER	
AUTORES/AUTHORSHIP	Erivaldo Antônio da Silva			Nº DE PAG. NO OF PAGES 141	
				ÚLTIMA PAG. LAST PAGE 86	
VERSÃO VERSION					
Nº DE MAPAS NO OF MAPS					
RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES Em processamento digital de imagens o problema de detecção de bordas é de importância fundamental. Esta dissertação visa estudar o desempenho de detetores de borda propostos pela teoria da morfologia matemática. Em particular, é avaliado o desempenho de seis diferentes tipos de detetores morfológicos conhecidos como "resíduo da erosão" (Ge), "resíduo da dilatação" (Gd), "combinado máximo" (Gmax), "combinado mínimo" (Gmin), "combinado da soma" (Gsum) e "operador de borrramento e mínimo (Gblur). Tais detetores são avaliados visualmente através de imagem simulada e imagens reais de satélite. É apresentada também uma avaliação quantitativa desses detetores com relação ao deslocamento da borda, tanto horizontal como diagonal, e à orientação da borda.					
OBSERVAÇÕES / REMARKS Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, aprovada em 22 de setembro de 1989.					

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Sensoriamento Remoto

Dr. João Vianeí Soares



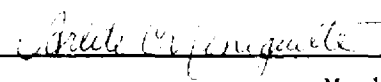
Presidente

Dr. Nelson D.d'Avila Mascarenhas



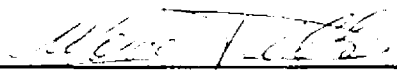
Orientador

Dr^a Arlete A.C. Meneguette



Membro da Banca
-convidada-

Dr. Márcio Rillo



Membro da Banca
-convidado-

Candidato: Erivaldo Antonio da Silva

São José dos Campos, 22 de setembro de 1989

*Para os meus amigos,
para minha mãe Hilda
e
para minha irmã Lúcia*

*"Tudo que é feito com incentivo e
amor fica no planeta e só pode dar
bons frutos".*

Erivaldo Antonio da Silva

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação exprime todo um trabalho realizado, o qual não poderia ter chegado ao fim, não fosse as facilidades de uso dos equipamentos no meio onde foi realizado e, não fosse o apoio e incentivo humano recebido. Duas pessoas tiveram um papel fundamental ao longo deste trabalho e merecem todo o meu respeito e amizade, são elas: Júlio Cesar Lima D'Alge, que, desde o início, me acompanhou em toda a caminhada incentivando como amigo até que o trabalho fosse concluído e Sandra Maria Fonseca da Costa, que como amiga e "irmã" se fez presente de forma positiva nos momentos em que o desânimo me abatia por alguns instantes.

Devo fazer um agradecimento especial a uma pessoa que me acompanhou em todas as fases desta dissertação com disposição constante e espírito profissional sempre presente, esta pessoa é o Dr. Nelson Delfino D'Ávila Mascarenhas, que como orientador e amigo merece hoje e sempre o meu carinho, a minha amizade e o meu muito obrigado.

Outras pessoas, não de menor importância, contribuíram de forma direta ou indireta nos resultados finais atingidos, são elas: Equipe do Laboratório de Tratamento de Imagens Digitais no apoio computacional; Akemi Shimasaki na confecção de gráficos, tabelas e figuras; Rosana D.G. de Arantes Gonçalves nos serviços de datilografia e, ao pessoal do DPI.

Também devo mencionar o apoio humano recebido pelos colegas da Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente, que, quando necessário, sempre apoiaram de todas as formas, até que o trabalho chegasse ao fim com bons resultados.

Por último, espero que os resultados alcançados possam ter contribuído de forma satisfatória a todos os profissionais que necessitam detectar bordas em produtos orbitais.

ABSTRACT

The problem of edge detections is of fundamental importance in digital image processing. In this dissertation, the performance of edge detectors derived from mathematical morphology is studied. In particular, the performance of six different types of morphological detectors is evaluated. The detectors are known as "erosion residue" (G_e), "dilation residue" (G_d), "maximum combined" (G_{max}), "minimum combined" (G_{min}), "sum combined" (G_{sum}) and "blur and minimum operator" (G_{blur}). These detectors are visually evaluated through simulated image and real satellite images. Quantitative evaluation of these detectors, with respect to edge shift, both horizontal and diagonal, and edge orientation is also presented.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	xi
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</u>	1
<u>CAPÍTULO 2 - O PROBLEMA DA DETECÇÃO DE BORDAS.....</u>	3
<u>CAPÍTULO 3 - A MORFOLOGIA MATEMÁTICA.....</u>	5
3.1 - Erosão.....	6
3.2 - Dilatação.....	7
<u>CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA UTILIZADA.....</u>	11
<u>CAPÍTULO 5 - DETETORES DE BORDA ESCOLHIDOS.....</u>	15
5.1 - Detetores de borda morfológicos simples.....	15
5.1.1 - Detetor de borda morfológico "resíduo da erosão" (Ge)....	15
5.1.2 - Detetor de borda morfológico "resíduo da dilatação (Gd)..	15
5.1.3 - Combinações dos detetores Ge e Gd.....	16
5.1.3.1 - Detetor de borda morfológico "combinado máximo"(Gmax)..	16
5.1.3.2 - Detetor de borda morfológico "combinado mínimo"(Gmin)..	16
5.1.3.3 - Detetor de borda morfológico "combinado da soma" (Gsum)	17
5.2 - Detetor de borda morfológico "operador de borramento e mínimo" (Gblur).....	17
<u>CAPÍTULO 6 - RESULTADOS VISUAIS OBTIDOS.....</u>	19
6.1 - Imagem original simulada.....	19
6.2 - Imagem original real urbana (aeroporto).....	25
6.3 - Imagem original real rural (pivôs).....	34
<u>CAPÍTULO 7 - RESULTADOS QUANTITATIVOS DO DESEMPENHO DOS DETETORES DE BORDA MORFOLÓGICOS - CASO DE BORDA IDEAL.....</u>	43
7.1 - Caso de borda central com orientação φ	44
7.1.1 - Resultado para detetores de borda morfológicos simples...	45
7.1.2 - Resultado para o detetor "operador de borramento e mínimo" com vizinhança de radiometria constante.....	48

7.1.3 - Resultado para o detetor "operador de borrimento e mínimo" como vizinhança sendo extensão da borda.....	52
7.2 - Caso de borda com orientação fixa e deslocamento variável.	54
7.2.1 - Caso de deslocamento horizontal.....	55
7.2.1.1 - Caso dos detetores de borda morfológicos simples.....	55
7.2.1.2 - Caso do detetor "operador de borrimento e mínimo" deslocamento horizontal com vizinhança de radiometria constante.....	57
7.2.1.3 - Caso do detetor "operador de borrimento e mínimo" com vizinhança sendo extensão da borda.....	60
7.2.2 - Caso de deslocamento diagonal.....	63
7.2.2.1 - Caso dos detetores morfológicos simples.....	63
7.2.2.2 - Resultado do detetor "operador de borrimento e mínimo" com vizinhança de radiometria constante.....	67
7.2.2.3 - Caso do detetor "operador de borrimento e mínimo" com vizinhança sendo extensão da borda.....	71
7.3 - Comentários adicionais.....	74
<u>CAPÍTULO 8 - ANÁLISE DOS RESULTADOS VISUAIS OBTIDOS.....</u>	75
8.1 - Comparação visual entre os detetores de borda morfológicos implementados.....	75
8.1.1 - Imagem original simulada.....	75
8.1.2 - Imagem original real urbana (aeroporto).....	75
8.1.3 - Imagem original real rural (pivôs).....	77
8.2 - Comparação visual dos detetores de borda morfológicos implementados com um detetor convencional.....	78
<u>CAPÍTULO 9 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</u>	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
3.1 - Exemplo do resultado da aplicação dos operadores morfológicos básicos.....	9
5.1 - Valores utilizados na máscara para o borramento.....	17
6.1 - Imagem original simulada.....	19
6.2 - Imagem original real urbana.....	20
6.3 - Imagem original real rural.....	20
6.4 - Borda morfológica "resíduo da erosão" simulada.....	21
6.5 - Borda morfológica "resíduo da dilatação" simulada.....	22
6.6 - Borda morfológica "combinado máximo" simulada.....	22
6.7 - Borda morfológica "combinado da soma" simulada.....	23
6.8 - Imagem original simulada borrada.....	24
6.9 - Borda morfológica "operador de borramento e mínimo" simulada.....	24
6.10 - Borda morfológica em tom de cinza "resíduo da erosão" real urbana.....	26
6.11 - Borda morfológica em tom de cinza "resíduo da dilatação" real urbana.....	26
6.12 - Borda morfológica em tom de cinza "combinado máximo" real urbana.....	27
6.13 - Borda morfológica em tom de cinza "combinado mínimo" real urbana.....	27
6.14 - Borda morfológica em tom de cinza "combinado da soma" real urbana.....	28
6.15 - Borda morfológica binária "resíduo da erosão" real urbana..	29
6.16 - Borda morfológica binária "resíduo da dilatação" real urbana.....	29
6.17 - Borda morfológica binária "combinado máximo" real urbana..	30
6.18 - Borda morfológica binária "combinado mínimo" real urbana..	30
6.19 - Borda morfológica binária "combinado da soma" real urbana..	31
6.20 - Imagem original real urbana borrada.....	32
6.21 - Borda morfológica em tom de cinza "operador de borramento e mínimo" real urbana.....	32

6.22 - Borda morfológica binária "operador de borramento e mínimo" real urbana.....	33
6.23 - Histograma da imagem de borda em tom de cinza Gblur.....	33
6.24 - Histograma da imagem de borda em tom de cinza Gsum.....	34
6.25 - Borda morfológica em tom de cinza "resíduo da erosão" real rural.....	35
6.26 - Borda morfológica em tom de cinza "resíduo da dilatação" real rural.....	35
6.27 - Borda morfológica em tom de cinza "combinado máximo" real rural.....	36
6.28 - Borda morfológica em tom de cinza "combinado mínimo" real rural.....	36
6.29 - Borda morfológica em tom de cinza "combinado da soma" real rural.....	37
6.30 - Imagem original real rural borrada.....	37
6.31 - Borda morfológica em tom de cinza "operador de borramento e mínimo" real rural.....	38
6.32 - Borda morfológica binária "resíduo da erosão" real rural..	39
6.33 - Borda morfológica binária "resíduo da dilatação" real rural.....	39
6.34 - Borda morfológica binária "combinado máximo" real rural...	40
6.35 - Borda morfológica binária "combinado mínimo" real rural...	40
6.36 - Borda morfológica binária "combinado da soma" real rural..	41
6.37 - Borda morfológica binária "operador de borramento e mínimo" real rural.....	41
6.38 - Histograma de borda em tom de cinza Gblur.....	42
6.39 - Histograma de borda em tom de cinza Gsum.....	42
7.1 - Modelo de borda ideal.....	44
7.2 - Modelos de borda para a análise da orientação.....	45
7.3 - Ordenação adotada para os "pixels".....	46
7.4 - Valores originais dos "pixels" utilizados.....	46
7.5 - Resultado dos detetores de borda morfológicos simples implementados no intervalo $0 < \varphi < \pi/4$	48
7.6 - Resultado do borramento dos valores originais dos "pixels" de interesse no intervalo $0 < \varphi < \arctan(1/3)$	49
7.7 - Resultado do borramento dos valores originais dos "pixels" de interesse no intervalo $\arctan(1/3) < \varphi < \pi/4$	51
7.8 - Resultado final do detetor "operador de borramento e mínimo" no intervalo $0 < \varphi < \pi/4$	52

7.9 - Resultado dos "pixels" de interesse para o operador de borramento e mínimo sendo extensão da borda.....	53
7.10 - Resultado do "operador de borramento e mínimo" sendo extensão da borda.....	54
7.11 - Posicionamento da borda em relação a grade.....	55
7.12 - Valores dos "pixels" de interesse para os detetores morfológicos simples com deslocamento horizontal no intervalo $0 < d < 0.5$.	56
7.13 - Valores dos "pixels" de interesse no intervalo para os detetores morfológicos simples com deslocamento horizontal no intervalo $0.5 < d < 1.5$.	57
7.14 - Resultado final dos detetores de borda morfológicos simples com deslocamento horizontal no intervalo $0 < d < 1,5$	58
7.15 - Valores dos "pixels" de interesse borrados com o deslocamento horizontal radiometria constante.....	59
7.16 - Resultado final do "operador de borramento e mínimo" com deslocamento horizontal de radiometria constante.....	61
7.17 - Valores dos "pixels" de interesse borrados com deslocamento horizontal extensão da borda	62
7.18 - Resultado final do operador de borramento e mínimo com deslocamento horizontal extensão da borda.....	63
7.19 - Valores dos "pixels" de interesse para os detetores morfológicos simples com deslocamento diagonal.....	64
7.20 - Resultado final dos detetores de borda morfológicos simples com deslocamento diagonal.....	66
7.21 - Valores dos "pixels" de interesse borrados com deslocamento diagonal radiometria constante.....	68
7.22 - Resultado final do "operador de borramento e mínimo" com deslocamento diagonal radiometria constante.....	70
7.23 - Valores dos "pixels" de interesse borrados com deslocamento diagonal extensão da borda.....	72
7.24 - Resultado final do detetor "operador de borramento e mínimo" com deslocamento diagonal extensão da borda.....	73
8.1 - Seta que indica o trecho da imagem original rural utilizado para comparação dos detetores.....	77
8.2 - Borda gradiente binária para a imagem real urbana.....	79
8.3 - Borda gradiente binária para a imagem real rural.....	79

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Em cartografia, no Brasil, ainda há muitos problemas a resolver ligados ao mapeamento e a sua atualização. As imagens de satélite podem e vão contribuir de forma decisiva no auxílio da solução destes problemas num futuro bem próximo.

A presente dissertação tem por finalidade principal dar uma contribuição ao processamento digital de imagens no que diz respeito a detecção de bordas. Esta contribuição é feita através de algoritmos implementados, cujos resultados são testados e analisados no que se refere ao uso de detetores de borda morfológicos em imagens orbitais. Outra finalidade é uma contribuição à cartografia no que diz respeito à delimitação de contornos em imagens orbitais, que é de grande importância e poderá vir a ser o método alternativo empregado na futura atualização de cartas através de imagens de satélites.

Pode se considerar que as pesquisas em processamento digital de imagens iniciaram-se na década de sessenta. A viabilidade da manipulação de imagens por computador logo despertou muito interesse. Os principais países a iniciar a busca pelo conhecimento nesta área foram os Estados Unidos da América e a França. O Brasil iniciou as pesquisas em meados da década de setenta, sendo o INPE um dos precursores.

No início existiam vários problemas a serem abordados e o que se esperava eram resultados a curto prazo. Assim sendo, os primeiros algoritmos de processamento digital começaram a surgir. Neste contexto, as técnicas de processamento de imagens foram evoluindo e seus resultados analisados. Para o desenvolvimento das técnicas foram necessárias teorias que as fundamentassem. Neste trabalho, a teoria de base é a chamada "**morfologia matemática**", que funciona como uma técnica na concepção de algoritmos na área de processamento digital de imagens, dispondo de ferramentas básicas como os detetores de borda.

As bordas numa imagem de satélite representam limites de feições na superfície terrestre, detetá-las é um passo importante tanto para o processamento digital quanto para a cartografia.

A **"morfologia matemática"** foi criada na década de sessenta na Escola Superior de Minas de Paris, França, por G. Matheron e J. Serra, tinha por objetivo analisar a estrutura de imagens microscópicas de amostras geológicas ou metalográficas e a partir daí relacionar os resultados obtidos com as propriedades físicas das rochas e minerais. Hoje em dia, pode-se definir como objetivo básico da **"morfologia matemática"**, descrever quantitativamente as estruturas geométricas.

Esta dissertação trata especificamente do uso da morfologia matemática dentro do processamento de imagens, com relação à deteção de borda. Também será feita uma comparação dos detetores implementados. Tal comparação será visual e seguirá critérios de avaliação quantitativa do desempenho dos detetores, proposta por Abdou (1978), para o caso de detetores de borda baseados em realce e limiarização.

CAPÍTULO 2

O PROBLEMA DA DETECÇÃO DE BORDAS

Bordas são simplesmente traços que definem contornos dos objetos presentes na cena (Barrera, 1987).

A detecção das bordas de uma imagem constitui um passo importante de pré-processamento. Várias das etapas posteriores ao processamento podem ser baseadas na obtenção das bordas significativas da imagem.

Uma abordagem típica de detecção de bordas consiste num realce das frequências espaciais altas seguido de um processo de limiarização. O processo de limiarização consiste em escolher um ponto do histograma, a partir do qual possam ser geradas imagens binárias. Este ponto deve ser escolhido de maneira que o resultado binário expresse da melhor forma possível o objetivo que se pretende alcançar.

Uma grande variedade de técnicas de realce tem sido proposta para acentuar as bordas antes da limiarização. As técnicas mais simples consistem em aproximações discretas do operador gradiente. A diferenciação discreta bidimensional pode também ter características direcionais (Pratt, 1978), podendo ser efetuada através da convolução da imagem original com máscaras apropriadas. O realce de bordas independente da direção pode ser obtido por aproximações digitais do operador Laplaciano. Entre os operadores não lineares de realce de bordas a serem utilizados antes da limiarização, podem ser mencionados os de Roberts (1965), Sobel (Duda e Hart, 1973) e Kirsch (1971).

Um certo número de detetores de borda envolve a operação de aproximar a superfície bidimensional que representa a imagem por uma função. Um dos primeiros exemplos deste método é o detetor de Hueckel (1971). Um outro exemplo de um método deste tipo foi proposto por Haralick (1980). Ele consiste em aproximar a imagem por superfí-

cies planas ou facetas. As bordas são marcadas em "pixels" que pertencem a duas facetas quando os parâmetros das duas superfícies não são consistentes.

Marr e Hildreth (1980) propuseram um detetor de borda baseado num modelo de percepção visual humana. O operador consiste numa suavização da imagem por uma função gaussiana seguida do operador laplaciano.

É possível colocar o problema da detecção de borda na perspectiva da teoria estatística de detecção de sinais, levando em conta explicitamente o carácter aleatório do sinal presente, bem como do ruído. Como exemplos desses métodos podem ser mencionados os trabalhos de Modestino e Fries (1977) e Mascarenhas e Prado (1980).

Uma das várias aplicações do uso de detetores de borda pode ser citada no contexto de sua utilização na cartografia como sendo muito útil para a futura atualização de cartas.

CAPÍTULO 3

A MORFOLOGIA MATEMÁTICA

A ferramenta matemática escolhida para o desenvolvimento desta dissertação é a teoria da morfologia matemática, que começou a ser desenvolvida por Matheron (1975) e Serra (1982) e seus colaboradores da Escola Superior de Minas de Paris. Nos Estados Unidos, contribuições foram feitas pelo Environmental Research Institute of Michigan (Sternberg, 1980) e, mais recentemente em outros países por pesquisadores de várias instituições, entre elas o Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE.

A palavra "**morfologia**" vem do grego " $\mu\omicron\rho\phi\omicron\lambda\omicron\gamma\iota\alpha$ ", a qual significa "**estudo**" das "**formas**".

Historicamente a formulação da morfologia matemática se inspirou nas idéias dos psicólogos da Gestalt, para os quais interpretar uma imagem é transformá-la. Ela atinge esse objetivo sondando e transformando um objeto da imagem por diferentes padrões de formas predefinidas, chamados elementos estruturantes. Ambos, objetos da imagem e elementos estruturantes, são representados por conjuntos num espaço euclidiano. Logo, as operações morfológicas são baseadas em intersecções e uniões de conjuntos com translações, podendo-se ainda generalizá-las, permitindo assim tratar funções por estas técnicas.

Sua teoria tem proporcionado inúmeras aplicações, entre as quais se destacam o processamento de imagens biomédicas, a análise de imagens geológicas, a inspeção industrial, a citologia automatizada, o processamento de fotografias aéreas, entre outras. Na Europa, há tempos, é a ferramenta predominante na análise microscópica de imagens binárias (Maragos, 1985).

Uma das razões que nortearam a escolha desta técnica foi exatamente a sua crescente utilização no meio científico. Existe amplo

consenso de que se trata de uma excelente base para estudar a estrutura geométrica do sinal porque permite quantificar forma e tamanho.

Toda a formulação morfológica iniciou-se em imagens binárias e, através da generalização da teoria, passou-se a tratar com imagens em tons de cinza (Serra, 1982).

A morfologia matemática unifica a análise e sintetiza uma grande categoria de sistemas lineares e não-lineares (operações morfológicas, medianas, etc). Por causa dessa sua habilidade de unificação e estrutura hierárquica, parece ser uma das mais indicadas ligações entre as tarefas de baixo nível (extração de feições, segmentação de imagens) e alto nível (reconhecimento de imagens e entendimento).

As operações de morfologia matemática atuam na imagem original através de um elemento estruturante, com alguma analogia com a máscara que realiza a convolução bidimensional de uma imagem.

No caso de imagens binárias, seja A o conjunto de pontos que representam "pixels" unitários da imagem e B o conjunto dos "pixels" unitários do elemento estruturante. Com estas definições, definir-se-á, na sequência os dois operadores morfológicos principais, a saber: erosão e dilatação.

3.1 - EROSÃO

Pode-se definir, segundo Lee et al. (1987), a erosão de A por B, denotada por $A \ominus B$, por:

$$A \ominus B = \{x | x + b \in A, \text{ para } \forall b \in B\} \quad (3.1)$$

A interpretação geométrica da erosão pode ser dada em termos do conjunto de pontos, de modo que o elemento estruturante centralizado nestes pontos esteja inteiramente contido no conjunto original.

Pensando em termos de uma imagem em tom de cinza, a erosão de uma imagem em tom de cinza "f" por um elemento estruturante "b" é denotada por "e" e definida por:

$$e(r,c) = (i,j) \min (f(r+i, c+j) - b(i,j)), \quad (3.2)$$

onde o mínimo é tomado sobre todos os (i,j) no domínio de "b". O domínio da erosão é o domínio de "f" erodida pelo domínio de "b".

O elemento estruturante pode ser definido como um outro objeto que possui forma simples e tamanho menor do que o objeto original sendo escolhido pelo observador, ele interage com o objeto em estudo, transformando-o em uma "caricatura" que pode ser mais expressiva (Barrera, 1987).

O resultado visual da erosão em tom de cinza é a redução dos picos e a ampliação dos vales dentro da imagem original, dependendo do elemento estruturante utilizado.

3.2 - DILATAÇÃO

Segundo Lee et al. (1987), pode-se definir a dilatação de A por B, denotada por $A \oplus B$, por:

$$A \oplus B = \{c/c = a + b, \text{ para algum } a \in A \text{ e } b \in B\}. \quad (3.3)$$

A interpretação geométrica da dilatação pode ser dada em termos do conjunto de pontos, de modo que a reflexão do elemento estruturante em relação à origem toque o conjunto original.

No caso de imagens em tom de cinza, a dilatação de uma imagem "f" por um elemento estruturante "b" é denotada por "d" e definida por Lee et al. (1987) como:

$$d(r,c) = (i,j) \max (f(r-i, c-j) + b(i,j)), \quad (3.4)$$

onde o máximo é tomado sobre todos os (i,j) no domínio de "b", de modo que $(r-i, c-j)$ esteja no domínio de "f". O domínio da dilatação é a dilatação do domínio de "f" com o domínio de "b".

O resultado visual da dilatação é o alongamento dos picos e a redução dos vales dentro da imagem original, dependendo do elemento estruturante utilizado.

A Figura 3.1 ilustra o efeito visual da aplicação dos operadores erosão e dilatação em uma imagem para um dado elemento estruturante.

Analogias podem ser estabelecidas entre as operações de erosão e a de correlação, bem como entre as operações de dilatação e a de convolução. No primeiro caso, substitui-se a multiplicação da correlação pela diferença e o somatório pela operação de mínimo. No segundo, substitui-se a multiplicação da convolução pela soma e o somatório pela operação de máximo.

Nos problemas de detecção de borda que serão abordados nesta dissertação, o domínio do elemento estruturante escolhido foi o de vizinhança-4 do "pixel", no qual serão calculadas todas as operações de erosão, dilatação e aplicação dos detetores. A única exceção ocorre com um dos detetores a ser implementado, conforme será observado mais adiante. A vizinhança-4 do "pixel" foi escolhida por sugestão de trabalhos realizados por Lee et al. (1987). Assim, se o "pixel" central for denotado por $(0,0)$, o domínio do elemento estruturante será dado por:

$$D_b = \{(0,1), (0,-1), (-1,0), (1,0)\} .$$

Além disso, será abordado apenas o caso em que o valor do elemento estruturante é nulo nesse domínio. Deste modo, as Equações 3.2 e 3.4 se reduzem a:

$$e(r,c) = \min (f(r+i, c+j)) \quad (3.5)$$

$$(i,j) \in D_b ,$$

$$d(r,c) = \max (f(r-i, c-j)) \quad (3.6)$$

$$(i,j) \in D_b .$$

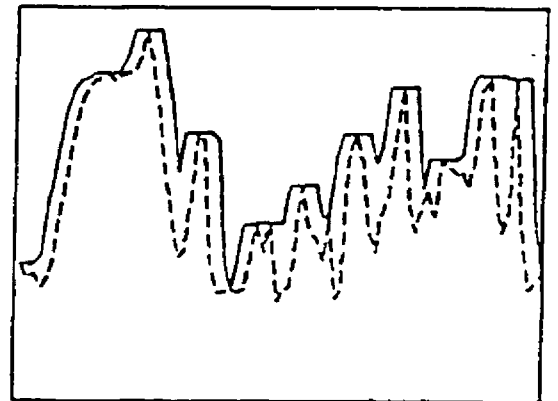
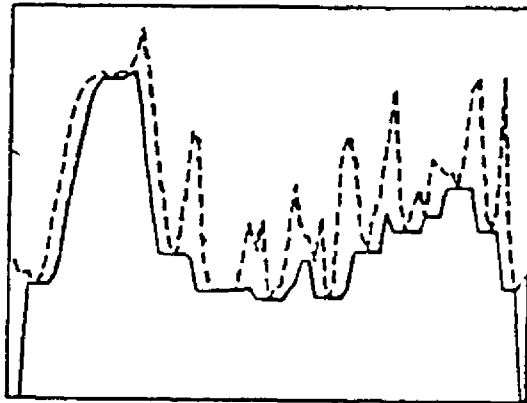
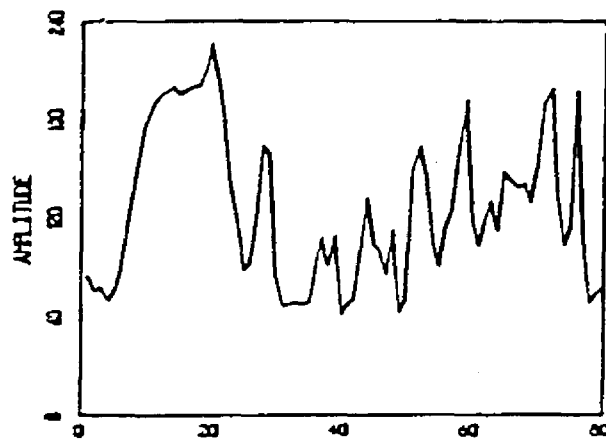


Fig. 3.1 - Exemplo do resultado da aplicação dos operadores morfológicos básicos.

FONTE: Maragos (1985).

As operações de erosão e dilatação em tom de cinza tornam-se, respectivamente, o mínimo ou o máximo da função numa vizinhança-4 ao redor "pixel" considerado.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA UTILIZADA

Com a possibilidade de a morfologia matemática resolver problemas de forma unificada (Barrera, 1987), ela passou a ter uma posição de destaque na área de processamento digital de imagens.

A presente dissertação se propõe a fornecer subsídios ao usuário que tiver necessidade de lançar mão da morfologia matemática na extração de bordas em imagens orbitais.

A metodologia aqui apresentada tentará mostrar de forma clara todos os passos a serem seguidos nesta dissertação, visando atingir os objetivos já definidos.

Inicialmente foram escolhidos os detetores de borda a serem implementados. Tal escolha foi baseada em Lee et al. (1987). Foram selecionados seis detetores de borda morfológicos, que foram divididos em dois grupos; um engloba cinco detetores devido à ligação existente entre eles; o outro tem apenas um detetor, por envolver conceitos mais elaborados.

O primeiro grupo é formado pelos seguintes detetores:

- resíduo da erosão (Ge),
- resíduo da dilatação (Gd),
- combinado máximo (Gmax),
- combinado mínimo (Gmin),
- combinado da soma (Gsum).

Todos esses detetores serão descritos mais adiante.

O segundo grupo tem como detetor único o operador de borramento e mínimo (Gblur), "blur and minimum operator", isolado por ter em teoria um melhor desempenho em relação aos demais.

Com o término da etapa de programação dos detetores, tiveram início os testes para que pudesse ser feita uma avaliação visual do desempenho de todos os detetores de borda morfológicos escolhidos.

Tais testes foram feitos sobre três imagens:

- Imagem simulada de uma região de 64 x 64 "pixels", que contém dois níveis de cinza, sendo o limite entre eles correspondente a uma borda ideal.
- Imagem do satélite Landsat 5, obtida pelo sensor TM (Thematic Mapper), banda 3, datada de 11 de agosto de 1987, órbita ponto 217/76 sobre o Aeroporto Internacional do Galão, na cidade do Rio de Janeiro, correspondendo a uma área urbana.
- Imagem do satélite Landsat 5, obtida pelo sensor TM, banda 4, datada de 19 de julho de 1986, órbita ponto 221/74 sobre o município de Barretos, correspondendo a uma área rural.

A escolha das três áreas foi devida aos seguintes fatores:

- 1) A imagem simulada é de grande importância, pois os resultados sobre ela devem comprovar a teoria estudada sobre cada detetor morfológico implementado.
- 2) As imagens reais, uma de área urbana e outra de área rural, são exemplos distintos de áreas onde se pode empregar a detecção de borda na prática.

De posse das três imagens, foram aplicados todos os detetores de borda morfológicos implementados. Os detetores foram a seguir aplicados em imagens reais.

Como continuidade, foi feita também uma comparação visual do desempenho dos detetores de borda morfológicos com um outro detetor baseado numa aproximação digital do gradiente.

Na seqüência, além das avaliações visuais efetuadas, foi feita uma avaliação quantitativa do desempenho dos detetores conforme proposta apresentada por Abdou (1978) para detetores de borda convencionais.

CAPÍTULO 5

DETETORES DE BORDA ESCOLHIDOS

Bordas numa cena são causadas por mudanças em algumas das propriedades físicas das superfícies, tais como geometria e reflectância. Como há uma relação direta entre bordas e as propriedades físicas da cena, muitas das informações desta podem ser retiradas da imagem de borda. A detecção de borda converte uma imagem em tom de cinza em imagem binária.

5.1 - DETETORES DE BORDA MORFOLÓGICOS SIMPLES

Aqui serão apresentados os detetores de borda morfológicos simples a ser implementados.

5.1.1 - DETETOR DE BORDA MORFOLÓGICO "RESÍDUO DA EROSÃO" (Ge)

Este detetor é definido por:

$$G_e(r,c) = f(r,c) - e(r,c) , \quad (5.1)$$

$$G_e(r,c) = \max[f(r,c) - f(i,j)] \quad (5.2)$$
$$(i,j) \in D_b(r,c) ,$$

onde $D_b(r,c)$ é o conjunto de 4 vizinhos conectados na posição (r,c) .

Em termos simples, este detetor pode ser definido como o resultado da diferença entre a imagem original e sua erosão por um elemento estruturante definido.

5.1.2 - DETETOR DE BORDA MORFOLÓGICO "RESÍDUO DA DILATAÇÃO" (Gd)

Este detetor é definido por:

$$Gd(r,c) = d(r,c) - f(r,c) \quad (5.3)$$

$$Gd(r,c) = \max \{f(i,j) - f(r,c)\} \quad (5.4)$$

$$(i,j) \in D_b(i,j) .$$

Pode ser definido como o resultado da diferença entre a imagem original dilatada e a imagem original.

5.1.3 - COMBINAÇÕES DOS DETETORES Ge E Gd

Neste grupo foram combinados os dois detetores de borda mais simples já enfocados, a fim de avaliar o resultado final obtido.

5.1.3.1 - DETETOR DE BORDA MORFOLÓGICO "COMBINADO MÁXIMO" (Gmax)

Este detetor é definido por:

$$Gmax(r,c) = \max[G_e(r,c), G_d(r,c)] . \quad (5.5)$$

Tal detetor é o máximo entre os detetores de borda morfológicos resíduo da erosão (G_e) e resíduo da dilatação (G_d).

5.1.3.2 - DETETOR DE BORDA MORFOLÓGICO "COMBINADO MÍNIMO" (Gmin)

Este detetor é definido por:

$$Gmin(r,c) = \min[G_e(r,c), G_d(r,c)] . \quad (5.6)$$

Pode ser explicado como sendo o mínimo entre os detetores de borda morfológicos resíduo da erosão (G_e) e resíduo da dilatação (G_d).

5.1.3.3 - DETETOR DE BORDA MORFOLÓGICO "COMBINADO DA SOMA" (Gsum)

Este detetor é definido por:

$$G_{sum}(r,c) = G_e(r,c) + G_d(r,c) . \quad (5.7)$$

Pode ser explicado como sendo a soma algébrica dos dois detetores de borda morfológicos mais simples já citados anteriormente (G_e e G_d).

5.2 - DETETOR DE BORDA MORFOLÓGICO "OPERADOR DE BORRAMENTO E MÍNIMO" (Gblur)

É um detetor de borda melhorado, que deve operar sobre a imagem original borrada, transformando assim uma borda ideal numa rampa (o que nos casos anteriores não ocorria), que é agora detetada.

Para borrar a imagem original foi utilizada, por sugestão de Lee et al. (1987), uma máscara de 3×3 de vizinhança-8 do "pixel", a qual como resultado gera uma imagem borrada, que passa a ser agora a imagem de entrada para que a aplicação do detetor seja possível. Os valores de cada "pixel" da máscara estão indicados na Figura 5.1.

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Fig. 5.1 - Valores utilizados na máscara para o borramento.

Assim sendo, um dos detetores de bom desempenho teórico propostos por Lee et al. (1987) consiste na seguinte expressão:

$$Gblur = \min\{I_1 - \text{erosão}(I_1), \text{dilatação}(I_1) - I_1\} \quad (5.8)$$

onde I_1 representa a imagem de entrada borrada.

Este operador é conhecido na literatura internacional por "blur and minimum operator", que será chamado a partir de agora "operador de borramento e mínimo".

CAPÍTULO 6

RESULTADOS VISUAIS OBTIDOS

Foram escolhidas três áreas para testes, a saber (Figuras 6.1, 6.2 e 6.3):

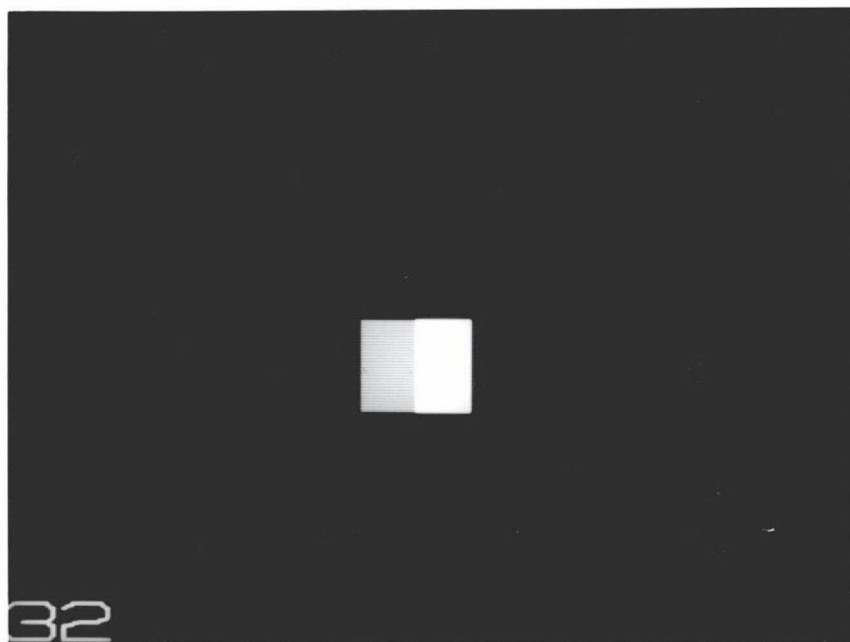


Fig. 6.1 - Imagem original simulada.



Fig. 6.2 - Imagem original real urbana.

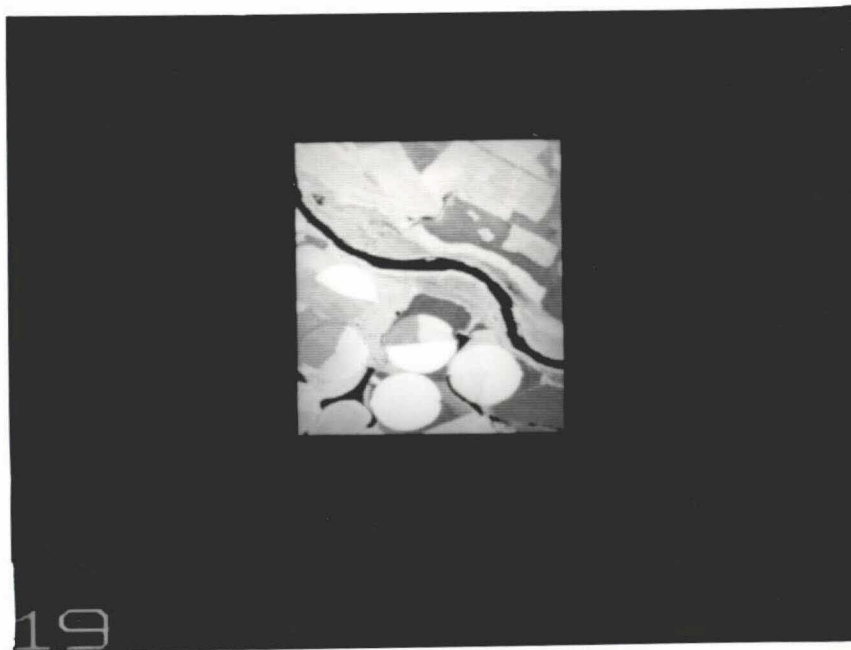


Fig. 6.3 - Imagem original real rural.

Sobre estas imagens foram aplicados os detetores de borda morfológicos simples implementados, chegando-se aos resultados mostrados a seguir.

6.1 - IMAGEM ORIGINAL SIMULADA

A partir da imagem original (Fig. 6.1) foram obtidas pela aplicação dos detetores as seguintes imagens de bordas morfológicas (Figuras 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7).

Cabe ressaltar que, nas imagens mostradas, a imagem da esquerda corresponde à imagem resultante em tom de cinza e a da direita ao resultado binarizado. A ausência do resultado final do detetor "combinado mínimo" (Gmin) deve-se ao fato dele não responder a uma borda ideal, conforme conclusão de Lee et al. (1987).



Fig. 6.4 - Borda morfológica "resíduo da erosão" simulada.

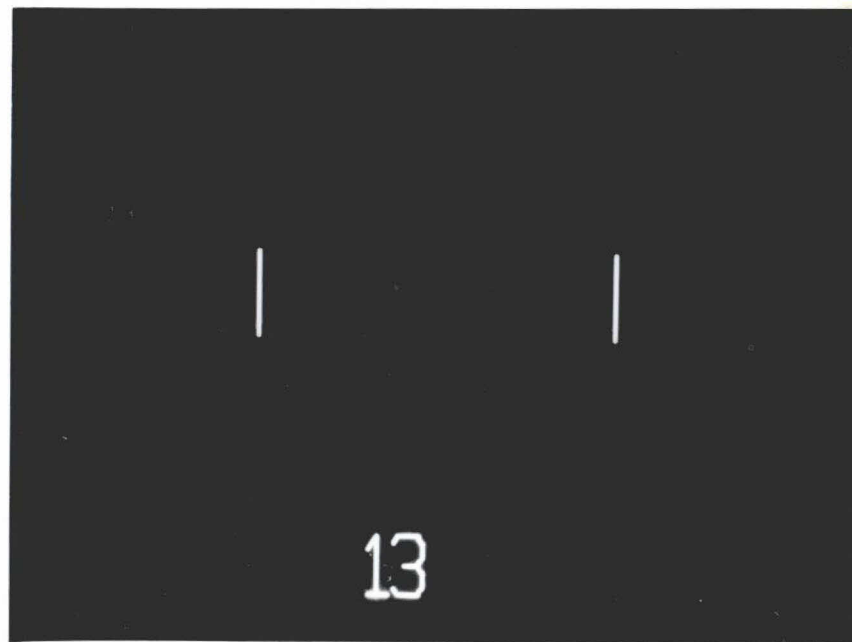


Fig. 6.5 - Borda morfológica "resíduo da dilatação" simulada.



Fig. 6.6 - Borda morfológica "combinado máximo" simulada.



Fig. 6.7 - Borda morfológica "combinado da soma" simulada.

Falta ser apresentado o resultado atingido pela aplicação do detetor "**operador de borramento e mínimo**". Sabe-se que, para a utilização deste detetor, é necessário gerar uma imagem borrada (Figura 6.8), borramento este que é feito com a máscara indicada na Figura 5.1. Após o borramento, o detetor é aplicado, o que resulta na Figura 6.9.

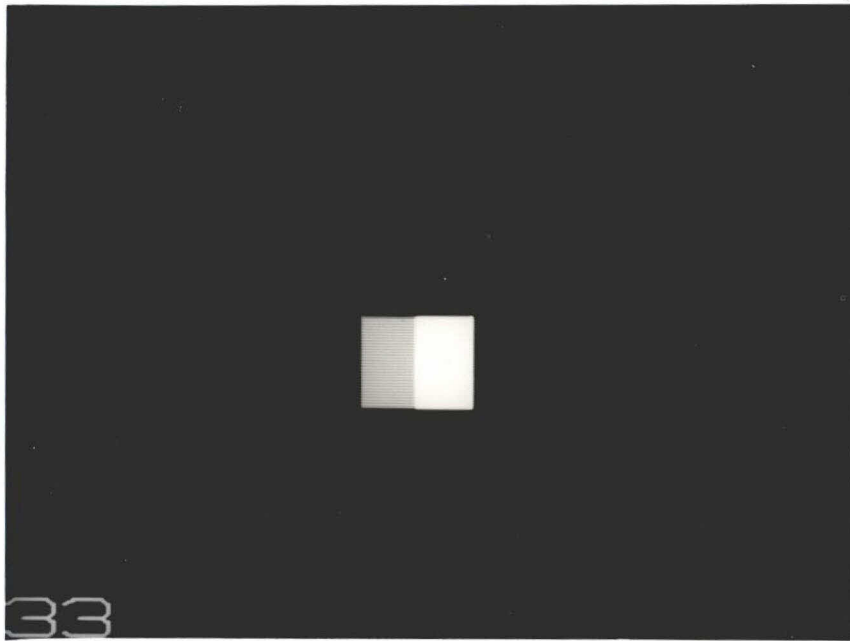


Fig. 6.8 - Imagem original simulada borrada.



Fig. 6.9 - Borda morfológica "operador de borramento e mínimo" simulada.

Os resultados visuais obtidos nas Figuras de 6.4 a 6.7 e 6.9 comprovam a teoria apresentada em trabalhos de Lee et al. (1987). Neste trabalho, o comportamento esperado do resultado da aplicação dos detetores de borda morfológicos implementados sobre uma imagem de borda ideal com amplitude "E" é o seguinte:

- para o detetor "**resíduo da erosão**", responder com borda única do lado claro com intensidade E;
- para o detetor "**resíduo da dilatação**", responder com borda única do lado escuro com intensidade E;
- para o detetor "**combinado máximo**", responder com borda dupla (lado claro e lado escuro) com intensidade E;
- para o detetor "**combinado da soma**", responder com borda dupla (lado claro e lado escuro) com intensidade E;
- para o detetor "**combinação mínimo**", não responder;
- para o detetor "**operador de borramento e mínimo**", responder com borda dupla (lado claro e lado escuro) com intensidade E/3.

6.2 - IMAGEM ORIGINAL REAL URBANA (AEROPORTO)

De posse da imagem original (Figura 6.2) foram aplicados os detetores de borda morfológicos simples implementados, o que resultou nas seguintes imagens em tom de cinza (Figuras 6.10, 6.11, 6.12, 6.13 e 6.14).

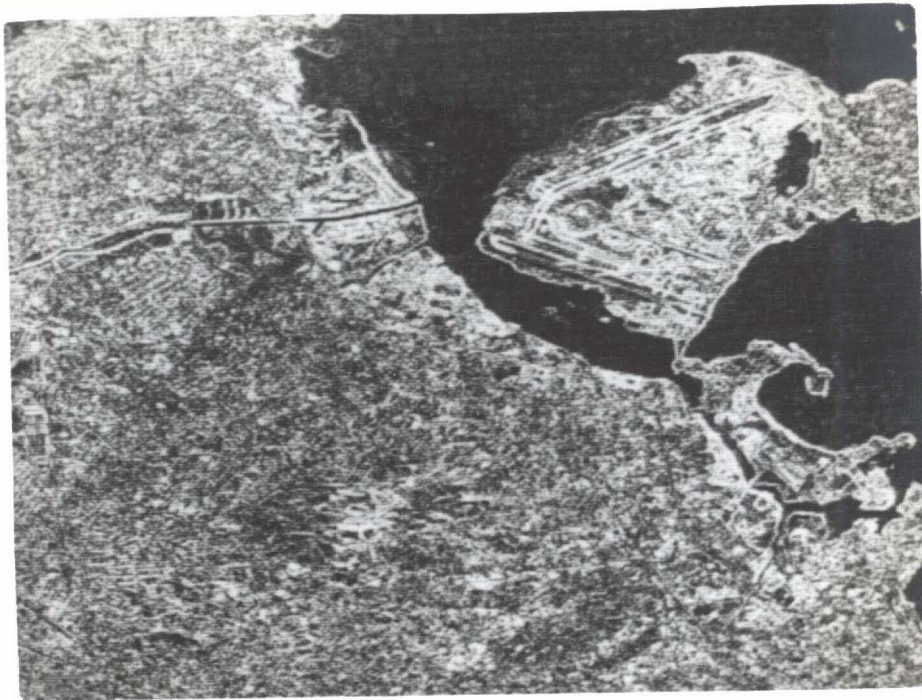


Fig. 6.10 - Borda morfológica em tom de cinza "resíduo da erosão" real urbana.

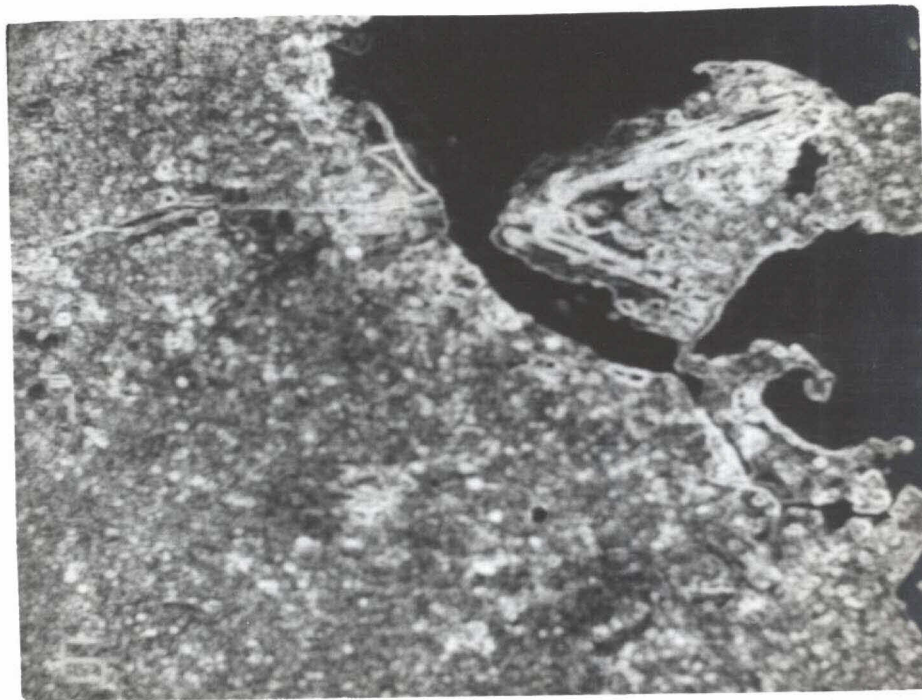


Fig. 6.11 - Borda morfológica em tom de cinza "resíduo da dilatação" real urbana.

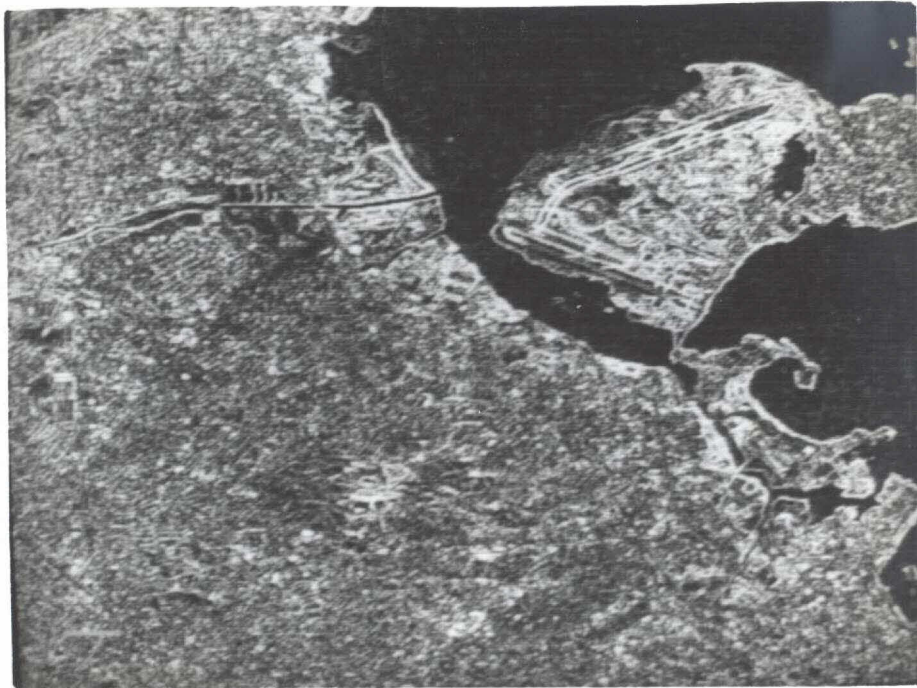


Fig. 6.12 - Borda morfológica em tom de cinza "combinado máximo" real urbana.

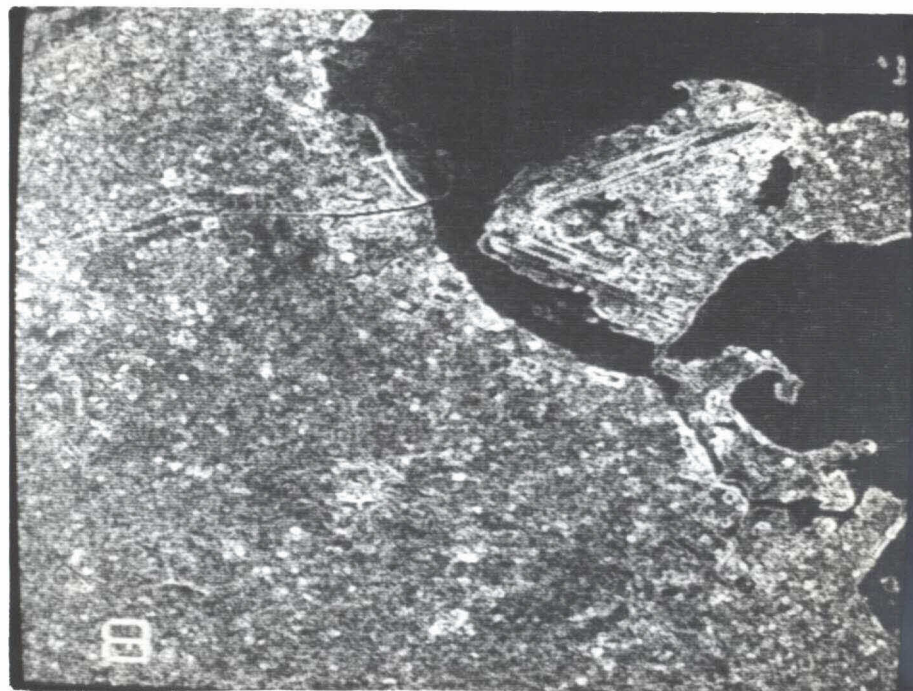


Fig. 6.13 - Borda morfológica em tom de cinza "combinado mínimo" real urbana.

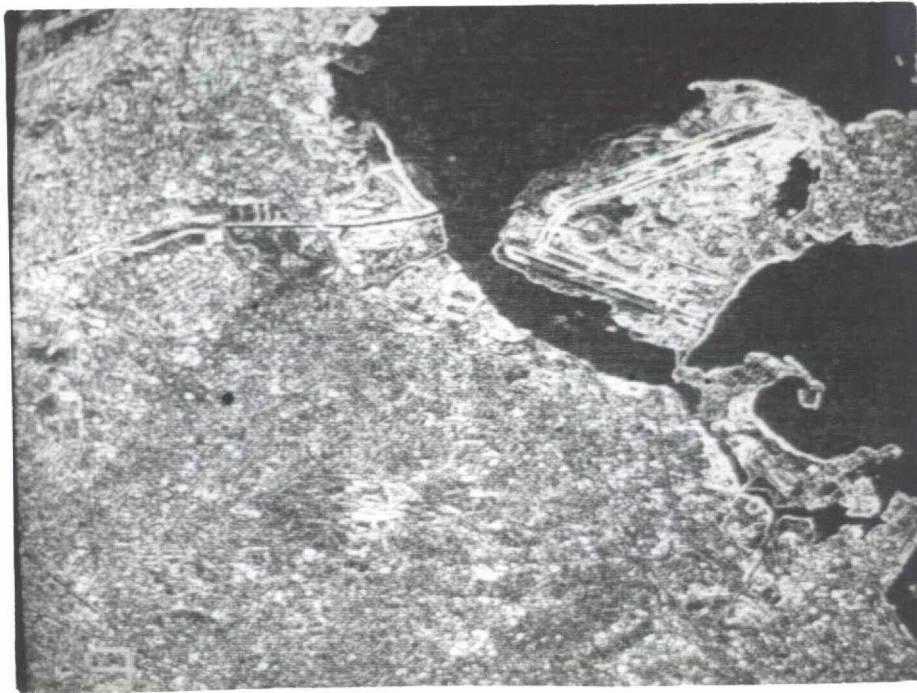


Fig. 6.14 - Borda morfológica em tom de cinza "combinado da soma" real urbana.

De posse dessas imagens e com o objetivo de obter imagens binárias de bordas, foi escolhido um limiar acima do qual estivesse contido 15% do histograma da imagem de bordas morfológicas em tom de cinza, obtendo-se assim as seguintes imagens (Figuras 6.15, 6.16, 6.17, 6.18 e 6.19):

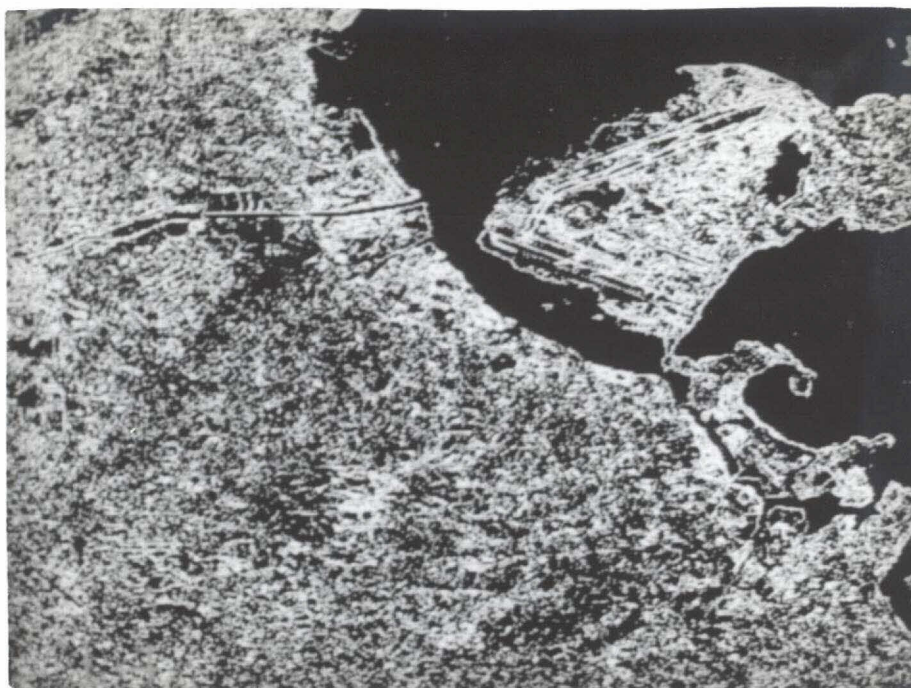


Fig. 6.15 - Borda morfológica binária "resíduo da erosão" real urbana.

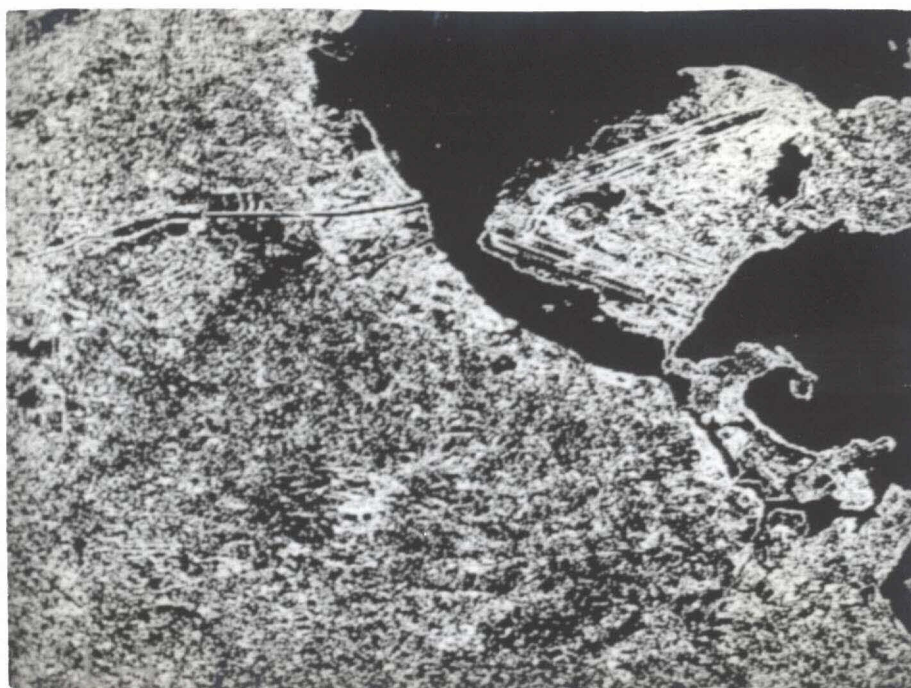


Fig. 6.16 - Borda morfológica binária "resíduo da dilatação" real urbana.

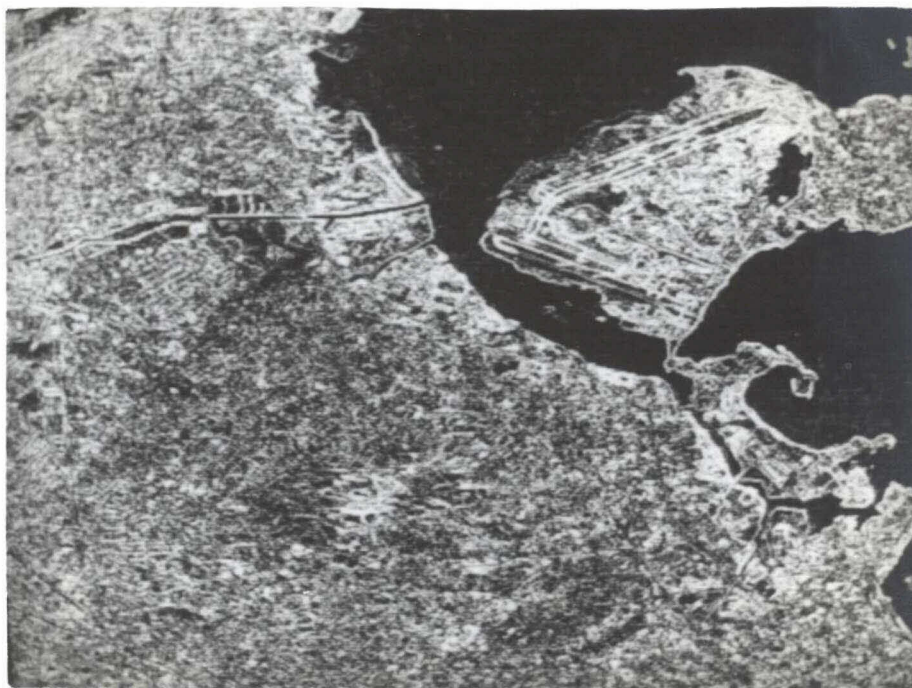


Fig. 6.17 - Borda morfológica binária "combinado máximo" real urbana.

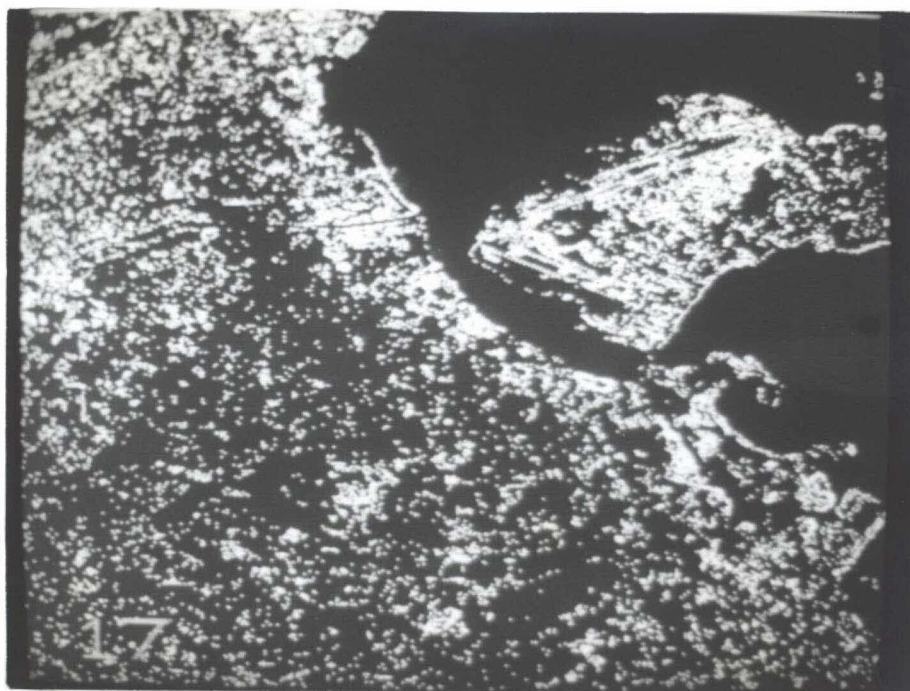


Fig. 6.18 - Borda morfológica binária "combinado mínimo" real urbana.

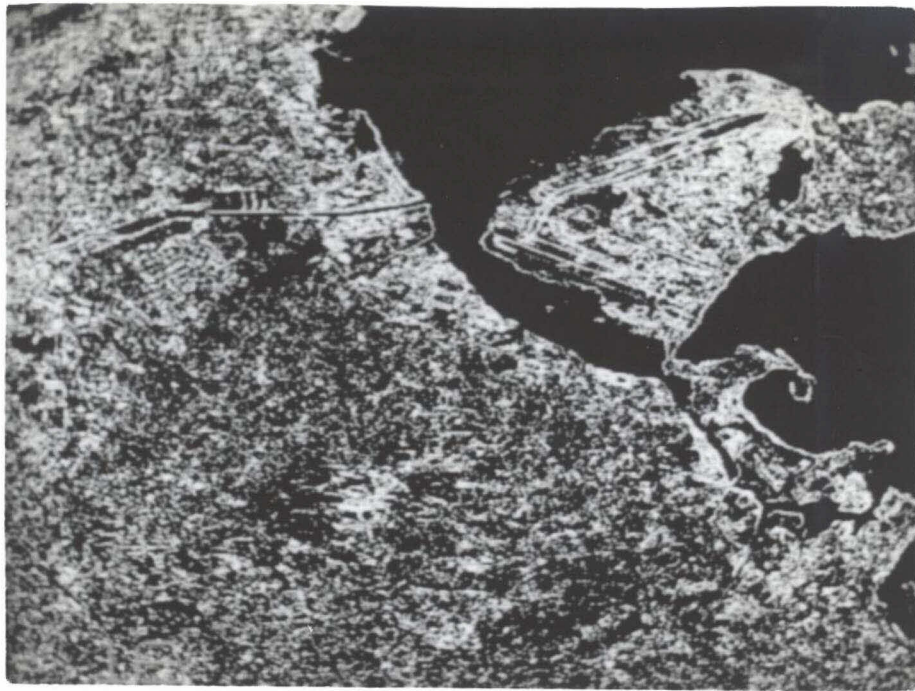


Fig. 6.19 - Borda morfológica binária "combinado da soma" real urbana.

Para completar, da mesma forma que no caso da imagem simulada, será apresentado o resultado atingido para o detetor "**operador de borramento e mínimo**", sempre lembrando que ele necessita de uma imagem borrada (Figura 6.20) para atingir o resultado em tom de cinza (Figura 6.21) e o resultado final binário (Figura 6.22).

Os resultados visuais obtidos nas Figuras de 6.15 a 6.19 e 6.22 tornam-se difíceis de ser avaliados, pois, em imagens reais, devido à densidade de informação contida, não é possível saber ao certo a espessura de cada borda presente na imagem para, a partir daí, haver possibilidade de efetuar uma comparação com os resultados teóricos ideais.

Conforme comentado na Seção 6.2, a imagem de borda em tom de cinza do detetor operador de borramento e mínimo responde com intensidade $E/3$, enquanto G_{sum} responde com intensidade E . Isso pode ser comprovado observando os histogramas das duas imagens mostrados nas Figuras 6.23 e 6.24.

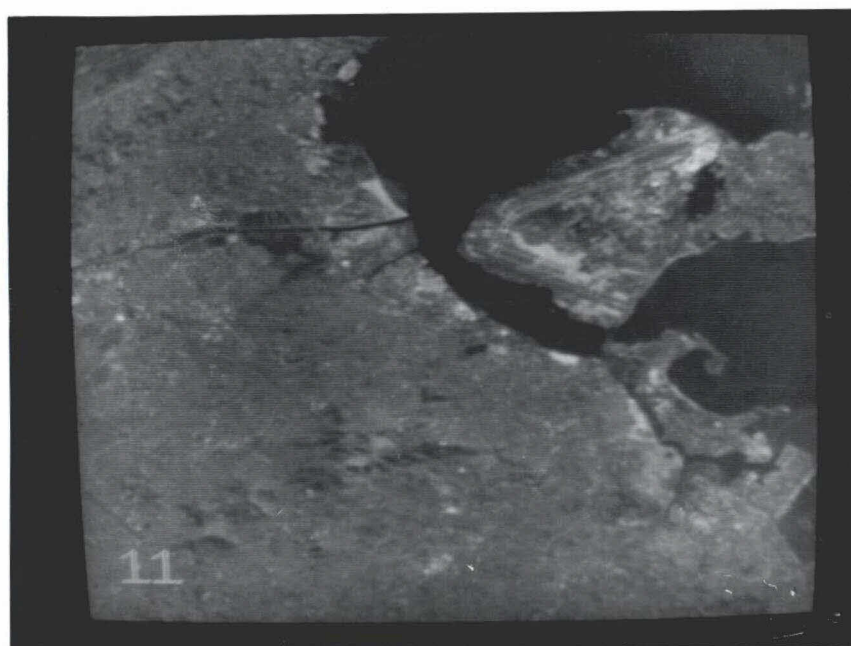


Fig. 6.20 - Imagem original real urbana borrada.

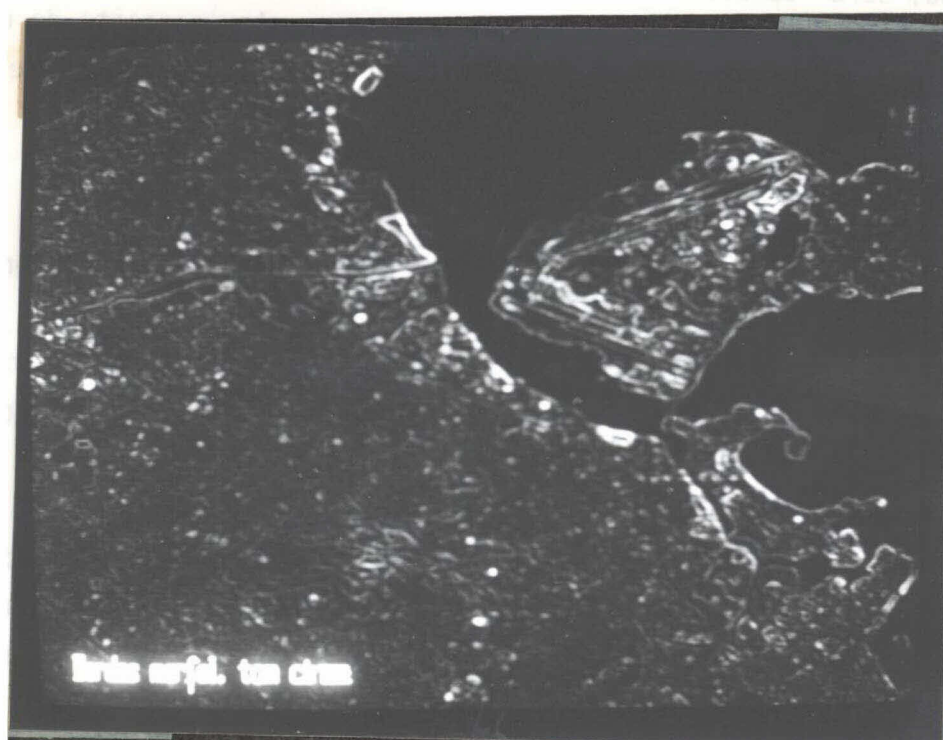


Fig. 6.21 - Borda morfológica em tom de cinza "operador de borramento e mínimo" real urbana.

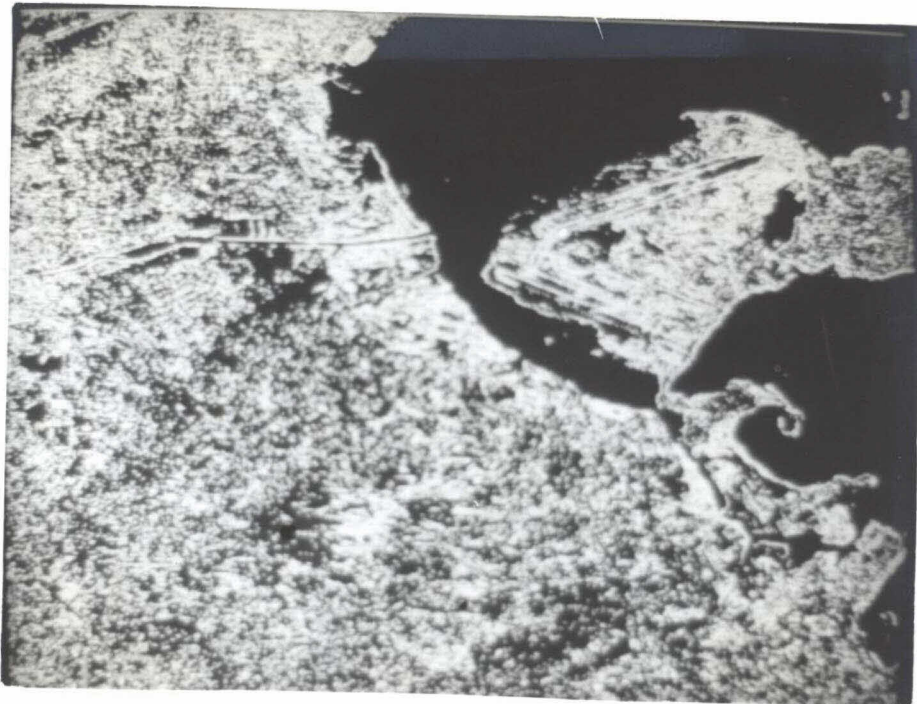


Fig. 6.22 - Borda morfológica binária "operador de borrimento e mínimo" real urbana.

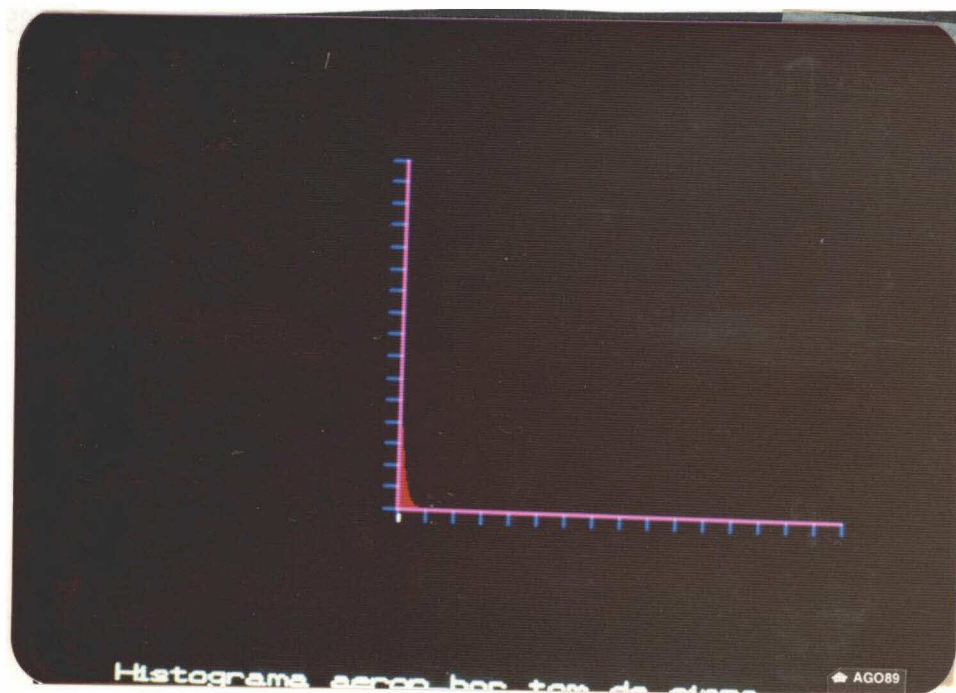


Fig. 6.23 - Histograma da imagem de borda em tom de cinza Gblur.

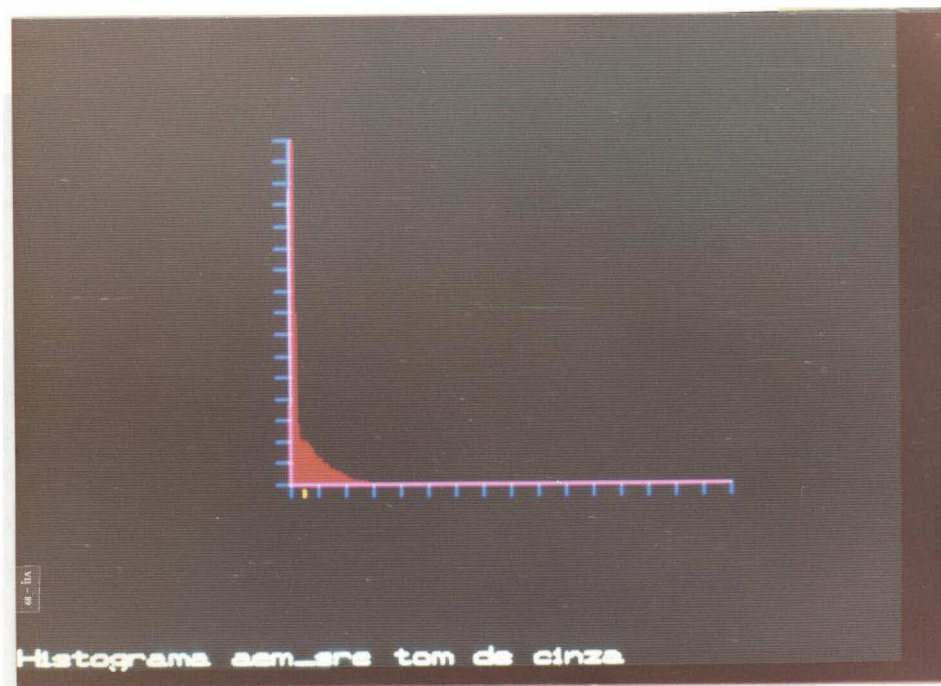


Fig. 6.24 - Histograma da imagem de borda em tom de cinza Gsum.

6.3 - IMAGEM ORIGINAL REAL RURAL (PIVÔS)

Da mesma forma que no caso da imagem real urbana, obtiveram-se as seguintes imagens em tom de cinza (Figuras 6.25, 6.26, 6.27, 6.28, 6.29 e 6.30).

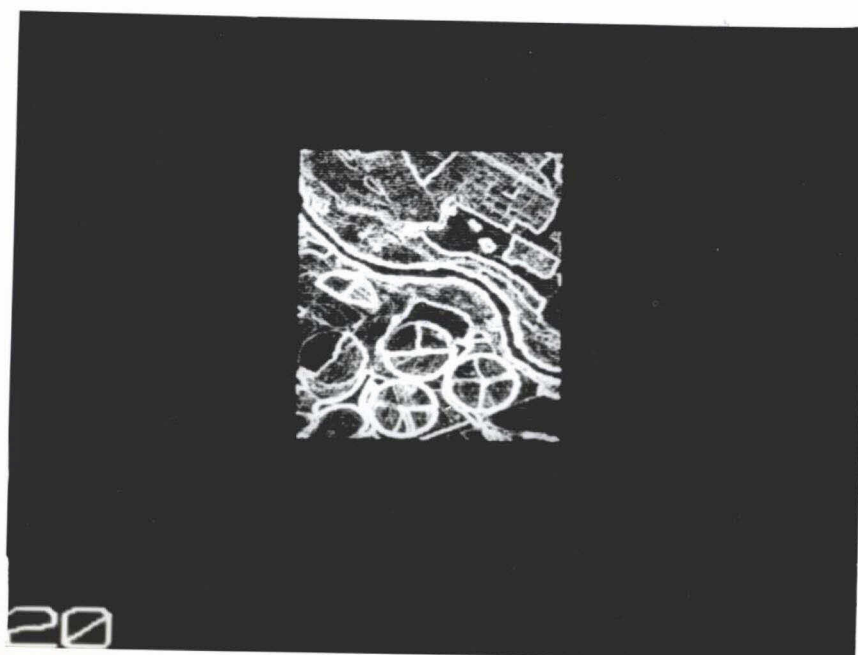


Fig. 6.25 - Borda morfológica em tom de cinza "resíduo da erosão" real rural.



Fig. 6.26 - Borda morfológica em tom de cinza "resíduo da dilatação" real rural.

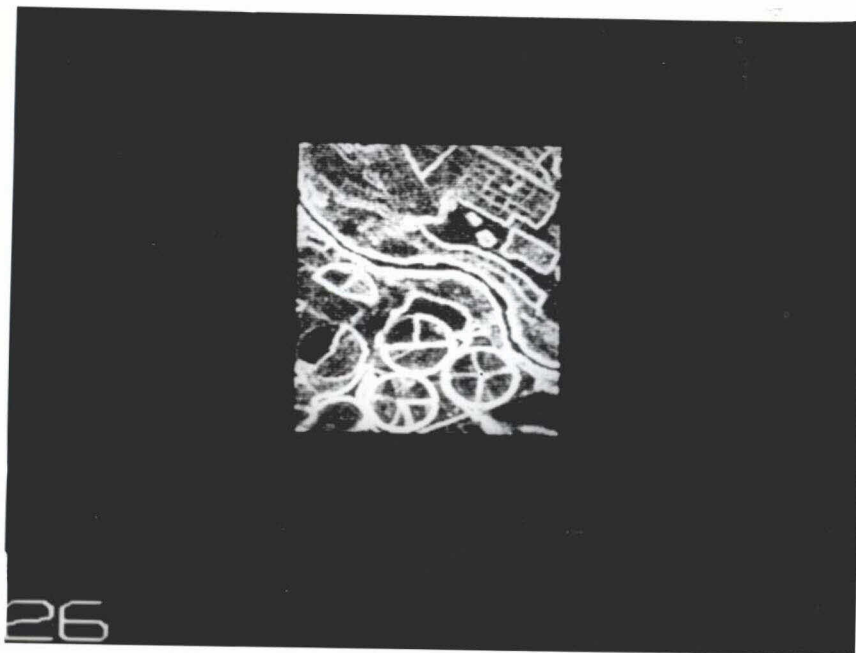


Fig. 6.27 - Borda morfológica em tom de cinza "combinado máximo" real rural.

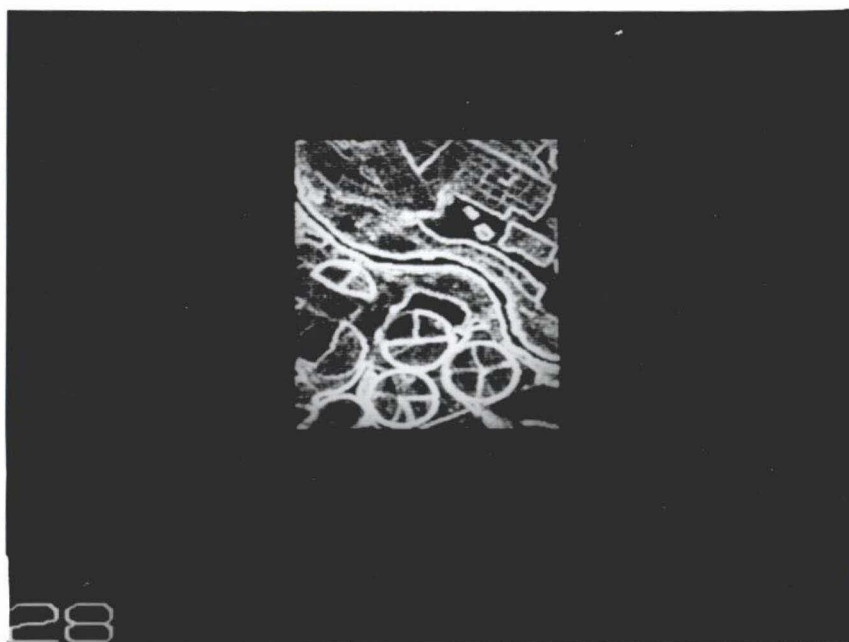


Fig. 6.28 - Borda morfológica em tom de cinza "combinado mínimo" real rural.

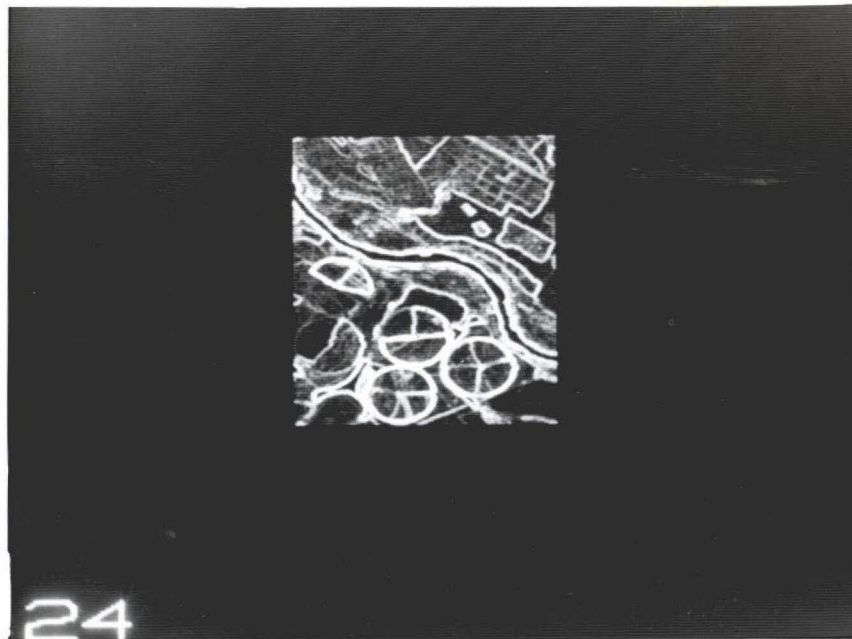


Fig. 6.29 - Borda morfológica em tom de cinza "combinado da soma" real rural.



Fig. 6.30 - Imagem original real rural borrada.



Fig. 6.31 - Borda morfológica em tom de cinza "operador de borramento e mínimo" real rural.

Aplicando a limiarização de 15% sobre estas imagens, foram obtidas as imagens binárias apresentadas a seguir.

De posse dos resultados visuais obtidos, a mesma conclusão obtida na seção anterior pode ser utilizada aqui, ou seja, é difícil comparar resultados de imagens reais com resultados de imagens simuladas.

Da mesma forma que para a imagem de borda real urbana foram mostrados os histogramas em tom de cinza para Gblur e Gsum. As Figuras 6.38 e 6.39 mostram os histogramas das imagens de borda Gblur e Gsum, respectivamente, para a imagem real rural.



Fig. 6.32 - Borda morfológica binária "resíduo da erosão" real rural.



Fig. 6.33 - Borda morfológica binária "resíduo da dilatação" real rural.

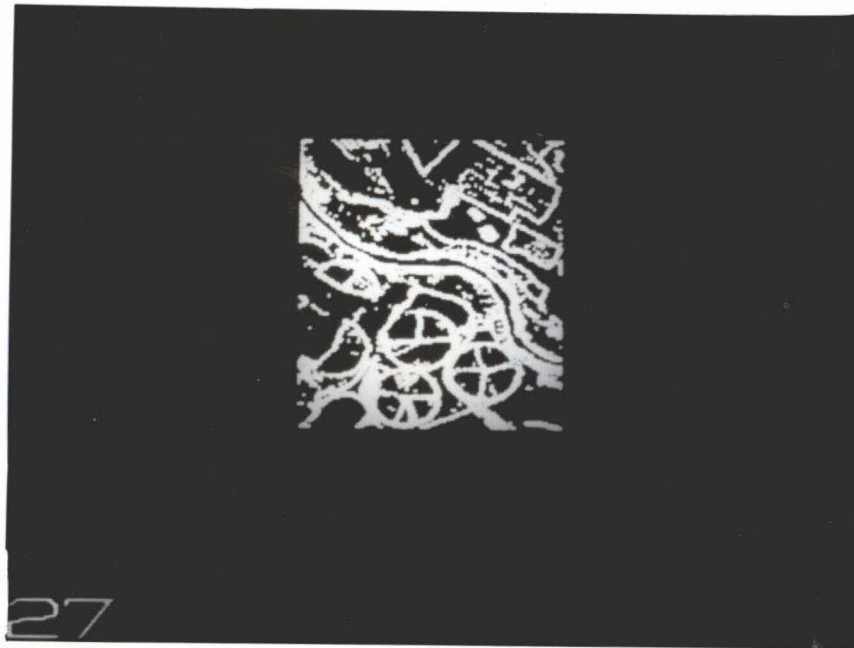


Fig. 6.34 - Borda morfológica binária "combinado máximo" real rural.

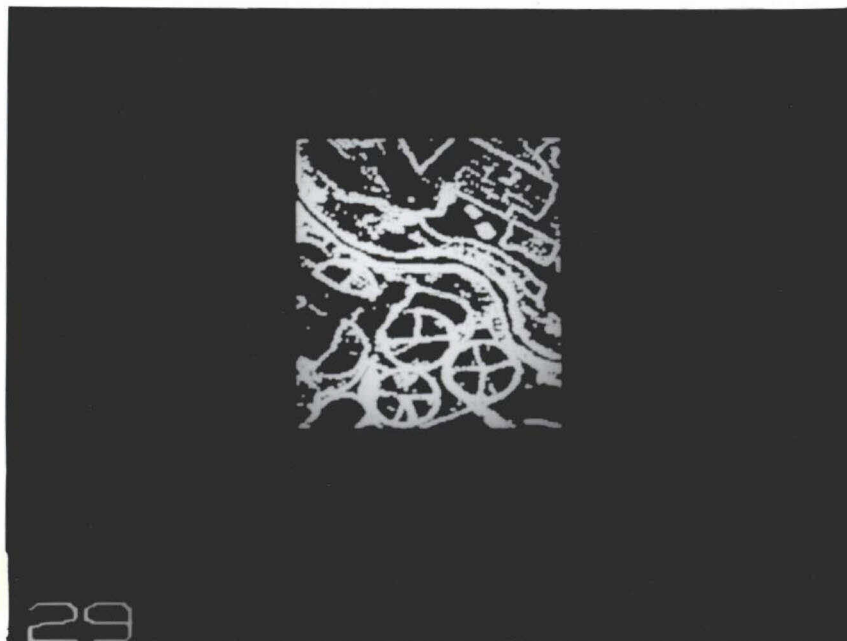


Fig. 6.35 - Borda morfológica binária "combinado mínimo" real rural.



Fig. 6.36 - Borda morfológica binária "combinado da soma" real rural.

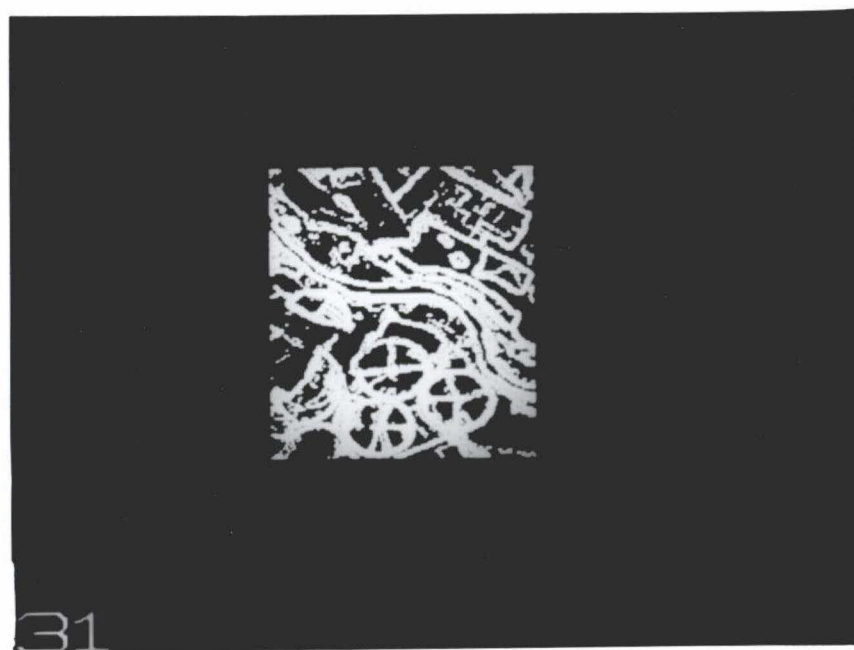


Fig. 6.37 - Borda morfológica binária "operador de borramento e mínimo" real rural.



Fig. 6.38 - Histograma de borda em tom de cinza Gblur.

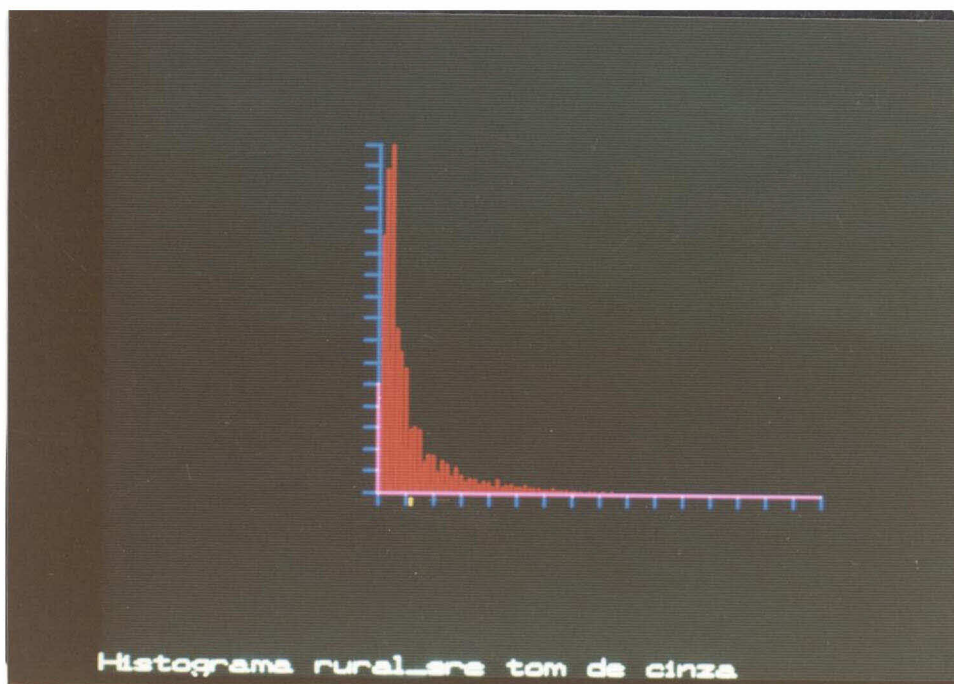


Fig. 6.39 - Histograma de borda em tom de cinza Gsum.

CAPÍTULO 7

RESULTADOS QUANTITATIVOS DO DESEMPENHO DOS DETETORES DE BORDA MORFOLÓGICOS - CASO DE BORDA IDEAL

Nesta análise, o modelo de borda mostrado na Figura 7.1 é utilizado (Abdou, 1978) com $W = 0$ (função degrau). Quando um detetor de borda é aplicado sobre este modelo, a saída é determinada pela posição da borda. Para simplificar a análise, o efeito de cada parâmetro será considerado separadamente. Inicialmente admitir-se-á que a borda passa através do centro do detetor de borda com orientação geral φ . A seguir, admitir-se-á que a borda tem orientação fixa, na qual a distância do centro é variável.

É conveniente destacar que, ao se tratar de casos onde a aplicação do detetor de borda "**operador de borramento e mínimo**" for estudada, duas vizinhanças ao redor da sub-região estudada foram escolhidas, a saber:

- Primeiro a vizinhança (α) foi considerada de radiometria constante para o qual foram atribuídos cinco valores.
 - $\alpha = 0$,
 - $\alpha = h/4$,
 - $\alpha = h/2$,
 - $\alpha = (3/4)h$ e
 - $\alpha = h$.
- Segundo, a vizinhança foi considerada como sendo uma extensão da borda (continuidade) e seus valores foram atribuídos, caso a caso, de acordo com os valores originais dos "pixels" que compõem a região estudada.

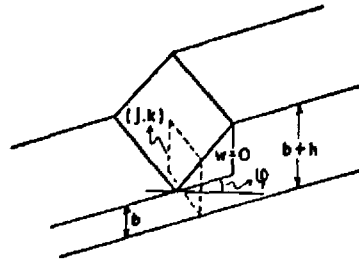


Fig. 7.1 - Modelo de borda ideal.

FONTE: Abdou (1978).

Para que se possa fazer um acompanhamento dos resultados atingidos, é importante ressaltar que no caso dos detetores de borda morfológicos **"combinado da soma"** (G_{sum}) seu resultado é a soma dos detetores G_e e G_d ; no caso dos detetores de borda morfológicos **"combinado máximo"** (G_{max}) seu resultado é o máximo entre G_e e G_d ; por último no caso dos detetores de borda morfológicos **"combinado mínimo"** seu resultado é o mínimo entre G_e e G_d .

7.1 - CASO DE BORDA CENTRAL COM ORIENTAÇÃO φ

As intensidades médias dos "pixels" diferentes de uma sub-região 3×3 , que contém uma borda central, são mostradas na Figura 7.2. Estas intensidades são dadas como função da orientação φ . Por causa da simetria dos detetores de borda, é suficiente medir o desempenho dos operadores no intervalo $0 < \varphi < (\pi/4)$.

Cálculos geométricos simples podem ser feitos para fornecer o gradiente de borda e resposta da sua orientação detetada como função da orientação da borda atual para os modelos escolhidos. O resultado destes cálculos refere-se ao intervalo $0 < \varphi < \pi/4$. O mesmo foi feito em dois intervalos, a saber: $0 < \varphi < \arctan(1/3)$ e $\arctan(1/3) < \varphi < \pi/4$, em função da variação dos "pixels" com a mudança de φ .

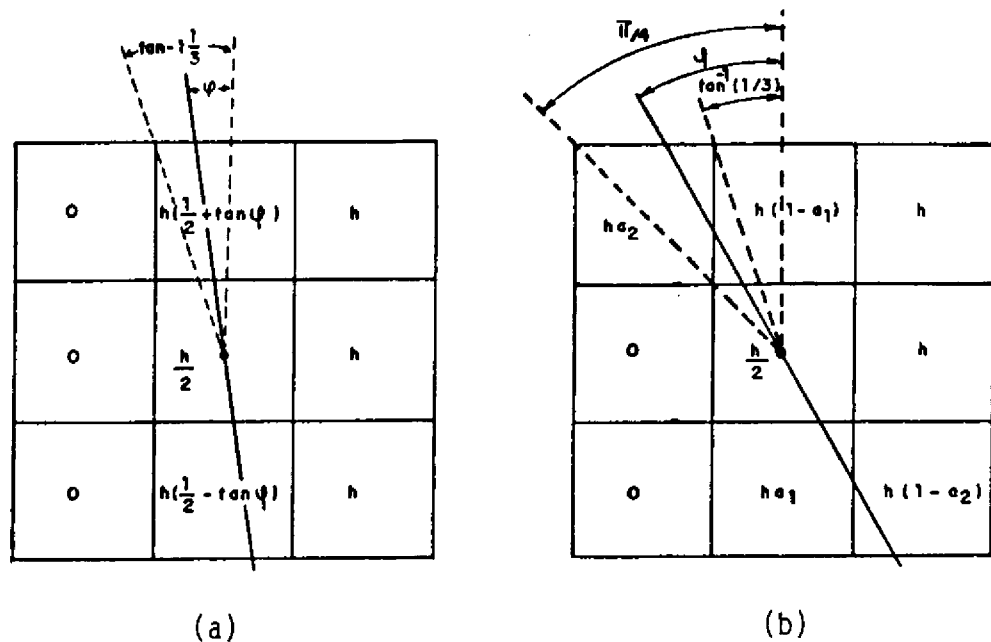


Fig. 7.2 - Modelos de borda para análise da orientação.

FONTE: Abdou (1978).

- a) $0 < \varphi < \arctan(1/3)$;
- b) $\arctan(1/3) < \varphi < \pi/4$.

A Figura 7.3 mostra a ordenação adotada para os "pixels" na sub-região 3x3. Os "pixels" circundados correspondem à vizinhança-4 adotada, e passam a ser chamados a partir de agora de "pixels de interesse"; em cada caso estudado os valores correspondentes mudam.

7.1.1 - RESULTADO PARA OS DETETORES DE BORDA MORFOLÓGICOS SIMPLES

Calculando a partir daí os valores dos operadores básicos (erosão e dilatação) da morfologia matemática sobre os valores dos "pixels" indicados na Figura 7.4 e expandindo os cálculos para o resultado da aplicação de cada detetor de borda simples implementado, chega-se ao resultado mostrado na Tabela 7.1.

1	2	3
4	5	6
7	8	9

Fig. 7.3 - Ordenação adotada para os "pixels".

FONTE: Abdou (1978).

	$h(\frac{1}{2} + \cos \varphi)$	
0	$\frac{h}{2}$	h
	$h(\frac{1}{2} - \cos \varphi)$	

	$h(1 - \sin \varphi)$	
0	$\frac{h}{2}$	h
	$h \sin \varphi$	

(a)

(b)

Fig. 7.4 - Valores originais dos "pixels" utilizados.

FONTE: Abdou (1978).

a) $0 < \varphi < \arctan(1/3)$;

b) $\arctan(1/3) < \varphi < \pi/4$.

Na Figura 7.4, "a1" é uma variável de valor igual a: $a1 = [(1 - \tan \varphi)^2 / 8 * \tan \varphi]$, que, como pode ser notado, depende de φ .

TABELA 7.1

RESULTADOS OBTIDOS PARA OS DETETORES DE BORDA
MORFOLÓGICOS SIMPLES RELATIVOS AO PONTO CENTRAL

OPERAÇÃO	INTERVALO	
	$0 \leq \varphi \leq \tan^{-1}(1/3)$	$\tan^{-1}(1/3) \leq \varphi \leq \pi/4$
Erosão	0	0
Dilatação	h	h
Resíduo da erosão	h / 2	h / 2
Resíduo da dilatação	h / 2	h / 2
Combinado máximo	h / 2	h / 2
Combinado mínimo	h / 2	h / 2
Combinado da soma	h	h

Na Tabela 7.1, "h" representa a intensidade máxima do "pixel".

A fase seguinte correspondeu à plotagem destes resultados encontrados, conforme Figura 7.5.

Para análise do desempenho de todos os detetores de borda morfológicos simples implementados, pode-se afirmar que todos eles independem da orientação da borda no intervalo de $0 < \varphi < \pi/4$; porém, o desempenho depende da intensidade de resposta de cada detetor.

Cabe ressaltar que os valores resultantes da aplicação dos detetores de borda morfológicos são relativos ao ponto central da sub-região 3x3 (ponto 5, Figura 7.3).

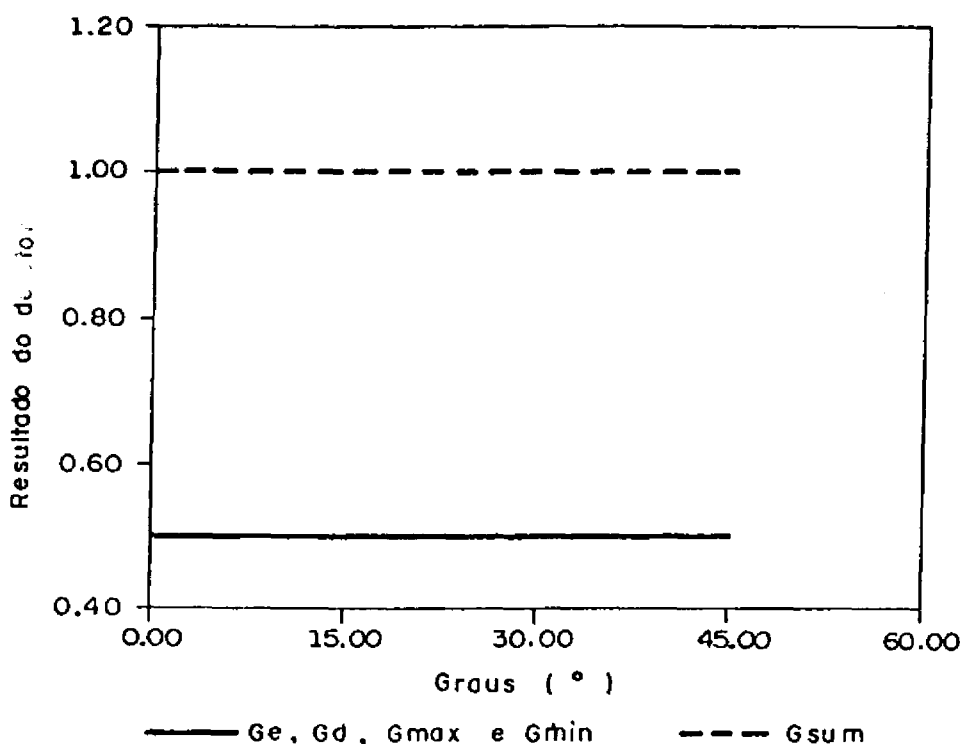


Fig. 7.5 - Resultado dos detectores de borda morfológicos simples implementados no intervalo $0 < \varphi < \pi/4$.

- RESULTADO PARA O DETETOR "OPERADOR DE BORRAMENTO E MÍNIMO" COM VIZINHANÇA DE RADIOMETRIA CONSTANTE

Resta agora efetuar a mesma análise para o detector de borda "operador de borramento e mínimo". Neste caso é necessário realizar uma filtragem que, como resultado, borra a imagem. Este resultado constitui os dados de entrada deste detector. Na seqüência foram feitos os cálculos para cada intervalo adotado, $0 < \varphi < \arctan(1/3)$ e $\arctan(1/3) < \varphi < \pi/4$, de modo a tomar os valores dos "pixels" originais de cada um dos modelos de borda utilizados (Figura 7.2) e, a partir daí, efetuar a operação de borramento, atribuindo a cada "pixel" de interesse pontos 2, 4, 5, 6 e 8 da Figura 7.3, a média aritmética de sua vizinhança de forma que cada um destes "pixels" ocupe o ponto central das sub-regiões 3x3 geradas.

No caso do primeiro intervalo, $0 < \varphi < \arctan(1/3)$, chegou-se ao seguinte resultado para os "pixels" de interesse mostrados na Figura 7.6.

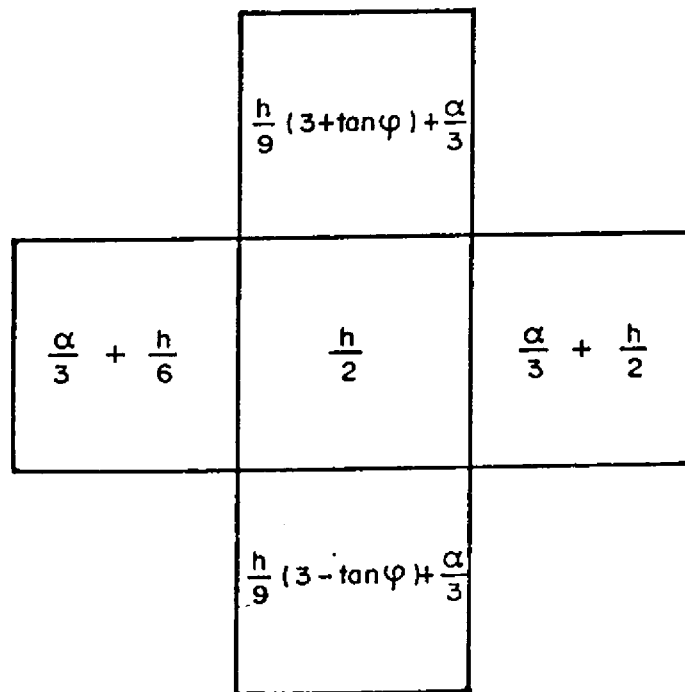


Fig. 7.6 - Resultado do borramento dos valores originais dos "pixels" de interesse no intervalo $0 < \varphi < \arctan(1/3)$.

Na Figura 7.6, "h" representa a intensidade máxima do "pixel", " φ " é a inclinação da borda e " α " é o valor dos "pixels" da vizinhança da sub-região 3x3 adotada, que pode variar no intervalo $0 < \alpha < h$, conforme já comentado.

De posse dos "pixels" de interesse borrados, foi possível aplicar o detetor, e chegou-se ao seguinte resultado:

$$L = \min \left[\left(\frac{h}{3} - \left(\frac{\alpha}{3} \right), \left(\frac{\alpha}{3} \right) \right] , \quad (7.1)$$

onde:

L = resultado do detetor;

α = valor dos "pixels" da vizinhança da sub-região 3x3 adotada, que pode variar no intervalo $0 < \alpha < h$;

h = intensidade máxima do "pixel".

Pela Equação 7.1 percebe-se claramente que o resultado final da aplicação do detetor "**operador de borramento e mínimo**" é independente da variação de φ no intervalo $0 < \varphi < \arctan(1/3)$, conforme Figura 7.8.

Sendo " α " um valor variável, o resultado final fica condicionado a ele. Tendo sido escolhidos aqueles cinco valores para " α ", pode-se chegar ao resultado final do detetor mostrado na Tabela 7.2.

TABELA 7.2

VALORES FINAIS DO DETETOR EM
FUNÇÃO DE " α "

VALOR DE α	RESULTADO FINAL
0	0
$h/4$	$h/12$
$h/2$	$h/6$
$3h/4$	$h/12$
h	0

No segundo intervalo, $\arctan(1/3) < \varphi < \pi/4$, chegou-se ao resultado para os "pixels" de interesse mostrados na Figura 7.7.

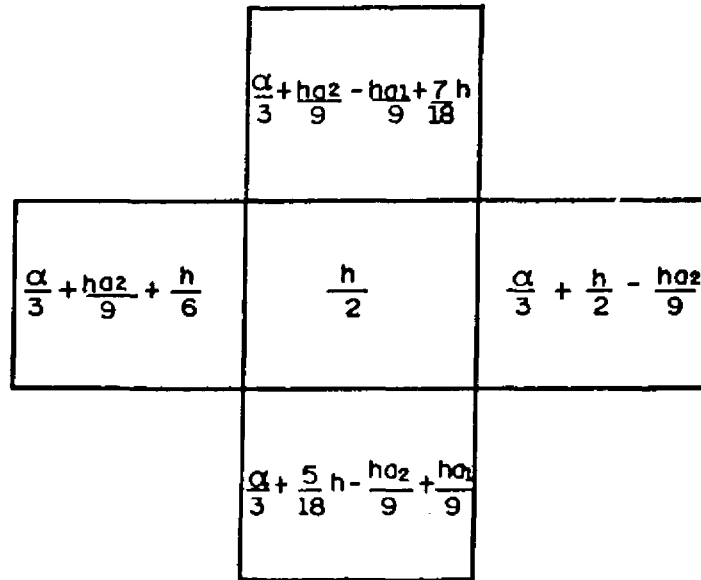


Fig. 7.7 - Resultado do borramento dos valores originais dos "pixels" de interesse no intervalo $\arctan(1/3) < \varphi < \pi/4$.

Na Figura 7.7, "h" representa a intensidade máxima do "pixel", "α" é o valor da vizinhança da sub-região 3x3 adotada, "a1" e "a2" são valores variáveis em função de φ , sendo:

$$a_1 = [(1 - \tan \varphi)^2 / (8 \times \tan \varphi)] \text{ e } a_2 = [(3 \times \tan \varphi - 1)^2 / (8 \times \tan \varphi)] \quad (7.2)$$

De posse dos resultados obtidos nos dois intervalos, foi possível plotá-los num gráfico, que é apresentado na Figura 7.8.

Pela Figura 7.8, observa-se que no intervalo $\arctan(1/3) < \varphi < \pi/4$, para vizinhança " $\alpha = 0$ e $\alpha = h$ " a resposta final do detetor é invariante em relação a φ ; para vizinhança " $\alpha = (1/4)h$, $\alpha = (1/2)h$ e $\alpha = (3/4)h$ ", o resultado final é monotônico decrescente.

7.1.3 - RESULTADO PARA O DETETOR "OPERADOR DE BORRAMENTO E MÍNIMO" COM VIZINHANÇA SENDO EXTENSÃO DA BORDA

Neste caso, a vizinhança da sub-região adotada passa a ser uma extensão da borda, o que em outras palavras significa uma continuidade dela. Os cálculos para chegar aos valores dos "pixels" de interesse foram efetuados da mesma maneira que com a vizinhança de radiometria constante, atingindo-se os valores mostrados na Figura 7.9.

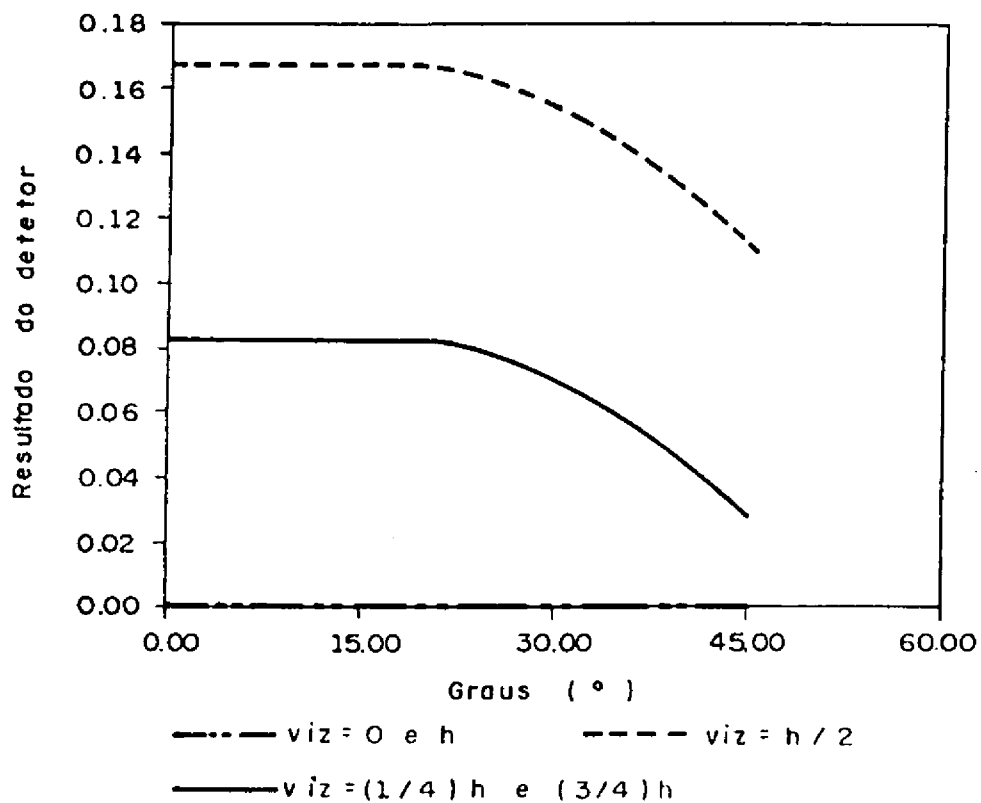


Fig. 7.8 - Resultado final do detetor "operador de borramento e mínimo" no intervalo $0 < \varphi < \pi/4$.

	$\frac{h}{2} + \frac{h \operatorname{tg} \varphi}{3}$	
$\frac{h}{6}$	$\frac{h}{2}$	$\frac{5}{6} h$
	$\frac{h}{2} - \frac{h \operatorname{tg} \varphi}{3}$	

(a)

	$\frac{23h}{36} - \frac{h}{4} \operatorname{tg} \varphi$	
$\frac{h}{6}$	$\frac{h}{2}$	$5 \frac{h}{6}$
	$\frac{13h}{36} + \frac{h}{4} \operatorname{tg} \varphi$	

(b)

	$\frac{h}{2} + \frac{h \operatorname{tg} \varphi}{3}$	
$\frac{h}{12} + \frac{h}{8} \operatorname{tg} \varphi + \frac{h}{72 \operatorname{tg} \varphi}$	$\frac{h}{2}$	$\frac{33}{36} h - \frac{h}{8} \operatorname{tg} \varphi - \frac{h}{72 \operatorname{tg} \varphi}$
	$\frac{h}{2} - \frac{h \operatorname{tg} \varphi}{3}$	

(c)

	$\frac{33}{36} h - \frac{h}{72} \operatorname{tg} \varphi - \frac{h}{8 \operatorname{tg} \varphi}$	
$\frac{h}{12} + \frac{h}{8} \operatorname{tg} \varphi + \frac{h}{72 \operatorname{tg} \varphi}$	$\frac{h}{2}$	$\frac{33}{36} h - \frac{h}{8} \operatorname{tg} \varphi - \frac{h}{72 \operatorname{tg} \varphi}$
	$\frac{h}{12} + \frac{h}{72} \operatorname{tg} \varphi + \frac{h}{8 \operatorname{tg} \varphi}$	

(d)

Fig. 7.9 - Resultado dos "pixels" de interesse para o operador de borramento e mínimo sendo extensão da borda.

- a) $0 < \varphi < \arctan(1/5)$;
- b) $\arctan(1/5) < \varphi < \arctan(1/3)$;
- c) $\arctan(1/3) < \varphi < \arctan(3/5)$;
- d) $\arctan(3/5) < \varphi < \pi/4$.

De posse dos valores mostrados acima, foi possível chegar ao resultado na Figura 7.10.

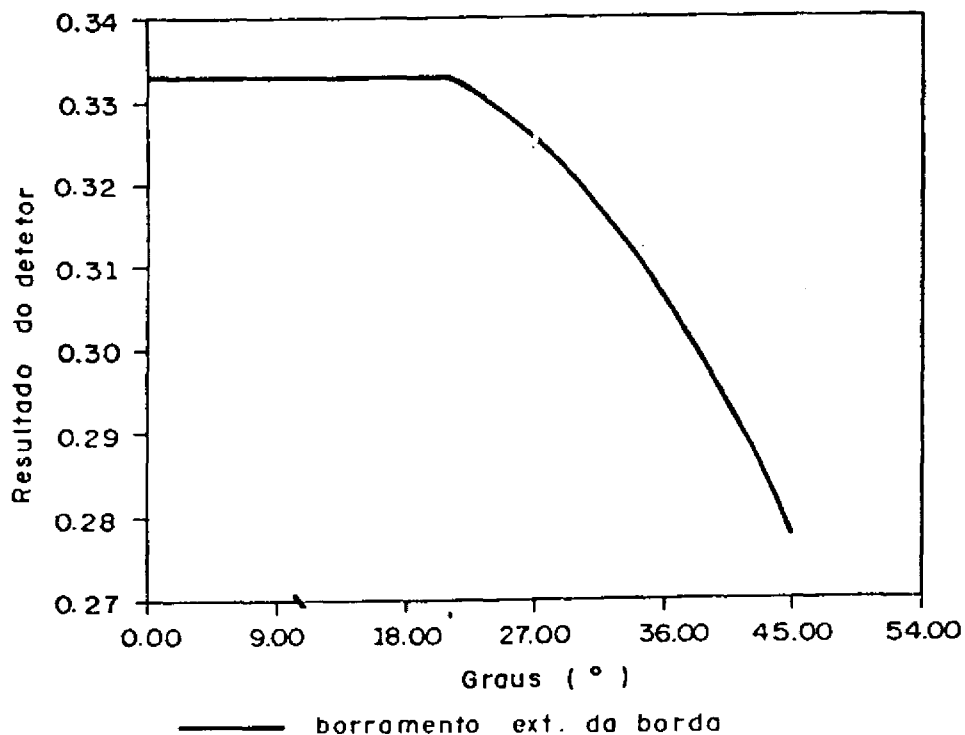


Fig. 7.10 - Resultado do "operador de borramento e mínimo" sendo extensão da borda.

Pela análise da Figura 7.10, o detetor responde de forma invariante no intervalo de 0 a aproximadamente 26 graus e, de forma monotônica decrescente no intervalo restante.

7.2 - CASO DE BORDA COM ORIENTAÇÃO FIXA E DESLOCAMENTO VARIÁVEL

Neste caso admite-se que a borda tem uma orientação fixa, enquanto a distância dela ao centro do detetor é variável. As orientações escolhidas são vertical e diagonal, com $\varphi = 0$ e $\varphi = \pi/4$, respectivamente, conforme Figura 7.11.

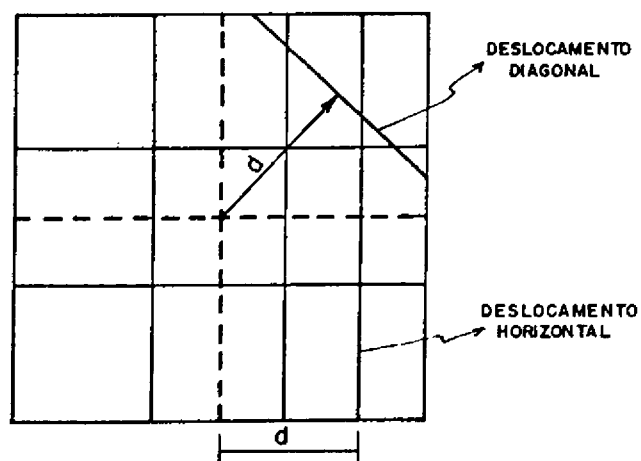


Fig. 7.11 - Posicionamento da borda em relação a grade.

FONTE: Abdou (1978).

Os resultados obtidos para a orientação da borda em $\varphi = \pi/4$ deverão coincidir com os resultados para o deslocamento diagonal no ponto central, ou seja, $d = 0$.

7.2.1 - CASO DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL

7.2.1.1 - CASO DOS DETETORES DE BORDA MORFOLÓGICOS SIMPLES

Considerando a sub-região 3x3 e o deslocamento horizontal, a variação dos valores dos "pixels" ocorre com o deslocamento "d", que é a distância das bordas ao ponto central. Como a sub-região possui 9 "pixels", devem-se calcular os valores destes. Para tanto é necessário dividir o intervalo de variação de "d" em dois subintervalos, a saber:

$$0 < d < 0.5 \quad \text{e} \quad 0.5 < d < 1.5.$$

Tais subintervalos foram necessários devido à variação dos valores dos "pixels" em função de "d".

No primeiro subintervalo, os valores encontrados para cada "pixel" são mostrados na Figura 7.12.

h	$h(\frac{1}{2} + d)$	o
h	$h(\frac{1}{2} + d)$	o
h	$h(\frac{1}{2} + d)$	o

Fig. 7.12 - Valores dos "pixels" de interesse para os detetores morfológicos simples com deslocamento horizontal no intervalo $0 < d < 0.5$.

No outro subintervalo, os valores são os mostrados na Figura 7.13.

Já conhecendo os valores dos "pixels" nos dois subintervalos, a fase seguinte foi aplicar sobre estes cada detetor de borda implementado. O grupo dos detetores de borda morfológicos simples foi o primeiro a ser aplicado e o resultado é mostrado na Figura 7.14.

h	h	$h(d - \frac{1}{2})$
h	h	$h(d - \frac{1}{2})$
h	h	$h(d - \frac{1}{2})$

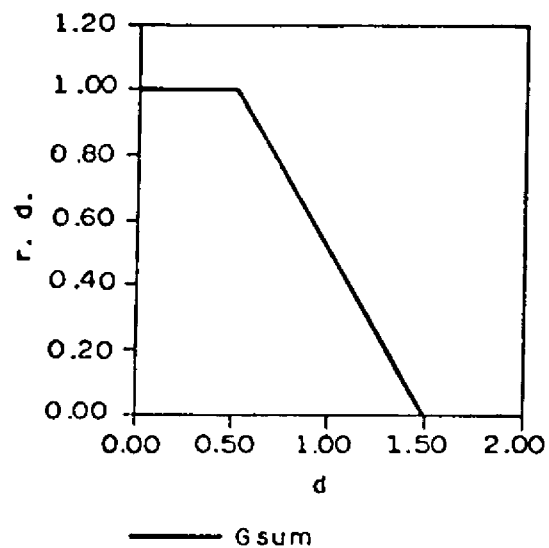
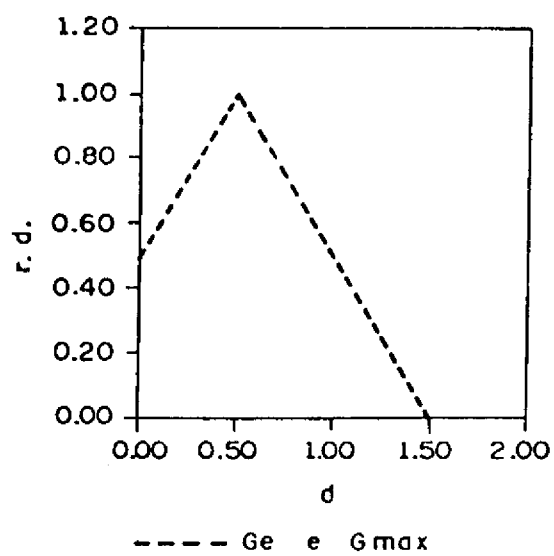
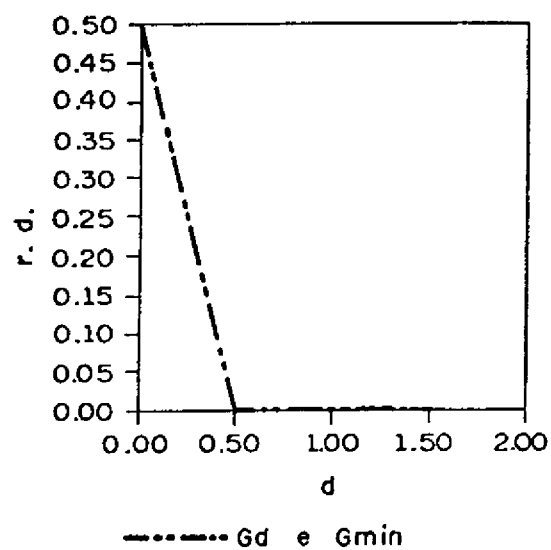
Fig. 7.13 - Valores dos "pixels" de interesse no intervalo para os detetores morfológicos simples com deslocamento horizontal no intervalo $0.5 < d < 1.5$.

Pela análise da Figura 7.14, observa-se que, com exceção dos detetores **"resíduo da erosão"** e **"combinado máximo"**, os demais detetores de borda morfológicos simples implementados respondem com um comportamento monotônico decrescente.

Com a aplicação dos detetores de borda morfológicos simples concluída, será aplicado o **"operador de borramento e mínimo"**.

7.2.1.2 - CASO DO DETETOR "OPERADOR DE BORRAMENTO E MÍNIMO" DESLOCAMENTO HORIZONTAL COM VIZINHANÇA DE RADIOMETRIA CONSTANTE

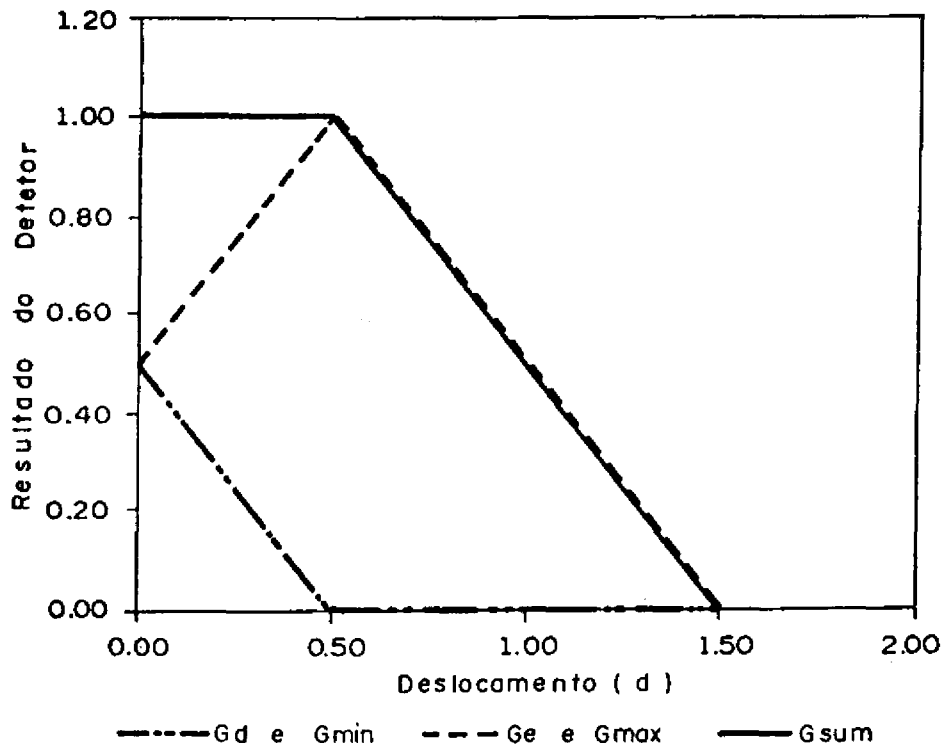
Sabe-se que este detetor é mais complexo que os anteriores e que o cálculo de sua saída é mais trabalhoso. O primeiro passo adotado foi efetuar o borramento dos "pixels" de interesse de forma já comentada, chegando-se para cada subintervalo ao resultado mostrado na Figura 7.15.



(a) detalhe do resultado final conjunto.

Fig. 7.14 - Resultado final dos detetores de borda morfológicos simples com deslocamento horizontal no intervalo $0 < d < 1,5$.

(continua)



(b) resultado final conjunto.

Fig. 7.14 - Conclusão.

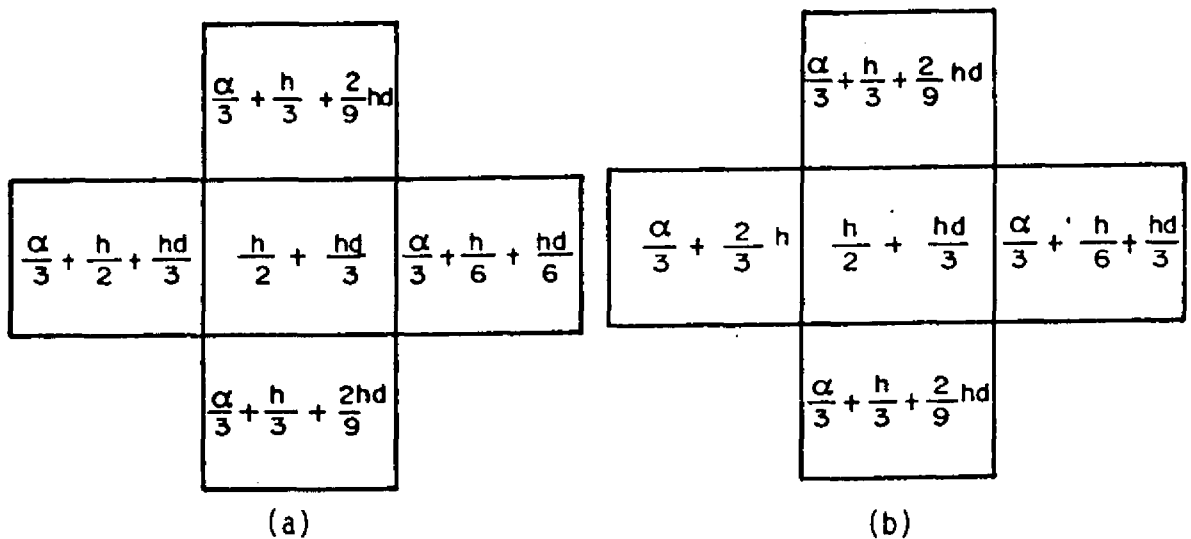


Fig. 7.15 - Valores dos "pixels" de interesse borrados com o deslocamento horizontal radiometria constante.

a) $0 < d < 0.5$;b) $0.5 < d < 1.5$.

Na Figura 7.15, "h" representa a intensidade máxima do "pixel", " α " são os valores dos "pixels" na vizinhança da sub-região 3x3 adotada e "d" é a distância entre a posição da borda e o ponto central da sub-região.

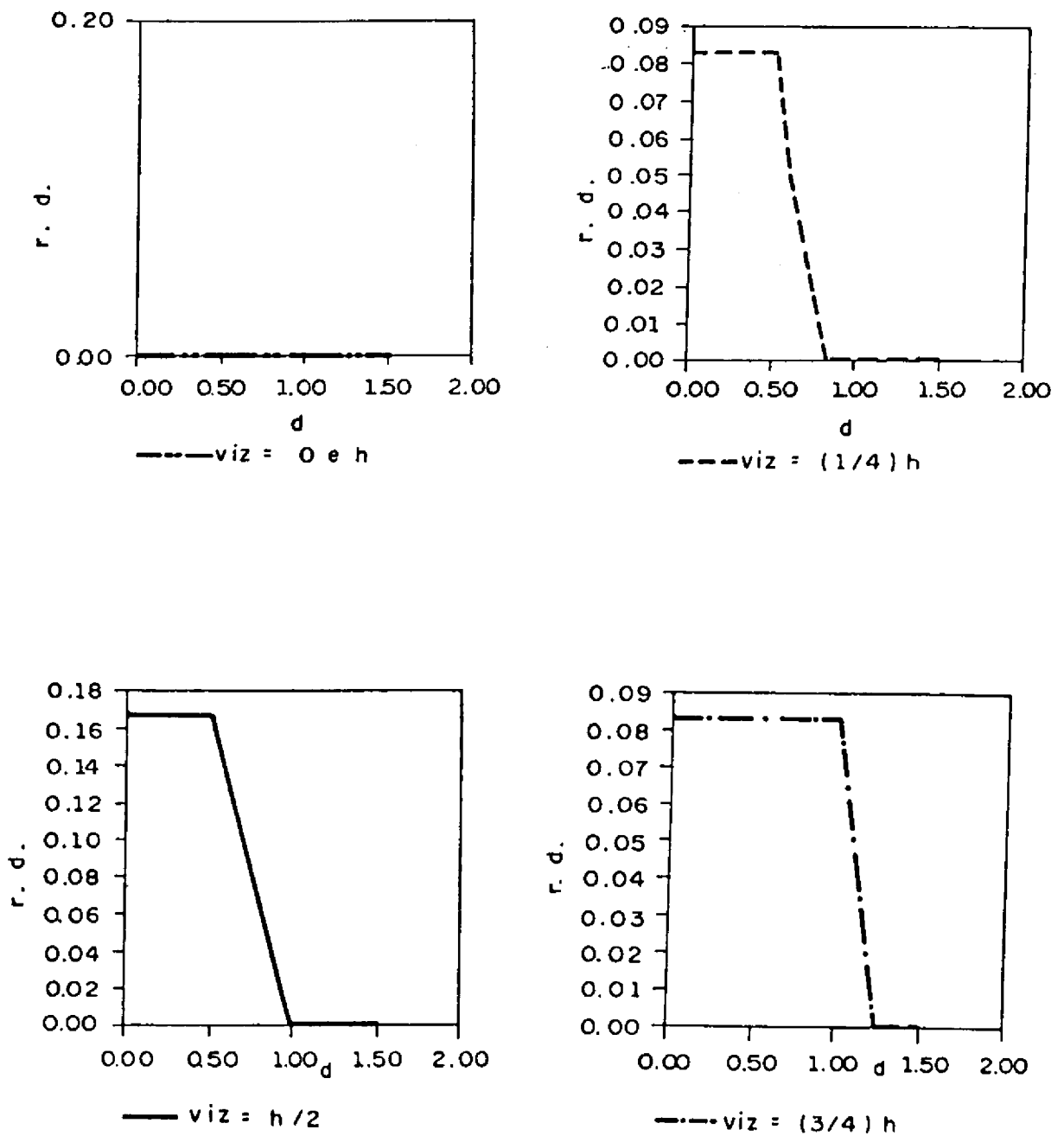
Com os valores dos "pixels" de interesse obtidos, foi então aplicado o detetor **"operador de borramento e mínimo"**, chegando-se a Figura 7.16.

Observando-se a Figura 7.16, verifica-se que no caso do detetor **"operador de borramento e mínimo"**, se a vizinhança da sub-região 3x3 adotada for " $\alpha = 0$ e $\alpha = h$ ", o comportamento será invariante ao deslocamento "d" da borda; caso a vizinhança seja " $\alpha = (h/4)$, $\alpha = (h/2)$ e $\alpha = (3h/4)$ ", o comportamento será monotônico decrescente.

7.2.1.3 - CASO DO DETETOR "OPERADOR DE BORRAMENTO E MÍNIMO" COM VIZINHANÇA SENDO EXTENSÃO DA BORDA

Foi calculado da mesma forma que no caso da vizinhança de radiometria constante: trocando os valores dos "pixels" envolvidos. Tais valores são mostrados na Figura 7.17.

Com estes valores, recorrendo à aplicação do detetor, chegou-se ao resultado final mostrado na Figura 7.18.



(a) detalhe do resultado final conjunto

Fig. 7.16 - Resultado final do "operador de borramento e mínimo" com deslocamento horizontal de radiometria constante.

(continua)

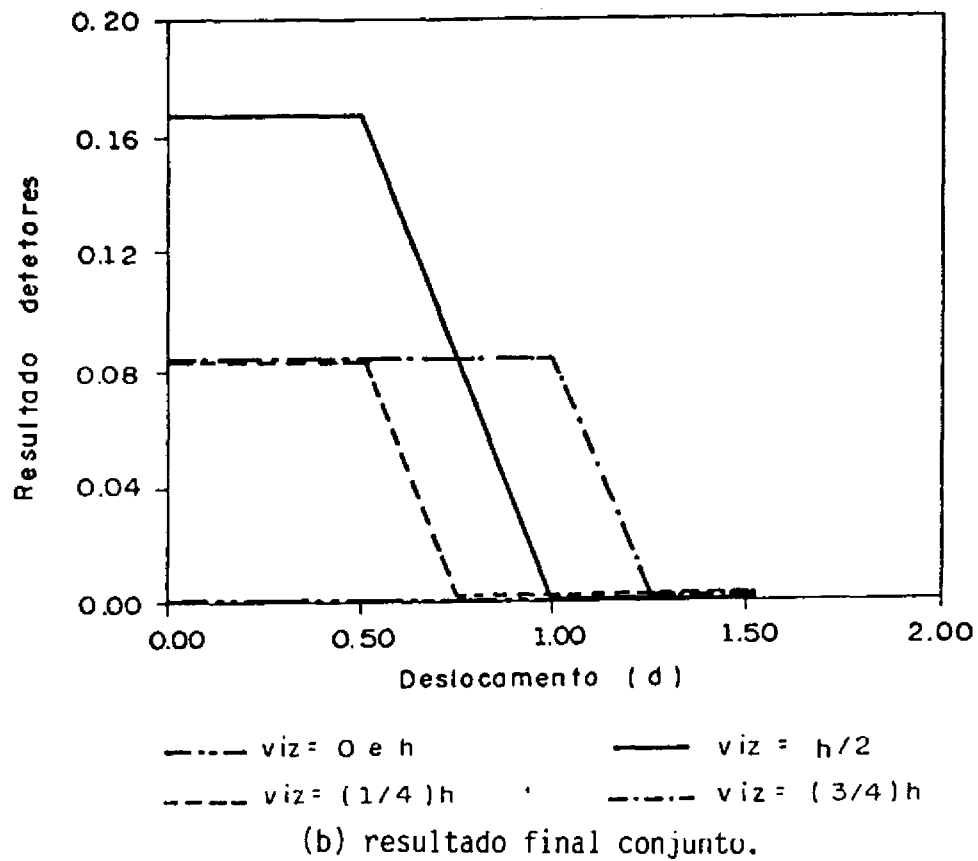


Fig. 7.16 - Conclusão.

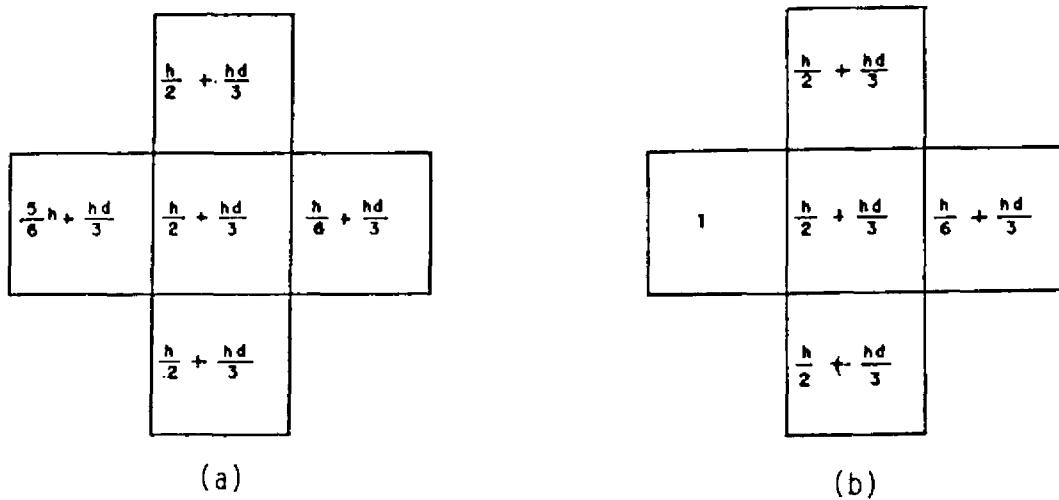


Fig. 7.17 - Valores dos "pixels" de interesse borrados com deslocamento horizontal extensão da borda.

a) $0 < d < 0.5$;b) $0.5 < d < 1.5$.

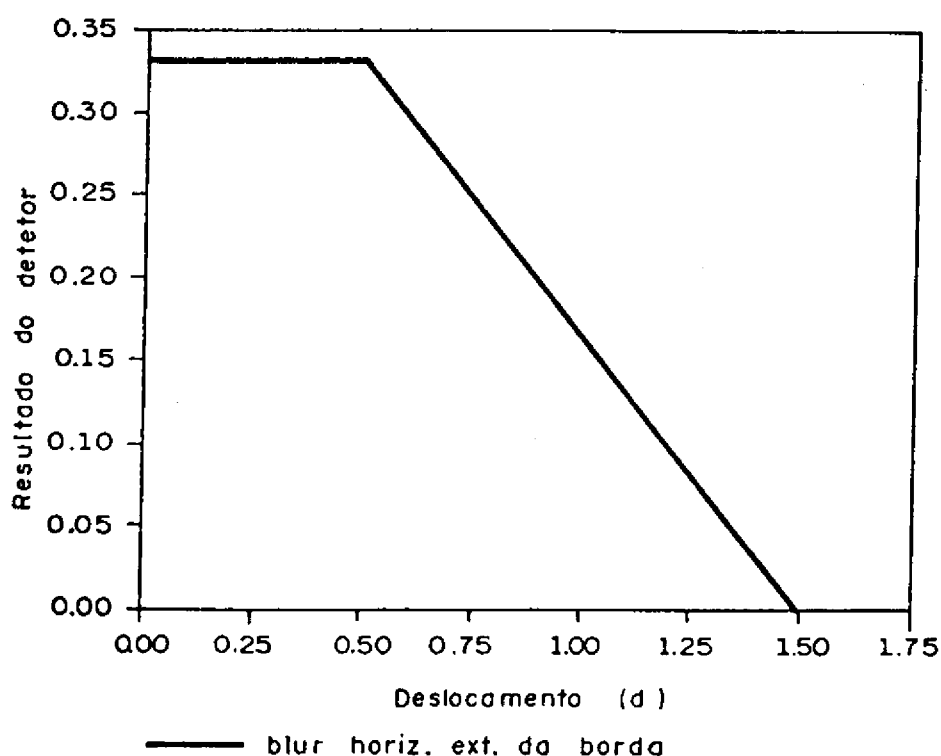


Fig. 7.18 - Resultado final do operador de borramento e mínimo com deslocamento horizontal extensão da borda.

Pela análise da Figura 7.18, observa-se um comportamento invariante até $d = 0,5$ e monotônico decrescente deste ponto até $d = 1,50$.

7.2.2 - CASO DE DESLOCAMENTO DIAGONAL

No deslocamento diagonal, o intervalo máximo da variação foi dividido em três subintervalos, a fim de que cada um deles representasse os valores dos "pixels" correspondentes corretamente.

7.2.2.1 - CASO DOS DETETORES MORFOLÓGICOS SIMPLES

Os valores encontrados para os "pixels" de interesse são mostrados na Figura 7.19.

$h(d^2 + \frac{1}{2})$	hd^2	0
h	$h(d^2 + \frac{1}{2})$	hd^2
h	h	$h(d^2 + \frac{1}{2})$

(a)

h	$h(\frac{d^2}{3} + \frac{1}{3})$	$h(\frac{d^2}{3} - \frac{1}{6})$
h	h	$h(\frac{d^2}{3} + \frac{1}{3})$
h	h	h

(b)

h	h	$h(\frac{d^2}{5} + \frac{1}{10})$
h	h	h
h	h	h

(c)

Fig. 7.19 - Valores dos "pixels" de interesse para os detetores morfológicos simples com deslocamento diagonal.

a) $0 < d < (\sqrt{2})/2$;

b) $(\sqrt{2})/2 < d < \sqrt{2}$;

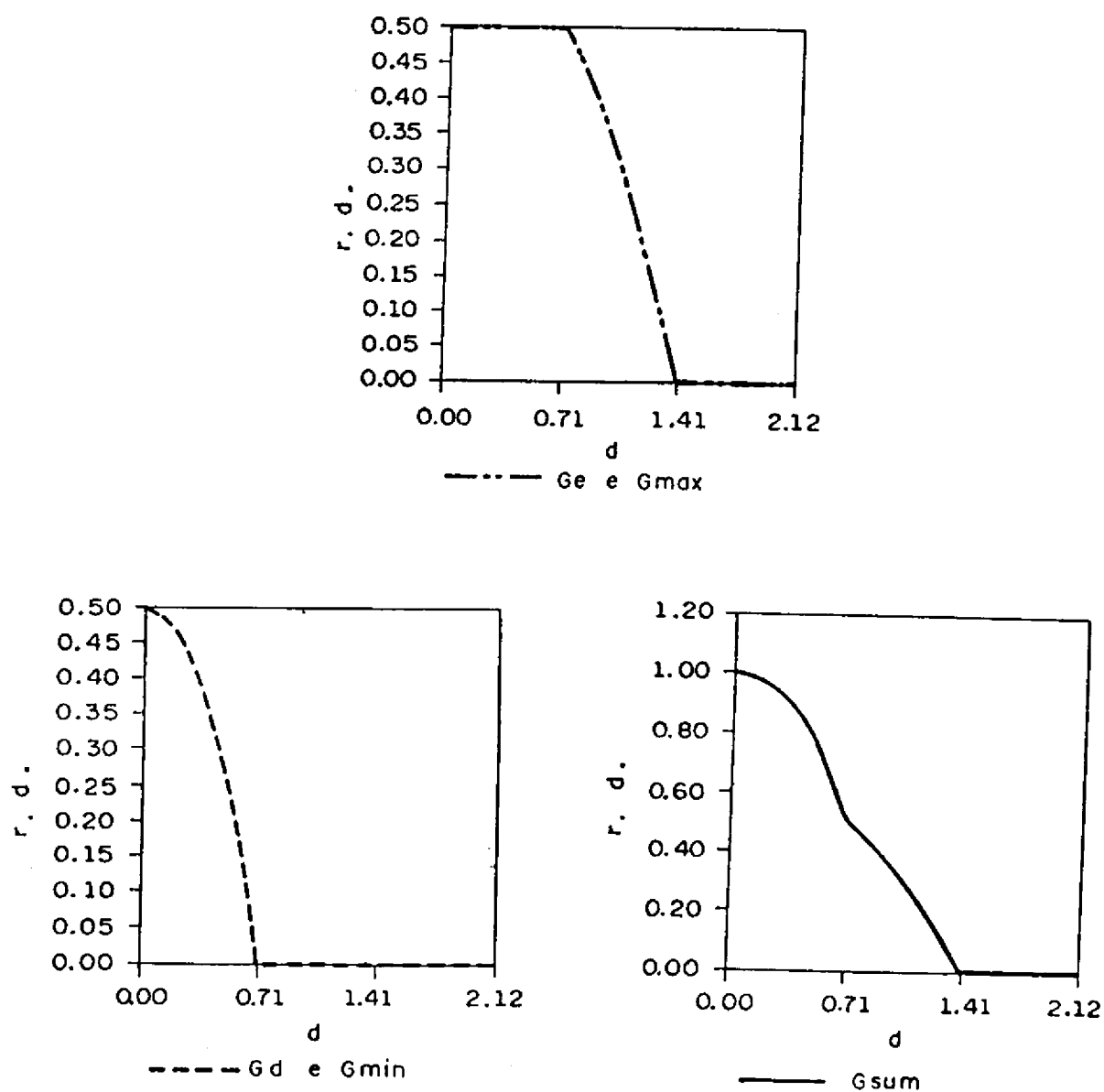
c) $\sqrt{2} < d < \frac{3\sqrt{2}}{2}$

Na Figura 7.19, "h" representa a intensidade máxima do "pixel" e "d" é o deslocamento no sentido diagonal em relação ao ponto central da sub-região 3x3 adotada.

Os valores dos "pixels" neste caso foram encontrados da mesma forma que no deslocamento horizontal, mas aqui os valores de "d" nos pontos limitantes foram 0; $(\sqrt{2})/2$; $\sqrt{2}$ e $(3\sqrt{2})/2$.

Com o resultado obtido na Figura 7.19 foi possível aplicar os detetores de borda morfológicos simples implementados, chegando-se ao resultado mostrado na Figura 7.20.

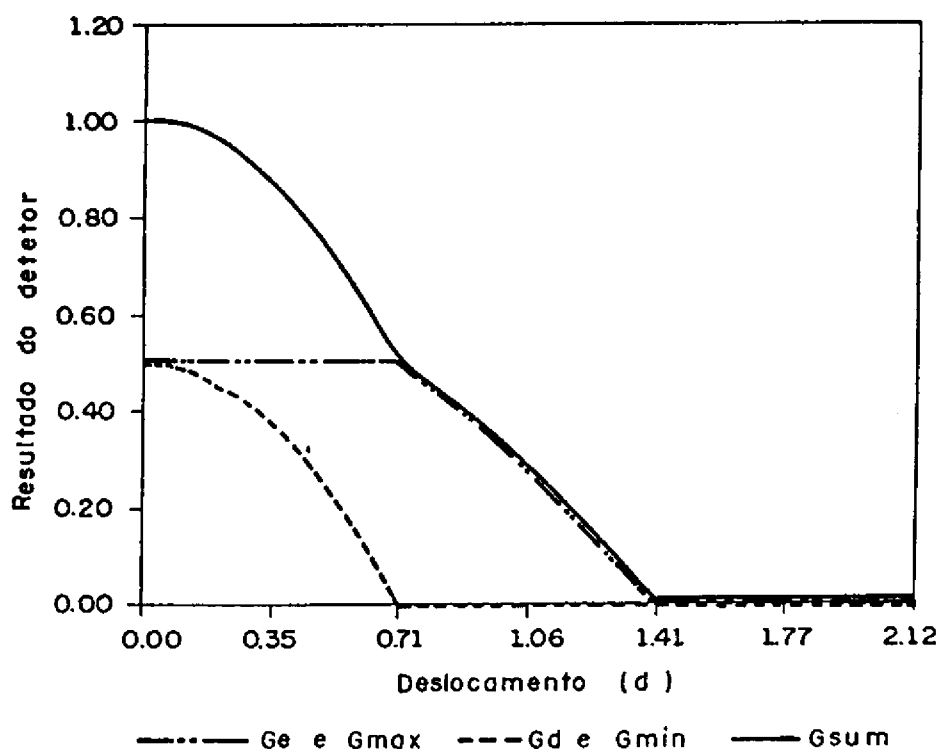
Todos esses resultados foram obtidos de programas que levaram em conta a formulação de cada detetor, bem como o deslocamento no sentido diagonal ocorrido. Também se pode observar que o resultado final atingido para todos os detetores de borda morfológicos simples implementados é monotônico decrescente ao longo da variação do deslocamento diagonal "d" da borda.



(a) detalhe do resultado final conjunto

Fig. 7.20 - Resultado final dos detetores de borda morfológicos simples com deslocamento diagonal.

(continua)



(b) resultado final conjunto

Fig. 7.20 - Conclusão.

7.2.2.2 - RESULTADO DO DETETOR "OPERADOR DE BORRAMENTO E MÍNIMO" COM VIZINHANÇA DE RADIOMETRIA CONSTANTE

Dando continuidade, falta ser apresentado o resultado obtido pela aplicação do detetor de borda "operador de borramento e mínimo". No primeiro passo, foi feito o borramento dos "pixels" de interesse, conforme já explicado, chegando-se ao resultado mostrado na Figura 7.21, onde "h" representa a intensidade máxima, "d" é o deslocamento no sentido diagonal e " α " é o valor dos "pixels" da vizinhança da sub-região adotada, já citado.

$$\begin{array}{c}
 \frac{\alpha}{3} + \frac{4hd^2}{9} + \frac{2}{9}h \\
 \frac{\alpha}{3} + \frac{hd^2}{3} + \frac{4}{9}h \quad \frac{h}{2} + \frac{5}{9}hd^2 \quad \frac{\alpha}{3} + \frac{2}{9}h + \frac{4}{9}hd^2 \\
 \frac{\alpha}{3} + \frac{4}{9}h + \frac{hd^2}{3}
 \end{array} \quad (a)$$

$$\begin{array}{c}
 \frac{\alpha}{3} + \frac{7}{18}h + \frac{hd^2}{9} \\
 \frac{\alpha}{3} + \frac{16h}{27} + \frac{hd^2}{27} \quad \frac{13}{18}h + \frac{hd^2}{9} \quad \frac{\alpha}{3} + \frac{7}{18}h + \frac{hd^2}{9} \\
 \frac{\alpha}{3} + \frac{16h}{27} + \frac{hd^2}{27}
 \end{array} \quad (b)$$

$$\begin{array}{c}
 \frac{\alpha}{3} + \frac{51}{90}h + \frac{hd^2}{45} \\
 \frac{\alpha}{3} + \frac{2}{3}h \quad \frac{81}{90}h + \frac{hd^2}{45} \quad \frac{\alpha}{3} + \frac{51}{90}h + \frac{hd^2}{45} \\
 \frac{\alpha}{3} + \frac{2}{3}h
 \end{array} \quad (c)$$

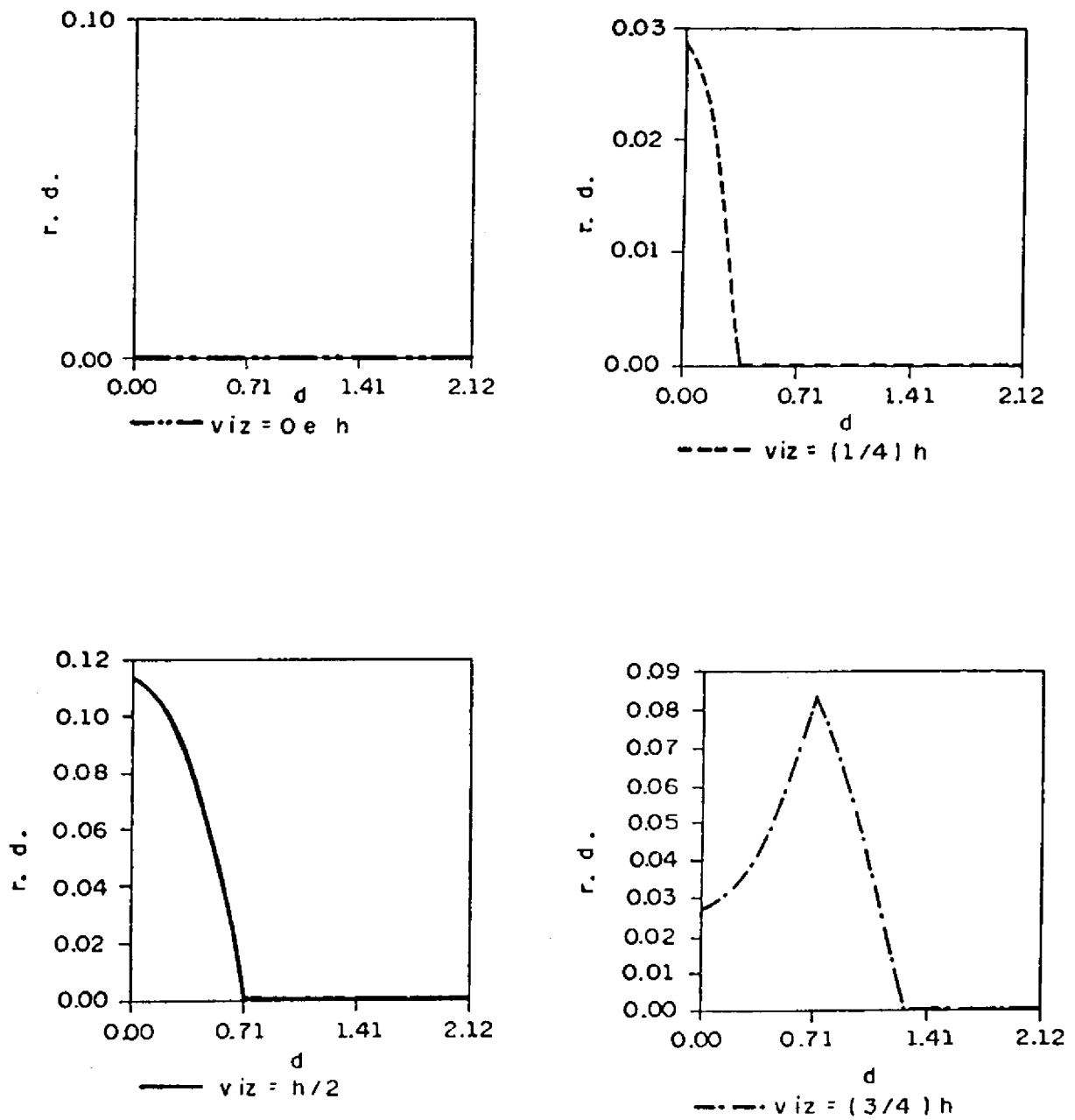
Fig. 7.21 - Valores dos "pixels" de interesse borrados com deslocamento diagonal radiometria constante.

- a) $0 < d < (\sqrt{2})/2$;
- b) $(\sqrt{2})/2 < d < \sqrt{2}$;
- c) $\sqrt{2} < d < (3\sqrt{2})/2$.

Os valores encontrados para os "pixels" de interesse borrados na Figura 7.21 foram calculados da mesma forma que no caso do deslocamento horizontal, ou seja, fazendo a média aritmética de cada sub-região 3x3, de forma que cada "pixel" de interesse ocupe, para efeito do cálculo do borramento, a posição central da sub-região.

Com esses valores foi possível, chegar ao resultado final da aplicação desse detetor que é mostrado na Figura 7.22.

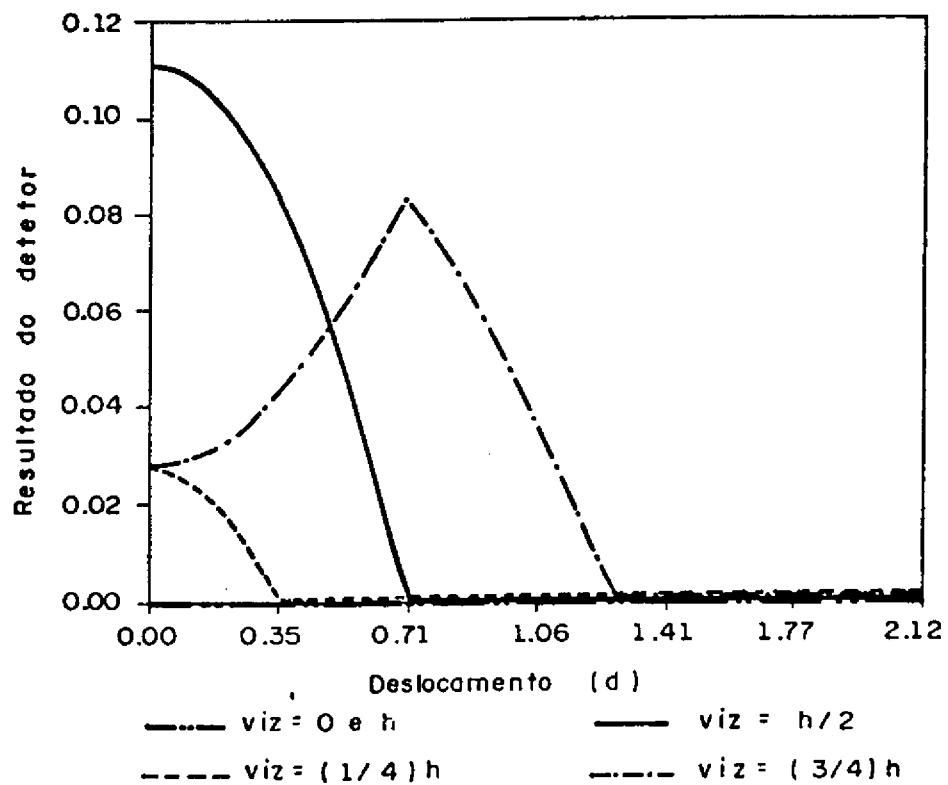
Ao fazer uma análise da Figura 7.22, vê-se que a resposta final do detetor é invariante ao deslocamento no caso de " $\alpha = 0$ e $\alpha = h$ ", monotônico decrescente no caso de " $\alpha = h/4$ e $\alpha = h/2$ " e, finalmente, se a vizinhança é " $\alpha = 3h/4$ ", o resultado apresenta o máximo próximo de " d " igual a $\sqrt{2}/2$.



(a) detalhe do resultado final conjunto

Fig. 7.22 - Resultado final do "operador de borramento e mínimo" com deslocamento diagonal radiometria constante.

(continua)

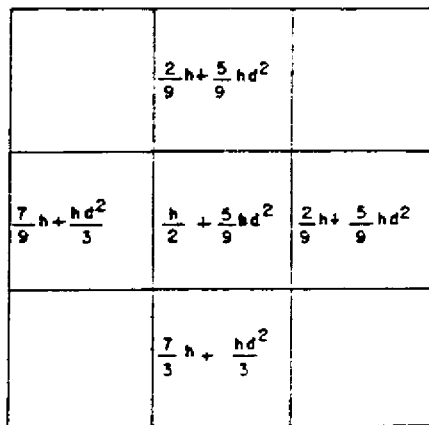


(b) resultado final conjunto

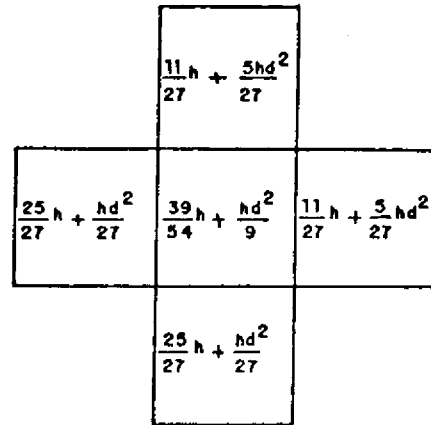
Fig. 7.22 - Conclusão.

7.2.2.3 - CASO DO DETETOR "OPERADOR DE BORRAMENTO E MÍNIMO" COM VIZI-NHANÇA SENDO EXTENSÃO DA BORDA

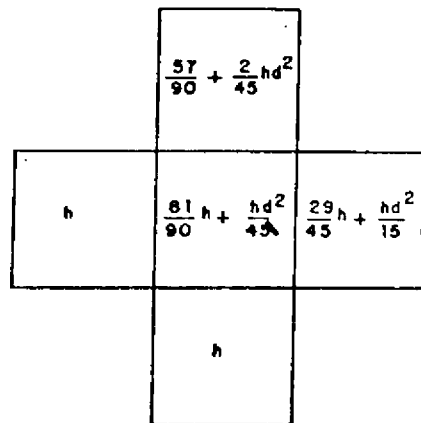
Ao se borrar os "pixels" de interesse da mesma forma explicada anteriormente, pode-se chegar ao resultado mostrado na Figura 7.23.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7.23 - Valores dos "pixels" de interesse borrados com deslocamento diagonal extensão da borda.

- a) $0 < d < \sqrt{2}/2$;
 b) $\sqrt{2}/2 < d < \sqrt{2}$;
 c) $\sqrt{2} < d < 3\sqrt{2}/2$.

Aplicando a esses valores o detetor em questão, chega-se ao resultado final ilustrado na Figura 7.24.

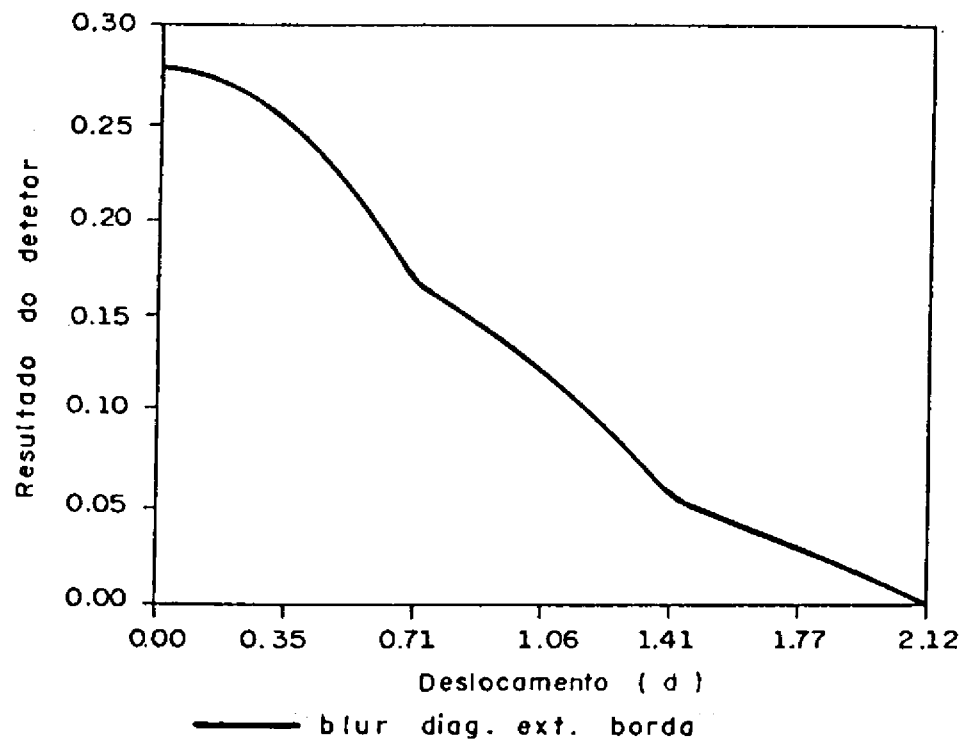


Fig. 7.24 - Resultado final do detetor "operador de borramento e mínimo" com deslocamento diagonal extensão da borda.

Pela Figura 7.24, percebe-se que o comportamento monotônico decrescente ocorre em todo o intervalo estudado.

7.3 - COMENTÁRIOS ADICIONAIS

O resultado desejável dos detetores no caso da variação da orientação " φ " da borda é que, no caso ideal, tenham comportamento invariante com essa orientação. Em função disso, os detetores que melhor responderam com a variação da orientação " φ " foram os detetores morfológicos simples implementados, ou seja, Ge, Gd, Gmax, Gmin e Gsum.

Por outro lado, o resultado esperado para os detetores de borda no caso da variação do deslocamento "d" da borda, seja no sentido horizontal ou diagonal, é um rápido declínio com o deslocamento. Neste caso, os melhores detetores foram Gd e Gmin (deslocamento horizontal) e Gblur (deslocamento diagonal no caso de vizinhança constante igual a $(1/4)h$). Se não é considerada a situação artificial de vizinhança constante, o melhor desempenho no caso de deslocamento diagonal é apresentado pelos detetores Gd e Gmin. Não apresentaram comportamento monotônico decrescente com o deslocamento os detetores Ge e Gmax (deslocamento horizontal) e Gblur (no caso de deslocamento diagonal com vizinhança constante igual a $(3/4)h$).

Os programas dos detetores de borda morfológicos foram implementados no ambiente SITIM, baseado num micro-computador do tipo IBM-PC-XT, na linguagem "C" sob o sistema operacional DOS. Dois programas foram utilizados para se obter as imagens de borda:

- 1) Programa para geração dos detetores resíduo da erosão (Ge), resíduo da dilatação (Gd), combinado máximo (Gmax), combinado mínimo (Gmin) e combinado da soma (Gsum). O tempo de processamento total foi de 11 minutos.
- 2) Programa para geração de detetor "operador de borrimento e mínimo (Gblur). O tempo de processamento total incluindo a geração de imagens borrada e a obtenção da imagem de bordas foi de 8 minutos.

CAPÍTULO 8

ANÁLISE DOS RESULTADOS VISUAIS OBTIDOS

8.1 - COMPARAÇÃO VISUAL ENTRE OS DETETORES DE BORDA MORFOLÓGICOS IMPLEMENTADOS

Esta seção tem por finalidade comparar o desempenho visual entre os detetores de borda morfológicos implementados em termos visuais.

8.1.1 - IMAGEM ORIGINAL SIMULADA

Os resultados esperados segundo Lee et al. (1987) para cada detetor implementado, no caso de uma borda ideal, puderam ser comparados. Com isso pode-se comprovar que é correta a implementação dos detetores morfológicos da presente dissertação.

8.1.2 - IMAGEM ORIGINAL REAL URBANA (AEROPORTO)

Tal comparação, no caso da imagem real urbana (Figura 6.2), é baseada na discriminação das pistas do aeroporto, visto que estas compõem o melhor conjunto de bordas retilíneas da imagem em questão. Como se pretende, num futuro próximo, usar esta técnica em cartografia, o resultado aplicado a este conjunto pode ser melhor observado em vista do objetivo cartográfico de atualização de cartas. Outra explicação é que tal aeroporto possui bordas próximas, o que evidencia o resultado final atingido, facilitando assim as conclusões obtidas pela comparação. As pistas podem ser reunidas em dois grupos, um composto pelas pistas de maior extensão e o outro formado pelas pistas de menor extensão.

Pela comparação visual dos resultados obtidos através da aplicação dos detetores de borda morfológicos implementados (Figuras de

6.15 a 6.19 e 6.22), podem-se agrupá-los em termos de desempenho em três grupos, a saber:

GRUPO I { - resíduo da dilatação (Figura 6.16),
- combinado mínimo (Figura 6.18);

GRUPO II { - resíduo da erosão (Figura 6.15),
- combinado da soma (Figura 6.19),
- combinado máximo (Figura 6.17);

GRUPO III { - operador de borramento e mínimo (Figura 6.22).

O desempenho visual encontrado é crescente em função do grupo, isto é, o grupo III apresenta o melhor desempenho visual encontrado entre os detetores de borda morfológicos implementados o que pode ser comprovado ao visualizar as três pistas menores do aeroporto na imagem original (Figura 6.2), as quais se percebe claramente por ocasião da aplicação do detetor. A visualização das pistas maiores é também perceptível no resultado final do referido grupo. O grupo II apresenta um desempenho razoável, o que fica mais claro por ocasião da observação das pistas menores do aeroporto, onde na imagem original (Figura 6.2) se vêem três linhas, enquanto que nas imagens geradas por este grupo são vistas apenas duas. E por último, o grupo I apresenta o pior desempenho encontrado. Tal conclusão pode ser obtida quando se observam as pistas maiores do aeroporto contidas na imagem original (Figura 6.2), que se tornam únicas no resultado final deste grupo.

8.1.3 - IMAGEM ORIGINAL REAL RURAL (PIVÔS)

Fazendo uma análise dos resultados visuais obtidos (Figuras 6.30 a 6.35), podem-se agrupar os detetores em dois grupos:

- | | | |
|----------|---|---|
| GRUPO I | { | <ul style="list-style-type: none"> - resíduo da erosão (Figura 6.32), - resíduo da dilatação (Figura 6.33), - combinado máximo (Figura 6.34), - combinado mínimo (Figura 6.35), - combinado da soma (Figura 6.36); |
| GRUPO II | { | <ul style="list-style-type: none"> - operador de borramento e mínimo (Figura 6.37). |

Tal análise foi feita com base em um trecho da imagem original mostrado na Figura 8.1, já que o restante da imagem tem desempenho visual semelhante.



Fig. 8.1 - Seta que indica o trecho da imagem original rural utilizado para comparação dos detetores.

O GRUPO I, que corresponde a todos os detetores de borda morfológicos simples implementados, teve um bom desempenho em função das próprias características da imagem original (Figura 6.3), ou seja, bordas bem identificáveis.

O GRUPO II, formado pelo "**operador de borramento e mínimo**", teve um melhor resultado geral na detecção de bordas, que foi possível após uma análise visual do trecho utilizado para a comparação (Figura 8.1).

8.2 - COMPARAÇÃO VISUAL DOS DETETORES DE BORDA MORFOLÓGICOS IMPLEMENTADOS COM UM DETETOR CONVENCIONAL

De posse de todas as imagens binárias resultantes da aplicação dos detetores (Figuras de 6.15 a 6.19, 6.22, 6.30 a 6.35), julgou-se interessante fazer uma comparação visual dos destes com um detetor de borda convencional. O escolhido foi o "**detetor de borda gradiente**" já implementado no sistema SITIM (sistema no qual foram efetuados os testes). Tal escolha fundamenta-se na disponibilidade deste detetor dentro do sistema utilizado.

O detetor de borda gradiente baseia-se na aplicação de aproximação digital do gradiente, segundo o seguinte esquema. Dado um conjunto de 9 "pixels", obedecendo à convenção a seguir:

a	b	c
d	e	f
g	h	i ,

obtém-se a aproximação do gradiente pela expressão:

$$e = |a - i| + |c - g| + |d - f| + |b - h| . \quad (8.1)$$

As imagens de borda gradiente binárias resultantes para cada uma das imagens reais utilizadas são mostradas nas Figuras 8.2 e 8.3, respectivamente.

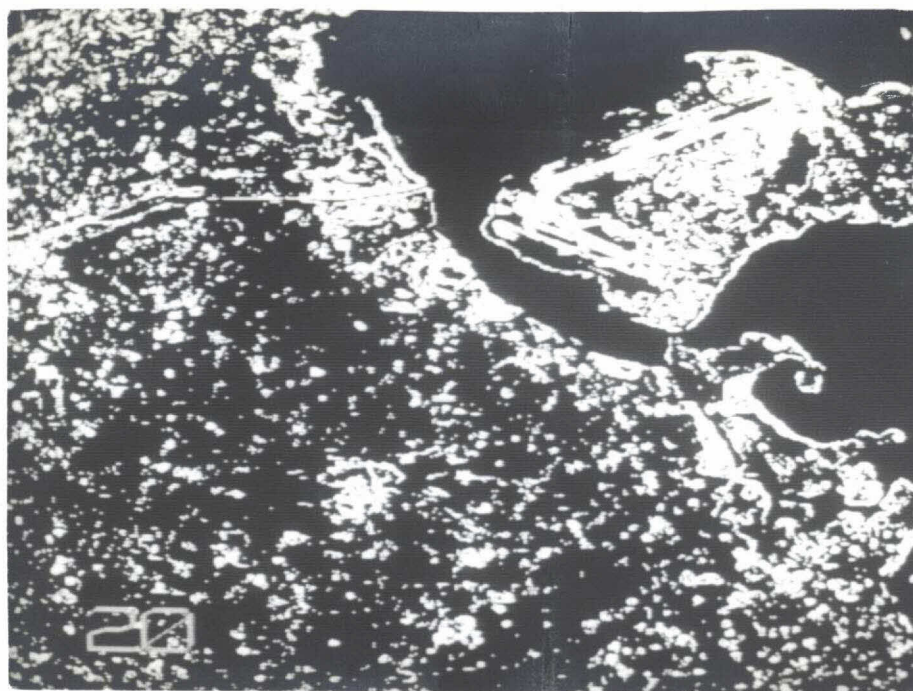


Fig. 8.2 - Borda gradiente binária para a imagem real urbana.

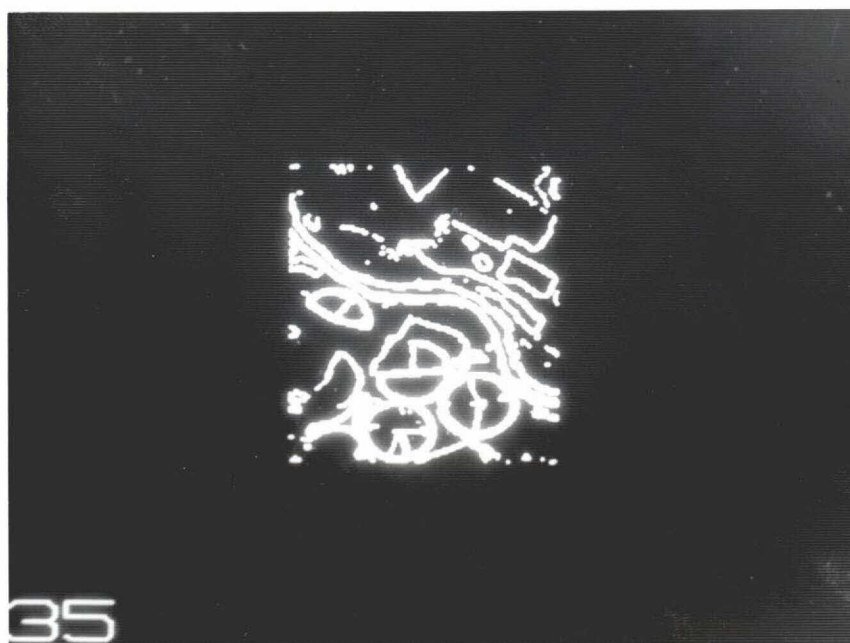


Fig. 8.3 - Borda gradiente binária para a imagem real rural.

Pela comparação visual das imagens binárias resultantes (Figuras de 6.15 a 6.19, 6.22 e 6.33 a 6.37) com as imagens gradiente binárias (Figuras 8.2 e 8.3), todas nas mesmas condições, ou seja, com o limiar escolhido de 15%, pode-se concluir que os detetores de borda morfológicos levam vantagem no resultado final da detecção de borda sobre o resultado final binário gradiente das duas imagens reais testadas.

No caso da imagem real urbana, a comparação foi feita tomando por base as pistas do aeroporto contidas na imagem original. Tais pistas, no caso da Figura 8.2, se fundiram, o que não ocorreu com os detetores morfológicos implementados. Já para a imagem real rural, a conclusão foi obtida comparando as imagens resultantes da aplicação dos detetores morfológicos com a Figura 8.3 onde, apesar de a espessura das bordas ser menor, o número de bordas detectado é bem inferior ao obtido pelos detetores morfológicos implementados.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são abordadas as conclusões que puderam ser tiradas dos resultados obtidos, bem como algumas recomendações para trabalhos futuros.

Os detetores de borda morfológicos implementados tiveram melhor desempenho visual do que o detetor convencional **"gradiente"**.

Observando os resultados atingidos para a imagem simulada, verifica-se que eles estão de acordo com os resultados esperados em trabalhos de Lee et al. (1987). Tal conclusão pode ser ainda expandida, e pode-se dizer que a forma com que os detetores de borda foram implementados seguiu o que preconizava a sua teoria de formulação; sendo assim, os resultados obtidos nas imagens reais estão corretos.

Os resultados visuais obtidos no caso da imagem real urbana mostraram pior desempenho para os detetores **"resíduo da dilatação"** e **"combinado mínimo"**; desempenho médio para os detetores **"resíduo da erosão"**, **"combinado máximo"** e **"combinado da soma"**; e melhor desempenho para o detetor **"operador de borramento e mínimo"**.

Os resultados visuais obtidos no caso da imagem real rural mostraram que os detetores de borda, quanto ao desempenho, se dividiram em dois grupos: um formado pelos detetores **"resíduo da erosão"**, **"resíduo da dilatação"**, **"combinado máximo"**, **"combinado mínimo"** e **"combinado da soma"**; e o outro formado pelo detetor **"operador de borramento e mínimo"**, sendo este o de melhor desempenho.

Pelo exposto nos dois parágrafos anteriores, o agrupamento dos detetores em função do desempenho visual observado pode ter ocorrido pelas características das imagens reais utilizadas.

As duas imagens reais utilizadas podem ser consideradas, quando observadas visualmente, isentas de ruído, o que pode também ter influenciado os resultados visuais atingidos.

Os resultados quantitativos alcançados mostram que os melhores detetores de bordas implementados foram Gd e Gmin (deslocamento horizontal) e Gblur (deslocamento diagonal com vizinhança de radiometria constante para a vizinhança a $\alpha = 1/4h$) ou Gd e Gmin (deslocamento diagonal), não considerando a radiometria constante. Pode-se ainda dizer que o pior desempenho ocorreu para os detetores Ge e Gmax (deslocamento horizontal) e Gblur (deslocamento diagonal com vizinhança de radiometria constante para $\alpha = 3/4h$).

Algumas recomendações podem ser dadas a fim de contribuir para as pesquisas futuras na área de morfologia matemática que envolve a detecção de bordas em imagens orbitais.

Como principais recomendações, citam-se:

- Realização de testes em imagens ruidosas para que se possa avaliar melhor o desempenho dos detetores de borda morfológicos implementados nesta dissertação.
- Estudos relativos ao valor do fator de limiarização para que o melhor resultado visual binarizado seja verificado.
- Estudos para o desenvolvimento de detetores morfológicos direcionais para que se possa evidenciar feições de interesse.
- Variação do tamanho da vizinhança adotada para que se possa estudar a sua influência sobre o resultado final obtido.
- No caso da imagem borrada, realizar um estudo sobre outros tipos de filtragem que possam ser utilizados.

- Realizar um estudo do desempenho dos detetores através do algoritmo "Ho-Kashyap", o qual consiste em encontrar o melhor vetor peso "W" para que protótipos sejam classificados em duas únicas classes, borda e não-borda, conforme sugestão de Abdou e Pratt (1979) para os detetores convencionais.
- Realizar um estudo do desempenho dos detetores através da figura de mérito, introduzindo ruído impulsivo e gaussiano sobre a imagem original. A figura de mérito proposta por Abdou e Pratt (1979) para os detetores convencionais deverá ser adaptada no caso de detetores morfológicos. Isso se deve ao fato de que diferentes detetores de borda morfológicos respondem de maneira diversa ao ruído. Verifica-se, por exemplo, que G_e responde a um único ruído impulsivo numa vizinhança-8 ao redor do ponto considerado; G_{max} e G_{sum} respondem no ponto considerado e numa vizinhança-4 ao redor deste; G_{min} e G_{blur} são insensíveis ao ruído impulsivo (Lee et al. 1987).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOU, I.E. Quantitative methods of edge detection. Los Angeles, CA, USCIP, July 1978, 167 p. (USCIP Report 830).

ABDOU, I.E.; PRATT, W.K. Quantitative design and evaluation of enhancement/thresholding edge detectors. Proceedings of the IEEE, 65(5):753-763, May 1979.

BARRERA, J. Abordagem unificada para os problemas de processamento digital de imagens: a morfologia matemática. Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada, São José dos Campos, INPE, 1987.

DUDA, R.O.; HART, P.E. Pattern classification and scene analysis. New York, NY, John Wiley, 1973.

HARALICK, R.M. Edge and region analysis for digital data. Computer Graphics and Image Processing, 12(1):60-73, 1980.

HUECKEL, M. An operator which locates edges in digitized pictures. Journal of Association Computer Machine, 18(1):113-125, 1971.

KIRSCH, R. Computer determination of the constituent structure of biological images. Computers and Biological Images, Computers and Biomedical Research, 4(3):315-328, 1971.

LEE, J.S.; HARALICK, R.M.; SHAPIRO, L.G. Morphologic edge detection. IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-3(2):142-156, 1987.

MARR, D.; HILDRETH, E. Theory of edge detection. Proceedings of the Royal Society of London, B207:187-217, 1980.

MASCARENHAS, N.D.A.; PRADO, L.D.C. A Bayesian approach to edge detection in images. IEEE Transactions on Automation Control, AC-25(1):36-43, 1980.

- MARAGOS, P.A. A unified theory on translation-invariant systems with applications to morphological analysis and coding of images. Doctoral Thesis in Digital Processing. Georgia, IS, 1985, p. 241.
- MATHERON, G. Radom sets and integral geometry. New York, NY, John Wiley, 1975.
- MODESTINO, J.W.; FRIES, R.W. Edge detection in noisy images using recursive digital filtering. Computer Graphics Image Processing, 6(5):409-433, 1977.
- PRATT, W.K. Digital image processing. New York, NY, John Wiley, 1978.
- ROBERTS, L.G. Machine perception of three-dimensional solids. In: TIPPET, J.T. et al., eds. Optical and Electro-Optical Information Processing. Cambridge, MIT Press, 159-197, 1965.
- SERRA, J. Image analysis and mathematical morphology. London, Academic Press, 1982.
- STERNBERG, S.R. Cellular computers and biomedical image processing. In: UNITED STATES-FRANCE SEMINAR ON BIOMEDICAL IMAGE PROCESSING; BIOMEDICAL IMAGES AND COMPUTERS, St. Pierre de Chartreuse, May 1980, 27-31. Selected papers. Berlin, Springer Verlag, 1980, p. 294-319 (Lectures Notes in Medical Information, 17).