

EXTRAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DE EDIFICAÇÕES COM ANÁLISE DO MODELO NUMÉRICO DE ELEVAÇÕES

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Ciências
Cartográficas da Faculdade de
Ciências e Tecnologia – UNESP, para
obtenção do título de Mestre em
Ciências Cartográficas.

DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS

**Presidente Prudente
Março, 2002**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS

**EXTRAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DE
EDIFICAÇÕES COM ANÁLISE DO MODELO
NUMÉRICO DE ELEVAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciências
Cartográficas da Faculdade de Ciências
e Tecnologia –UNESP, para obtenção
do título de Mestre em Ciências
Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli

**Presidente Prudente
Março, 2002**

TERMO DE APROVAÇÃO

DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS

**EXTRAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DE EDIFICAÇÕES COM ANÁLISE
DO MODELO NUMÉRICO DE ELEVAÇÕES**

Comissão Julgadora

Dissertação para obtenção do título de mestre

Presidente e Orientador.....
2º Examinador.....
3º Examinador.....

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu filho João Victor, aos meus pais, minha avó⁺, meu avô, meu grande Maestro Antonio Carlos “Brasileiro” Jobim⁺ e ao grande trompetista “cool jazz” *Chet Baker*⁺.

Gostaria também de dedicar este trabalho a todos os operadores de restituição fotogramétrica, pois a idéia deste trabalho surgiu com a preocupação da minimização do esforço operacional.

AGRADECIMENTOS

É difícil reunir todas as pessoas que tiveram contato direto e indireto ao longo de um trabalho extenso como este (considerando a formação acadêmica). Mas em particular expresso meus agradecimentos:

- ✓ ao Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli, que me orientou não somente às melhores diretrizes deste trabalho, como também em alguns momentos críticos de minha vida pessoal;
- ✓ aos professores do departamento de Cartografia e da Pós-Graduação;
- ✓ ao meu grande irmão Samuel, mostrando-me o caminho da serenidade;
- ✓ aos amigos: Ítalo; Danoninho, Mário; Fran; Geraldo; Wagninho; Milton; e Silvio por colaborarem com idéias (sem mesmo se conscientizarem disso);
- ✓ aos caros Prof. Dr. Nilton Imai, Prof. Dr. Arana e Prof. Galo, por terem proferido palavras de força em momentos difíceis;
- ✓ à todos os funcionários da FCT;
- ✓ aos caros colegas do laboratório de Fotogrametria Digital e da Pós-Graduação;
- ✓ à Empresa de Aerofotogrametria e Aerolevantamentos Esteio, por ter fornecido os dados para a realização deste trabalho;
- ✓ à Fapesp (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro através dos auxílios n. 97-10749-4. (Infra III) e n. 00/00539-7 (Bolsa de Mestrado).

EPÍGRAFE

“Será possível um dia, o homem controlar as características instáveis da Ciência, buscando uma nova identidade de soluções e problemas, ao acaso infinito de possibilidades que o universo nos proporciona?”.

Será sempre justo o homem da Ciência julgar-se soberano, desacreditado das forças exteriores que movem seus instintos?

Talvez um dia então, ficará claro que todas as Ciências, conseguirão atribuir, relacionar e manipular todo seu potencial, unificando seus mistérios às outras formas em potencialidade!”

Daniel, 03 de 2002

CONTEÚDO

FOLHA DE ROSTO	i
TERMO DE APROVAÇÃO	ii
DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
EPÍGRAFE.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Objetivos do Trabalho	2
1.3 Estrutura do trabalho	3
CAPÍTULO 2.....	4
REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA	4
2.1 Extração de Feições.....	4
2.1.1 Considerações Iniciais	4
2.1.2 Etapa de Suavização.....	6
2.1.2.1 Filtro Mediana	7
2.1.2.2 Filtro Mediana com Preservação de Bordas e Cantos.....	8
2.1.3 Etapa de Detecção de Bordas	9
2.1.3.1 Detectores de Bordas	11
2.1.3.2 Operadores de Prewitt e Sobel.....	11
2.1.3.3. Operador de Nevatia e Babu.....	12
2.1.4 Etapa de Limiarização Automática.....	14
2.1.4.1 Técnicas de Obtenção de um Limiar.....	15
2.1.5 Etapa de Afinamento de Bordas	19
2.1.5.1 Método de Supressão Não-Máxima.....	20
2.1.6 Etapa de Conexão.....	22
2.1.6.1 Método de Varredura e Rotulação	22
2.1.7 Etapa do Ajustamento.....	25
2.2 Etapa de Detecção de Cantos	25
2.2.1 OPERADOR MORAVEC	26
2.3 Geração do Modelo Numérico de Elevações.....	30

2.3.1 Definições	30
2.3.2 Fontes de Dados	31
2.3.2.1 Varredura a Laser.....	31
2.3.2.2 Fotogrametria.....	32
2.3.3 Aquisição dos Dados.....	33
2.3.3.1 Nível de Intervenção do Operador	33
2.3.3.1.1 Automática	33
2.3.4 Formas de Organização e Armazenamento do Modelo de Elevações	34
2.3.4.1 Forma de Organização.....	35
2.3.4.2 Forma de Armazenamento.....	36
2.4 Arquitetura e Rotinas Operacionais do Sistema Socet Set	37
2.5 Geração Automática de Modelos no Sistema Socet Set.....	37
2.5.1 Estratégia de Filtragem e Eliminação de Edificações e Árvores.....	38
2.6 Extração Automática de Feições no Socet Set.....	40
2.6.1 Funções com Recursos de PDI.....	40
CAPÍTULO 3.....	41
MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 Materiais	41
3.2 Metodologia.....	41
3.2.1 Definição de Parâmetros do Projeto.....	43
3.2.2 Importação das Imagens.....	43
3.2.3 Orientação Interior.....	43
3.2.4 Fototriangulação.....	44
3.3 Técnicas de Extração de Feições em Empresas de Fotogrametria	44
3.4 Metodologia Empregada para Elaboração de um Fluxo de Etapas para Extração de Semi-Automática de Feições.....	46
3.5 Etapa de Intersecção de Retas	47
3.6 Metodologia Utilizada para Converter MNE numa Imagem em Tons de Cinza	50
3.7 Estudo de Zonas sem Correspondência.....	56
3.7.1 Estudo Teórico de Fatores que Provocam Perturbações na Geração do MNE.....	56
3.7.1.1 Deslocamento Devido ao Relevo.....	56
3.7.1.2 Sombras.....	61
3.7.1.3 Ângulo de Abertura da Câmara	62
3.7.2 Problemas no Algoritmo de Geração de Modelos de Elevações Utilizados pelo Sistema Socet Set.....	64
3.8 Processo de Eliminação de Linhas Consideradas Insignificantes por Votação.....	67
CAPÍTULO 4.....	70

EXPERIMENTOS E ANÁLISES.....	70
4.1 Ferramenta <i>Sketch</i> – Extração Semi-Automática de Feições do Socet Set	70
4.2 Geração Automática de MNE	71
4.3 Descrição e Análise da Ferramenta de Extração Semi-Automática de Edificações de Interesse.....	78
CAPÍTULO 5.....	101
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	101
5.1 Conclusões	101
5.2 Recomendações.....	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E BIBLIOGRAFIA	105
Referências Bibliográficas	105
Bibliografia	107
APÊNDICE A	109
APÊNDICE B	119
APÊNDICE C	128
APÊNDICE D	134

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Uma das seqüências utilizadas para extração de feições.....	6
Figura 2.2 - Processo de convolução aplicado numa imagem digital	6
Figura 2.3 - Aplicação do filtro mediana _{3x1} numa linha da imagem.....	7
Figura 2.4 - Filtros direcionados de suavização com preservação de bordas e cantos	8
Figura 2.5 - (a) Imagem original; (b) Aplicação do filtro mediana; (c) Aplicação do filtro de suavização com preservação de bordas	9
Figura 2.6 - (a) imagem com descontinuidade, (b) sinal da descontinuidade, (c) primeira derivada do sinal e (d) segunda derivada do sinal.....	10
Figura 2.7 - Determinação da magnitude e direção dos gradientes	11
Figura 2.8 - Máscaras utilizadas no operador de Prewitt	12
Figura 2.9 - Máscaras utilizadas no operador de Sobel.....	12
Figura 2.10 - Máscaras utilizadas pelo operador Nevatia e Babu	13
Figura 2.11 - (a) Operador Sobel; (b) Operador Nevatia e Babu	14
Figura 2.12 - (a) Imagem aérea; (b) Histograma da imagem aérea (c) Imagem binária; (d) Histograma da imagem binária	15

Figura 2.13 – (a) Imagem original; (b) histograma da imagem; (c) Critério utilizado para a determinação do valor de limiar pelo Método do Triângulo (valores de borda alto e fundo baixo)	16
Figura 2.14 – (a) Método de limiarização OTSU; (b) Método de limiarização PUN	19
Figura 2.15 – (a) Situação ideal dos pixels representando um segmento; (b) Situação real da borda com alguns pixels de largura.....	20
Figura 2.16 - Direções consideradas no método de afinamento por supressão não máxima	21
Figura 2.17 – Detalhe gráfico da necessidade de interpolação na comparação de vizinhos na diagonal	21
Figura 2.18 - Supressão não-máxima aplicada na imagem	22
Figura 2.19 - Classificação dos pixels envolvidos no processo de conexão	23
Figura 2.20 - Solução para evitar o problema quando o pixel não possui direção e magnitude	24
Figura 2.21 - Vizinhanças a serem verificadas no processo de conexão.....	24
Figura 2.22 – (a) Caso em que não se consegue obter uma minimização suficiente; (b) Quebra das retas em retas menores.....	25
Figura 2.23 - (a) Janela 3x3 mostrando as direções 0^0 , 45^0 , 90^0 e 135^0 ; (b) sistema de referencia com origem no centro da janela 3x3.....	26
Figura 2.24 - (a) Imagem original em tons de cinza; (b) Resultado dos cantos detectados com uma máscara 3x3.	27
Figura 2.25 - Janela 3x3 mostrando as direções 26.6^0 , 63.4^0 , 116.6^0 e 153.4^0 (Fonte: Galo e Tozzi, 2000)	28
Figura 2.26 – (a) Imagem original; (b) Cantos detectados com 8 máscaras com um limiar obtido pelo método OTSU.....	29
Figura 2.27 - Geração de Modelo Digital de Elevação por varredura a laser (Fonte: Toposys)	31
Figura 2.28– Respostas da reflectância dos pulsos do laser	32
Figura 2.29 – Organização no formato regular	35
Figura 2.30 – Forma de armazenamento dos dados da grade regular.....	36
Figura 2.31 - Pirâmide Imagem (processo de Minificação).	39
Figura 2.32 – Perfil do Modelo gerado automaticamente.....	39
Figura 2.33 – Perfil do Modelo gerado com a utilização de filtros de suavização	40
Figura 3.1 – Fluxograma para intersecção de retas.....	48
Figura 3.2 - (a), (b) e (c) Imagens originais; (d), (e) e (f) Intersecções dos cantos das retas calculadas	49
Figura 3.3 – Arquivo <i>ASCII</i> gerado pelo sistema	51
Figura 3.4 – Área de cobertura da edificação de interesse definida pelo operador	51
Figura 3.5 – Representação do perfil do MNE gerado pelo sistema Socet Set	52
Figura 3.6 – Região de pontos definidos dentro de um limiar de altitude do topo.....	53

Figura 3.7 – Perfil de duas edificações	54
Figura 3.8 – (a) Imagem original; (b) Modelo convertido numa imagem em tons de cinza; (c) Bordas detectadas.....	54
Figura 3.9 - Fluxograma do processo de conversão do Modelo gerado numa imagem em tons de cinza.....	55
Figura 3.10 – Parâmetros do deslocamento devido ao relevo	57
Figura 3.11 – Deslocamento devido ao relevo.....	58
Figura 3.12 – Esquema de correção do MNE gerado (sem escala).....	60
Figura 3.13 – Perfil apresentado para ilustrar áreas de zonas sem correspondência; (b) Direção de correção do Δr	60
Figura 3.14 – Presença de sombras na tomada de imagens aéreas. (a) Imagem da esquerda; (b) imagem da direita.....	61
Figura 3.15 – (a) Modelo local deformado; (b) Representação da área interpolada.....	62
Figura 3.16 – Presença de sombra cobrindo uma parte da EI.....	62
Figura 3.17 – Ilustração do ângulo morto. (a) Abertura angular pequena da câmara com altitude de vôo alta; (b) Abertura angular pequena com altitude de vôo baixa.....	63
Figura 3.18 – Ilustração de ângulo morto relacionado com a altura das edificações. (a) Edificação alta; (b) Edificação baixa	64
Figura 3.19 – (a) Edificação localizada na imagem da esquerda; (b) Edificação localizada na imagem da direita	65
Figura 3.20 – Perfil 3D da edificação. (a) Perfil da imagem da foto da esquerda; (b) Perfil da imagem da foto da direita.....	65
Figura 3.21 – Situação ideal na geração dos pontos por correlação automática.....	66
Figura 3.22 – Situação anômala fornecida pelo sistema Socet Set	66
Figura 3.23 – (a) Vetores extraídos e borda do MNE; (b) Vetor que será analisado; (c) Comprimento da reta; (d) Sentido de varredura do algoritmo dentro do <i>buffer</i>	67
Figura 3.24 – (a) Edificação com duas retas paralelas e próximas a serem analisadas; (b) Análise da reta que define o topo da EI; (c) Análise da reta que não define o topo da EI; (d) Resultado obtido pelo processo de votação	68
Figura 3.25 – Fluxograma do processo de votação	69
Figura 4.1 – (a) Imagem original; (b) Vista isométrica do MNE gerado com a estratégia adaptativa do aplicativo; (c) MNE gerado com a estratégia adaptativa modificada (parâmetro para não realização de interpolação de pontos críticos); (d) Estratégia não-adaptativa <i>steep</i> . (e) Imagem do MNE gerado em tons de cinza com a estratégia adaptativa.....	71
Figura 4.2 – (a) Imagem Original; (b) vista isométrica do MNE gerado (método adaptativo); (c) Método adaptativo modificado; (d) Imagem do MNE em tons de cinza	73

Figura 4.3 – (a) Imagem Original; (b) vista isométrica do MNE gerado (método adaptativo); (c) Imagem do MNE em tons de cinza.....	74
Figura 4.4 – (a) Imagem Original; (b) vista isométrica do MNE gerado (método adaptativo); (c) Imagem do MNE em tons de cinza.....	75
Figura 4.5 – Experimentos realizados utilizando-se o método adaptativo para geração automática de MNE.....	76
Figura 4.6 – Imagens com sobreposição da cidade de Poços de Caldas e localização das edificações de interesse.....	78
Figura 4.7 – Recorte da imagem que contém a edificação de interesse.....	80
Figura 4.8 – (a) Posição da edificação numa fotografia 23x23 cm; (b) Edificações em ambas as imagens do estéreo-par	81
Figura 4.9 – (a) Bordas do MNE gerado; (b) Bordas sobrepostas à EI recortada.....	82
Figura 4.10 – (a) Vetores extraídos no processo de extração de feições; (b) Zoom das retas que compõem o topo da EI	82
Figura 4.11 – (a) Edificação de interesse; (b) Imagem recortada.....	83
Figura 4.12 – Posição da edificação numa fotografia 23x23 cm.....	83
Figura 4.13 – (a) Bordas do MNE gerado; (b) Bordas sobrepostas à EI recortada.....	84
Figura 4.14 – (a) Vetores extraídos; (b) Resultado da operação realizada (zoom das retas significativas extraídas)	84
Figura 4.15 – Edificação de interesse	85
Figura 4.16 – (a) Bordas do MNE gerado com P_L de 100%; (b) Bordas sobrepostas à EI.....	86
Figura 4.17 – (a) Pontos correlacionados e ZSC; (b) Perfil da EI mostrando zonas com e sem correspondência.....	86
Figura 4.18 – (a) Vetores extraídos; (b) Retas significativas; (c) Zoom das retas significativas extraídas	87
Figura 4.19 – Imagem original e edificação de interesse.....	87
Figura 4.20 – (a) Bordas do MNE gerado com limiar de 70%; (b) Bordas sobrepostas à EI.....	88
Figura 4.21 – (a) Retas extraídas; (b) Retas extraídas após o processo de eliminação de LI's; (c) Retas significativas editadas	89
Figura 4.22 – Edificação com estrutura complexa	89
Figura 4.23 – (a) Posição da edificação numa fotografia 23x23 cm; (b) Edificações em ambas as imagens do estéreo-par	90
Figura 4.24 – (a) Bordas do MNE gerado; (b) Bordas sobrepostas à EI.....	91
Figura 4.25 – (a) Retas extraídas do processo de extração de feições; (b) Retas significativas	91
Figura 4.26 – Recorte da EI	92
Figura 4.27 – Posição da edificação numa fotografia 23x23 cm (posição SO, ponto 2).....	93
Figura 4.28 – (a) Bordas do MNE gerado com limiar de 60%; (b) Bordas do MNE sobrepostas à EI.....	93

Figura 4.29 – (a) Retas extraídas; Zoom das retas significativas extraídas	94
Figura 4.30 – Imagem original e edificação de interesse.....	94
Figura 4.31 – Posição da edificação numa fotografia 23x23 cm (região SO, estrutura com exagero de escala)	95
Figura 4.32 – (a) Bordas do MNE gerado com limiar de 45%; (b) Bordas do MNE e EI.....	96
Figura 4.33 – (a) Retas obtidas pelo fluxo de etapas de extração; (b) Retas significativas.....	96
Figura 4.34 – Imagem original e recorte da edificação de interesse.....	97
Figura 4.35 – Bordas sobrepostas à edificação de interesse.....	97
Figura 4.36 – (a) Retas extraídas; (b) Resultado obtido.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados no projeto de Poços de Caldas.....	43
Tabela 3.2 – Percentual de extração de cada tipo de feição para um projeto cadastral.....	45
Tabela 4.1 - Dados representativos da diminuição do esforço operacional no caso proposto.....	99
Tabela 4.2 - Dados representativos da diminuição do esforço operacional em casos reais	99

RESUMO

A tarefa que demanda maior tempo dos operadores fotogramétricos, ainda não está automatizada, a extração de feições. A extração semi-automática de feições tem sido apontada como a ferramenta que possibilitaria um substancial aumento na produção durante a restituição, particularmente de áreas urbanas, pois as feições lineares são bastante encontradas em regiões modificadas pelo homem. Para as empresas de Fotogrametria, as edificações são feições que exigem maior demanda do processo de extração, representando até 50% do total de feições que devem ser extraídas numa restituição com propósitos cadastrais. Entretanto, por apresentarem variadas formas é muito complicada a implementação de ferramentas automáticas para a extração destas feições. Uma das seqüências possíveis para a extração é: suavização da imagem; detecção de bordas; limiarização automática; afinamento por supressão não máxima; conexão por varredura e rotulação; ajuste das retas; e fechamento de polígonos. O processo de extração de feições é uma tarefa complexa, pelo fato da existência dos variados tipos de estruturas e formas de edificações, oclusões, efeitos de sombras, deslocamento devido ao relevo, ruídos, baixo contraste, entre outros fatores. Para a solução do problema é necessário implementar uma ferramenta que necessite da mínima interação possível com o operador, tornando o processo semi-automático. A solução ideal seria a coleta de apenas um ponto semente (dado pelo operador), e a utilização de um fluxo de etapas para extração de edificações, em conjunto com as informações de alta frequência do MNE (Modelo Numérico de Elevações). O MNE seria usado como um canal adicional para eliminar as linhas consideradas insignificantes no processo, mantendo-se apenas as linhas de interesse, que definem o topo da edificação de interesse (EI). Os experimentos realizados apresentaram resultados satisfatórios, principalmente quando se tem EI isoladas, podendo-se afirmar que a metodologia proposta é válida, pois a interação com o operador é reduzida, mas ainda existe a necessidade de um considerável melhoramento no processo e principalmente na modelagem das elevações.

ABSTRACT

Feature extraction is the more time consuming photogrammetric task, and it is not fully automatic. Semi-automatic feature extraction has been considered as a tool that could increase the efficiency of photogrammetric restitution. Buildings are features that represent 50% of total of features that should be extracted in cadastral projects. There are several stages that can be performed for feature extraction. An example of such process is: smoothing; edge detection; thresholding; thinning; linking; adjustment of straight lines; and polygon closing. The process of feature extraction is a complex task, due to different types of structures and shapes of buildings, effect of shadows, relief displacement and others factors. The aim of this work is to implement a tool that reduces the effort of photogrammetric operators in feature extraction. An ideal solution should be collect just one seed point (by the operator), and to use an automatic pipeline of building extraction, using the DEM (Digital Elevation Model) as a additional level to remove lines in the process. The obtained results show that the number of selected points is reduced, mainly in isolated buildings, but there is a need to improved the process with better building modeling.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

De acordo com a ASPRS (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) 1979, a Fotogrametria é a Arte, Ciência e Tecnologia de obtenção de informações confiáveis sobre objetos físicos e o meio ambiente através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outros fenômenos.

Nos primórdios da Fotogrametria surgiram os primeiros restituidores analógicos. Esses instrumentos eram de alto custo, introduziam erros provocados pelas tarefas repetitivas dos operadores e pelos componentes óticos e mecânicos, e não possuíam nenhum dispositivo automático.

Com o advento dos computadores surgiu a Fotogrametria Digital, que é uma descrição genérica para uma nova forma de utilizar a Fotogrametria, baseada em imagens digitais (obtidas por meio de câmaras digitais ou digitalização). Com isto, foram desenvolvidos sistemas fotogramétricos digitais que, atualmente, são considerados a terceira geração dos instrumentos fotogramétricos, posterior aos instrumentos analíticos (2º geração) e analógicos (1º geração).

Com o surgimento dos sistemas fotogramétricos digitais, o tempo necessário para a realização das tarefas fotogramétricas diminuiu consideravelmente, devido à automação de alguns processos, tais como a geração de MDT (Modelo Digital do Terreno), orientações interior e relativa, e a produção de ortoimagens. A fase que demanda maior tempo dos operadores e que, portanto, é a de maior custo, ainda não está automatizada: a extração de feições.

A tecnologia fotogramétrica ainda não conseguiu suprir a inteligência humana nos processos de identificação de feições, pois este processo exige “inteligência” e interpretação, que somente o sistema visual do ser humano pode realizar, por enquanto. Por isso, o operador é ainda uma peça imprescindível para o funcionamento eficiente das ferramentas de extração de feições.

Pelo fato das edificações demandarem maior percentual de tempo de restituição (cerca de 55%) num projeto cadastral, é de extrema importância o estudo e a implementação de algoritmos para extração automática e semi-automática de Edificações de Interesse (EI). Isto ajudará na redução do custo e tempo de produção, abrindo um novo leque de possibilidades para pesquisas nesta linha, levando ao aumento de produtividade.

Para a solução do problema (diminuição do esforço operacional) é necessário implementar uma ferramenta que necessite da mínima interação possível com o operador, tornando o processo semi-automático. A solução ideal seria a coleta de apenas um ponto semente (dado pelo operador), e a utilização de um fluxo de etapas para extração de edificações, em conjunto com as informações de alta frequência do MNE (Modelo Numérico de Elevações). O MNE seria usado como um canal adicional para eliminar as linhas consideradas insignificantes (LI's) no processo, mantendo-se apenas as linhas de interesse, que definem o topo da EI.

1.2 Objetivos do Trabalho

As ferramentas para extração semi-automática de feições visam facilitar a tarefa dos operadores, bem como reduzir custos e diminuir o tempo de produção (restituição, orientação interior e relativa etc). Com a preocupação do esforço operacional despendido nas tarefas de restituição fotogramétrica (especificamente em projetos cadastrais) e a finalidade de contribuir com o conjunto de ferramentas existentes para extração semi-automática de feições, este trabalho tem como objetivo:

- ✓ Analisar o tipo de feição que depende maior tempo na restituição fotogramétrica em projetos cadastrais;
- ✓ Empregar uma metodologia para extrair semi-automaticamente feições de interesse utilizando a informação do MNE como um canal adicional para eliminar linhas consideradas insignificantes;
- ✓ Estudar as possíveis etapas existentes num processo de extração de feições (especificamente edificações);
- ✓ Elaborar um fluxo de etapas para extração semi-automática de edificações;
- ✓ Realizar experimentos; e
- ✓ Analisar os resultados obtidos com dados reais.

1.3 Estrutura do Trabalho

No capítulo 2 será apresentada a revisão da bibliografia realizada, incluindo uma das seqüências das etapas para extração de feições, identificação e detecção de cantos, geração de Modelos Numéricos de Elevação (aplicações, formas de coleta, organização e armazenamento dos dados) e a estrutura do sistema Socet Set, utilizado para gerar automaticamente o MNE. O capítulo 3 apresentará os materiais utilizados, a metodologia empregada na criação de projetos no sistema digital, a metodologia utilizada para gerar o MNE automaticamente no aplicativo Socet Set, para converter o MNE gerado numa imagem em tons de cinza (utilizado como um canal adicional), para eliminação de LI's, por um processo de votação. O capítulo 4 apresentará os resultados e análises dos experimentos realizados e o capítulo 5 as conclusões e recomendações do trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

2.1 Extração de Feições

2.1.1 Considerações Iniciais

A análise de imagens é uma tarefa muito difícil de ser implementada e o que há de fato disponível, até o momento, é um conjunto de técnicas de processamento de imagens, que podem ser utilizadas para obter informações sobre os objetos presentes na cena.

Devido a impossibilidade de uma análise confiável das imagens obtidas, dada por vários fatores tais como: luminosidade, presença de ruídos etc. Uma série de aplicações que atualmente precisam ser executadas pelo ser humano, ainda se apresentam sem solução automatizada. Abaixo serão relacionadas algumas das diversas aplicações que utilizam processamento de imagens:

- ✓ Cartografia: identificação, interpretação de objetos presentes nas imagens, lançamento de pontos sementes entre outras operações ainda são realizadas pelo operador humano;
- ✓ Medicina: técnicas de tomografia computadorizada, ressonância magnética e radiografia baseada em Raio-X, dependem de processos automáticos, para o auxílio do diagnóstico em imagens de órgãos do corpo humano;
- ✓ Visão Computacional: consiste na automação de tarefas realizadas pelos seres humanos. Para isso, todas as funções realizadas pelo cérebro humano devem ser automatizadas;
- ✓ Fotogrametria: tarefas como orientação interior e exterior, restituição, geração de MDTs entre outras, ainda não se encontram totalmente automatizadas.

Numa restituição fotogramétrica a extração de feições é a etapa da produção que exige maior esforço por parte do operador. Por isso, existe uma grande preocupação dos fotogrametristas em relação à produtividade e, atualmente, com a eficiência das ferramentas implementadas para esta tarefa.

As edificações exigem maior demanda do processo de extração para as empresas de Fotogrametria, representando cerca de 55% do total de feições que devem ser extraídas numa restituição com propósitos cadastrais (ver capítulo 3, item 3.3).

As formas das edificações são bastante diversificadas, isto é, não se tem uma forma padronizada, existindo edificações com cumes planos (*plane roof*), com duas ou mais águas (*gable roof*) entre outros tipos, dificultando a definição de um fluxo computacional para a implementação de ferramentas de extração automática de feições. Por isso, ainda é utilizado o operador humano para o reconhecimento de formas e fornecimento de pontos sementes (fornecem diretrizes para os algoritmos) tornando o processo semi-automático.

Num processo de extração semi-automática de feições, existem variadas seqüências, estratégias e combinações de etapas. A seqüência proposta neste trabalho, incluindo uma estratégia para eliminação de LI's, pode ser resumida na figura 2.1.

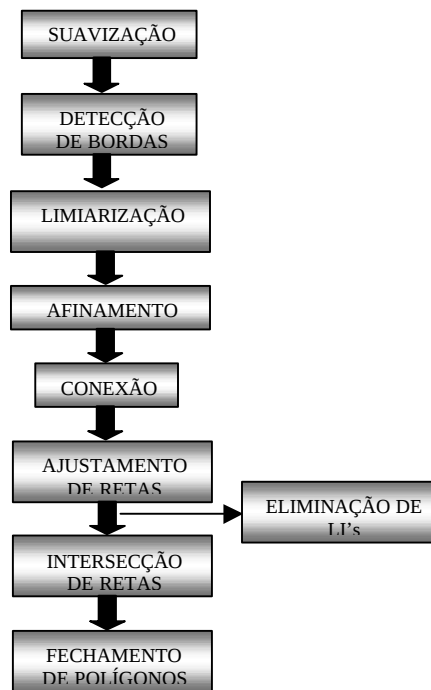


Figura 2.1- Uma das seqüências utilizadas para extração de feições.

2.1.2 Etapa de Suavização

A etapa de suavização compreende um pré-processamento na imagem, de modo que o resultado obtido forneça uma imagem mais apropriada para uma aplicação específica. A suavização é considerada mais eficiente quando aplicado um filtro que atenua ou elimine ruídos e preserve as bordas presentes na imagem.

A suavização é aplicada na imagem através de filtros que são definidos, normalmente, por uma máscara que se desloca sobre a imagem (figura 2.2).

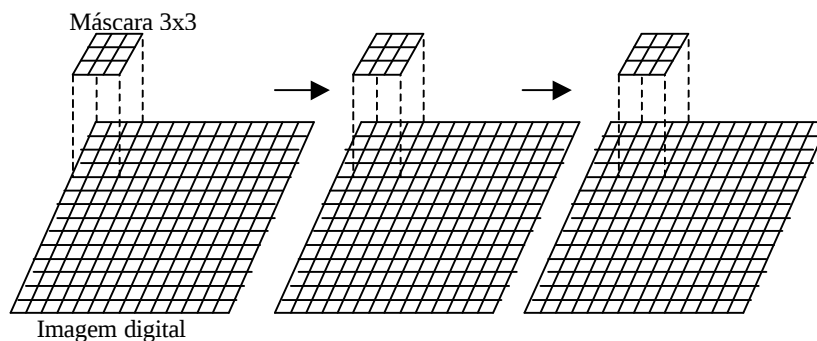


Figura 2.2 - Processo de convolução de máscaras.

Existem vários tipos de filtros de suavização, com diferentes características e que podem ser utilizados para diferentes aplicações. No caso de extração de feições, a borda é uma das informações mais importantes e um filtro que atenua demasiadamente as informações de borda (filtro média, por exemplo) não é de interesse. Neste trabalho serão apresentados apenas o filtro da mediana e o filtro mediana com preservação de bordas e cantos.

2.1.2.1 Filtro Mediana

A filtragem pela mediana, por ser um filtro não-linear, cuja função básica consiste em computar o valor médio dos níveis de cinza na vizinhança em que o filtro está posicionado (Gonzalez e Woods, 2000), não pode ser realizado tipicamente por meio de um processo de convolução de máscaras (figura 2.2), como mostra a figura 2.3.

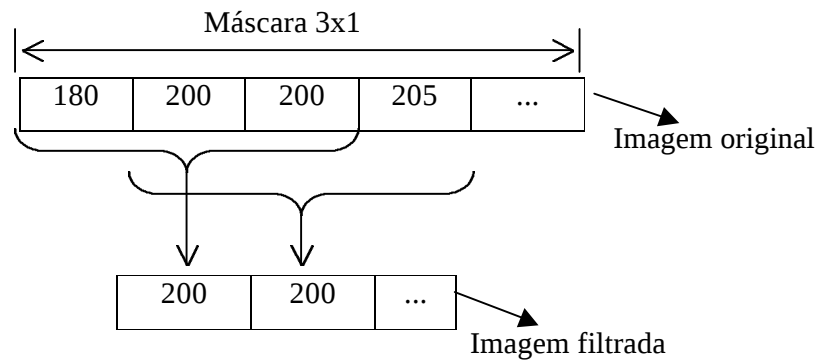


Figura 2.3- Aplicação do filtro mediana $_{3 \times 1}$ (Adaptado de Artero, 1999).

O filtro da mediana apresenta bons resultados na suavização, eliminando os componentes de alta frequência (ruídos e excesso de detalhes que não são de interesse para a detecção de bordas) e preservando as bordas.

2.1.2.2 Filtro Mediana com Preservação de Bordas e Cantos

De acordo com Artero (1999) *appud* Newton¹ (1993), neste filtro o valor a ser atribuído ao pixel será dado pela mediana da vizinhança que apresentar a menor variância. Para isto, é pesquisada a região de menor variância, sendo considerados 3 modelos: o 1º modelo possui 4 regiões (Nordeste, Sudeste, Sudoeste e Noroeste) com sete pixels cada (figura 2.4a); o 2º modelo também com 4 regiões (Norte, Sul, Leste e Oeste) e 7 pixels cada (figura 2.4b); e o 3º modelo possui apenas 1 região central (9 pixels), como mostra a figura 2.4c.

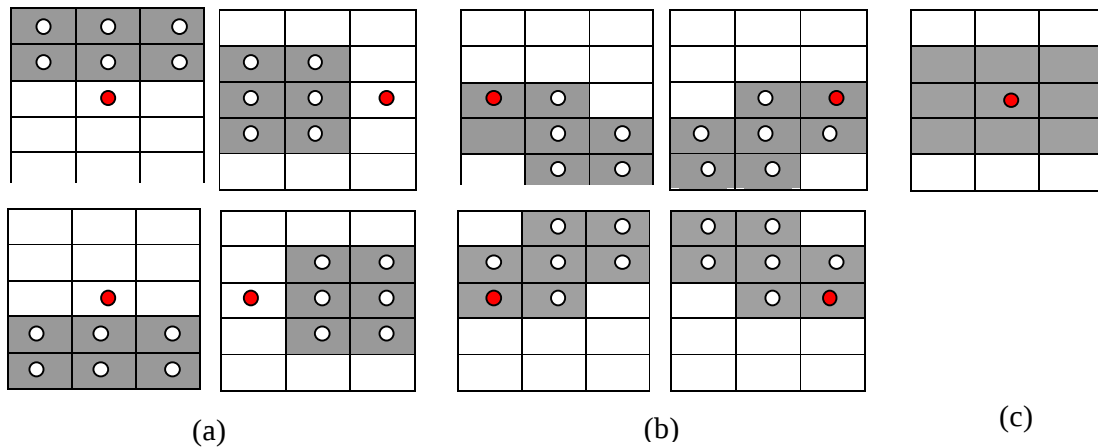


Figura 2.4- Filtros direcionados de suavização com preservação de bordas e cantos. (a) 1º modelo (N, S, L, O); (b) 2º modelo (NO, ND, SD, SO); (c) Central (Adaptado de Artero, 1999).

¹ NEWTON, W. An Approach to the Identification of Forest in Thematic Mapper Imagery Within the Context of Change Detection System. M. Sc. Tesis. University College London, 1993.

A figura 2.5 mostra a diferença de resultados entre o filtro da mediana e o filtro de suavização com preservação de bordas e cantos.

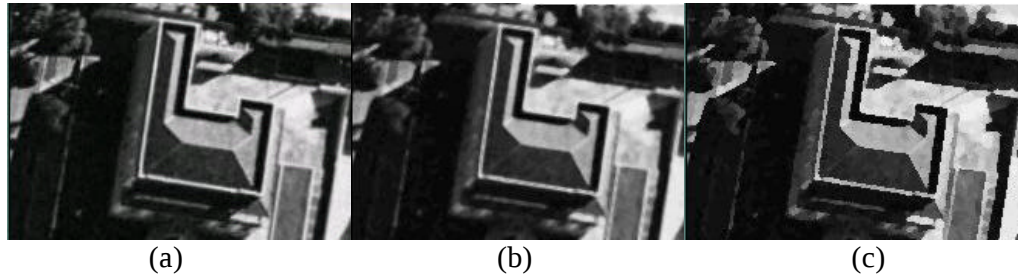


Figura 2.5 - (a) Imagem original; (b) Aplicação do filtro mediana; (c) Aplicação do filtro de suavização com preservação de bordas.

Percebe-se na figura 2.5(c), que as bordas estão serrilhadas podendo provocar quebras no alinhamento contínuo das bordas dificultando e aumentando o custo computacional do processo de conexão e rotulação, enquanto que na figura 2.5(b), verifica-se que o filtro da mediana elimina os ruídos presentes na imagem, preservando muito bem as bordas.

2.1.3 Etapa de Detecção de Bordas

A borda, sendo definida como uma descontinuidade abrupta dos valores de brilho numa imagem em tons de cinza, que define o contorno dos objetos presentes na imagem, é o elemento de maior interesse no processo de extração de feições. A figura 2.6 mostra uma borda dada numa imagem em tons de cinza e os gráficos da primeira e segunda derivada associada a esta borda.

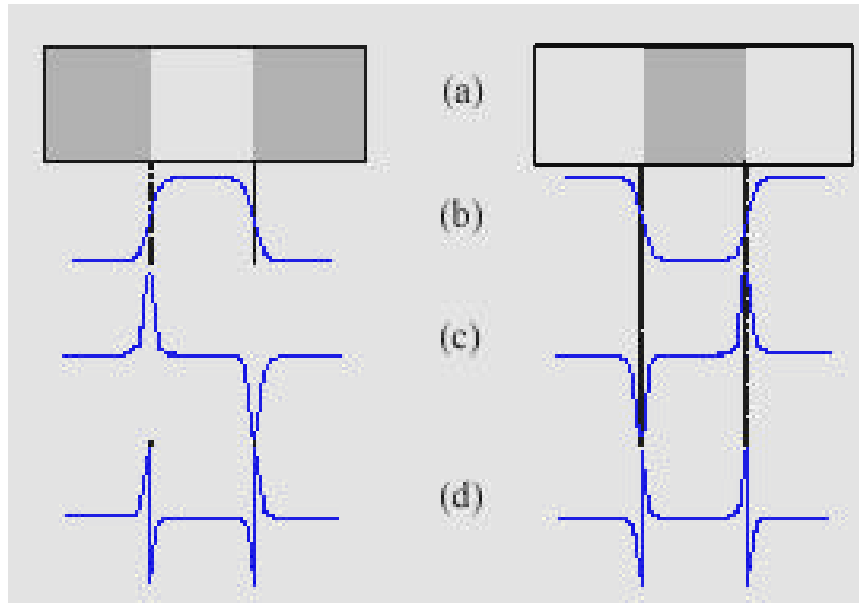


Figura 2.6- (a) Imagem com descontinuidade, (b) Sinal da descontinuidade, (c) Primeira derivada do sinal e (d) Segunda derivada do sinal (Fonte: Gonzalez e Woods, 2000).

A segunda derivada apresentada na figura 2.6d, é também conhecida como laplaciano e neste caso apresenta uma passagem por zero (*zero-crossing*) exatamente na localização da descontinuidade. O operador laplaciano é pouco utilizado na prática por ser sensível a ruídos e também por produzir duplas bordas, sendo incapaz de detectar a direção das bordas (Gonzalez e Woods, 2000).

Os detectores de borda formam um conjunto de métodos de pré-processamento utilizados para detectar mudanças abruptas na intensidade dos brilhos. Uma mudança da intensidade do brilho pode ser descrita por um gradiente nas direções x e y (G_x e G_y), sendo esses gradientes definidos da seguinte forma:

$$\begin{aligned} G_x &= \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \\ G_y &= \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Desta forma, através da equação (2.2) e (2.3), pode-se obter duas propriedades de borda, isto é, direção e magnitude (resultante de G_x e G_y) (Sonka *et al*, 1998).

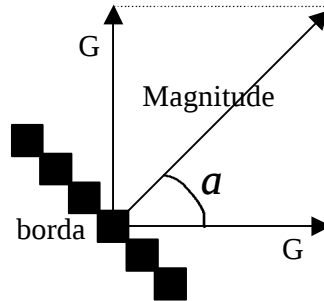


Figura 2.7- Determinação do gradiente de magnitude e direção.

$$magnitudo_{G_x G_y} = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (2.2)$$

$$a = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (2.3)$$

A detecção de bordas representa um passo extremamente importante na análise de imagens (Sonka *et al*, 1998).

2.1.3.1 Detectores de Bordas

Uma das principais técnicas utilizadas para a detecção de bordas no domínio espacial é através de operadores diferenciais. Abaixo serão apresentados os principais operadores detectores de borda que são obtidos a partir de aproximações de derivadas parciais, tais como operador de Prewitt, Sobel e Nevatia e Babu.

2.1.3.2 Operadores de Prewitt e Sobel

Dois dos operadores muito utilizados são os operadores de Prewitt e operador de Sobel (Gonzalez e Woods, 2000). O operador de Prewitt utiliza duas máscaras de convolução conforme apresentado na figura 2.8.

	Gx				Gy		
	-1	0	1		-1	-1	-1
1/3	-1	0	1	1/3	0	0	0
	-1	0	1		1	1	1

Figura 2.8 – Máscaras utilizadas no operador de Prewitt.

O operador de Sobel considera que os pixels mais próximos do centro da máscara possuem maior influência no gradiente, definindo assim máscaras com maior influência na região central (figura 2.9).

	Gx				Gy		
	-1	0	1		-1	-2	-1
1/4	-2	0	2	1/4	0	0	0
	-1	0	1		1	2	1

Figura 2.9 - Máscaras utilizadas no operador de Sobel.

Da aplicação dos operadores em G_x e G_y resultam os gradientes das bordas para as duas respectivas direções em x e y. Com G_x e G_y é possível calcular a magnitude da borda e o ângulo de direção utilizando as respectivas equações (2.2) e (2.3), como descrito anteriormente.

2.1.3.3 Operador Nevatia e Babu

O conjunto de máscaras utilizadas por Nevatia e Babu é construído de tal forma a apresentar maior resposta para linhas com diversos ângulos de inclinação. O operador de Nevatia e Babu utiliza 12 máscaras para a detecção de linhas com inclinações variando de 30° em 30° (0° a 330°) (Artero, 1999).

Neste operador é realizado um processo de convolução (figura 2.2), sendo calculada uma magnitude através de cada máscara e, para cada pixel a magnitude é dada pela maior resposta calculada e a direção é dada pelo ângulo associado à máscara de maior resposta.

$\frac{1}{1000}$	<table><tr><td>100</td><td>100</td><td>0</td><td>-100</td><td>-100</td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>0</td><td>-100</td><td>-100</td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>0</td><td>-100</td><td>-100</td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>0</td><td>-100</td><td>-100</td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>0</td><td>-100</td><td>-100</td></tr></table>	100	100	0	-100	-100	100	100	0	-100	-100	100	100	0	-100	-100	100	100	0	-100	-100	100	100	0	-100	-100	$\frac{1}{1000}$	<table><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>0</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>0</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>0</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>0</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>0</td><td>100</td><td>100</td></tr></table>	-100	-100	0	100	100	-100	-100	0	100	100	-100	-100	0	100	100	-100	-100	0	100	100	-100	-100	0	100	100
100	100	0	-100	-100																																																	
100	100	0	-100	-100																																																	
100	100	0	-100	-100																																																	
100	100	0	-100	-100																																																	
100	100	0	-100	-100																																																	
-100	-100	0	100	100																																																	
-100	-100	0	100	100																																																	
-100	-100	0	100	100																																																	
-100	-100	0	100	100																																																	
-100	-100	0	100	100																																																	
	0°		180°																																																		
$\frac{1}{1102}$	<table><tr><td>100</td><td>-32</td><td>100</td><td>-100</td><td>-100</td></tr><tr><td>100</td><td>78</td><td>-92</td><td>-100</td><td>-100</td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>0</td><td>-100</td><td>-100</td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>92</td><td>-78</td><td>-100</td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>32</td><td>-100</td></tr></table>	100	-32	100	-100	-100	100	78	-92	-100	-100	100	100	0	-100	-100	100	100	92	-78	-100	100	100	100	32	-100	$\frac{1}{1102}$	<table><tr><td>-100</td><td>32</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>-100</td><td>-78</td><td>92</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>0</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>-92</td><td>78</td><td>100</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-320</td><td>100</td></tr></table>	-100	32	100	100	100	-100	-78	92	100	100	-100	-100	0	100	100	-100	-100	-92	78	100	-100	-100	-100	-320	100
100	-32	100	-100	-100																																																	
100	78	-92	-100	-100																																																	
100	100	0	-100	-100																																																	
100	100	92	-78	-100																																																	
100	100	100	32	-100																																																	
-100	32	100	100	100																																																	
-100	-78	92	100	100																																																	
-100	-100	0	100	100																																																	
-100	-100	-92	78	100																																																	
-100	-100	-100	-320	100																																																	
	30°		210°																																																		
$\frac{1}{1070}$	<table><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td></tr><tr><td>32</td><td>-78</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>0</td><td>-92</td><td>-100</td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>78</td><td>32</td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr></table>	-100	-100	-100	-100	-100	32	-78	-100	-100	-100	100	100	0	-92	-100	100	100	100	78	32	100	100	100	100	100	$\frac{1}{1142}$	<table><tr><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>-32</td><td>78</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>0</td><td>92</td><td>100</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-78</td><td>-32</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td></tr></table>	100	100	100	100	100	-32	78	100	100	100	-100	-100	0	92	100	-100	-100	-100	-78	-32	-100	-100	-100	-100	-100
-100	-100	-100	-100	-100																																																	
32	-78	-100	-100	-100																																																	
100	100	0	-92	-100																																																	
100	100	100	78	32																																																	
100	100	100	100	100																																																	
100	100	100	100	100																																																	
-32	78	100	100	100																																																	
-100	-100	0	92	100																																																	
-100	-100	-100	-78	-32																																																	
-100	-100	-100	-100	-100																																																	
	60°		240°																																																		
$\frac{1}{1000}$	<table><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr></table>	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	$\frac{1}{1000}$	<table><tr><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td></tr></table>	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100
-100	-100	-100	-100	-100																																																	
-100	-100	-100	-100	-100																																																	
0	0	0	0	0																																																	
100	100	100	100	100																																																	
100	100	100	100	100																																																	
100	100	100	100	100																																																	
100	100	100	100	100																																																	
0	0	0	0	0																																																	
-100	-100	-100	-100	-100																																																	
-100	-100	-100	-100	-100																																																	
	90°		270°																																																		
$\frac{1}{1102}$	<table><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-78</td><td>32</td></tr><tr><td>-100</td><td>-92</td><td>0</td><td>92</td><td>100</td></tr><tr><td>-32</td><td>78</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr></table>	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-78	32	-100	-92	0	92	100	-32	78	100	100	100	100	100	100	100	100	$\frac{1}{1102}$	<table><tr><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>78</td><td>-32</td></tr><tr><td>100</td><td>92</td><td>0</td><td>-92</td><td>-100</td></tr><tr><td>32</td><td>-78</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td></tr></table>	100	100	100	100	100	100	100	100	78	-32	100	92	0	-92	-100	32	-78	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100
-100	-100	-100	-100	-100																																																	
-100	-100	-100	-78	32																																																	
-100	-92	0	92	100																																																	
-32	78	100	100	100																																																	
100	100	100	100	100																																																	
100	100	100	100	100																																																	
100	100	100	78	-32																																																	
100	92	0	-92	-100																																																	
32	-78	-100	-100	-100																																																	
-100	-100	-100	-100	-100																																																	
	120°		300°																																																		
$\frac{1}{1102}$	<table><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-32</td><td>-100</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>-92</td><td>78</td><td>-100</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>0</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>-78</td><td>92</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>32</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr></table>	-100	-100	-100	-32	-100	-100	-100	-92	78	-100	-100	-100	0	100	100	100	-78	92	100	100	100	32	100	100	100	$\frac{1}{1102}$	<table><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>-100</td><td>-32</td><td>-100</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>-92</td><td>78</td><td>-100</td></tr><tr><td>-100</td><td>-100</td><td>0</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>-78</td><td>92</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>32</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr></table>	-100	-100	-100	-32	-100	-100	-100	-92	78	-100	-100	-100	0	100	100	100	-78	92	100	100	100	32	100	100	100
-100	-100	-100	-32	-100																																																	
-100	-100	-92	78	-100																																																	
-100	-100	0	100	100																																																	
100	-78	92	100	100																																																	
100	32	100	100	100																																																	
-100	-100	-100	-32	-100																																																	
-100	-100	-92	78	-100																																																	
-100	-100	0	100	100																																																	
100	-78	92	100	100																																																	
100	32	100	100	100																																																	
	150°		330°																																																		

Figura 2.10 - Máscaras do operador Nevatia e Babu (Fonte: Artero, 1999).

O operador de Nevatia e Babu, por utilizar máscaras maiores que os operadores citados acima, é considerado um operador menos sensível a ruídos presentes nas imagens (fornecendo respostas mais baixas nestes casos), enquanto que o operador Sobel, por exemplo, por utilizar uma máscara menor é mais suscetível à detecção de ruídos (Pratt, 1978). A figura 2.11 mostra a razão da utilização desse operador.

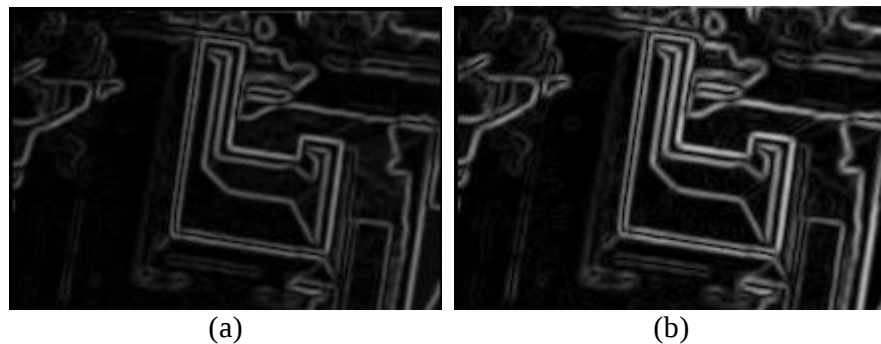


Figura 2.11 - (a) Operador Sobel; (b) Operador Nevatia e Babu.

Verifica-se na figura 2.11b, que bordas não detectadas com o operador Sobel (figura 2.11a) são detectadas utilizando-se o operador Nevatia e Babu, mostrando sua maior eficiência.

2.1.4 Etapa de Limiarização Automática

Após a detecção de bordas numa imagem digital, a etapa de limiarização é utilizada para eliminar pixels redundantes que compõem a borda detectada. Uma maneira de se realizar esta tarefa é definir um limiar T de acordo com as características da imagem e classificar os pixels, com valores de brilho inferior a este limiar, à uma dada classe (por exemplo, fundo) e os pixels com valores de brilho igual ou superior à T , como outra classe (objeto, neste caso).

Quando se trabalha com imagens aéreas o problema é bem mais complexo, devido principalmente, ao fato de que nem sempre os objetos são bem definidos. Outro problema é que uma imagem aérea apresenta um histograma multi-modal (figura 2.12b), diferente das imagens binárias que apresentam histogramas bi-modais (figura 2.12d), tornando o processo automático mais complicado.

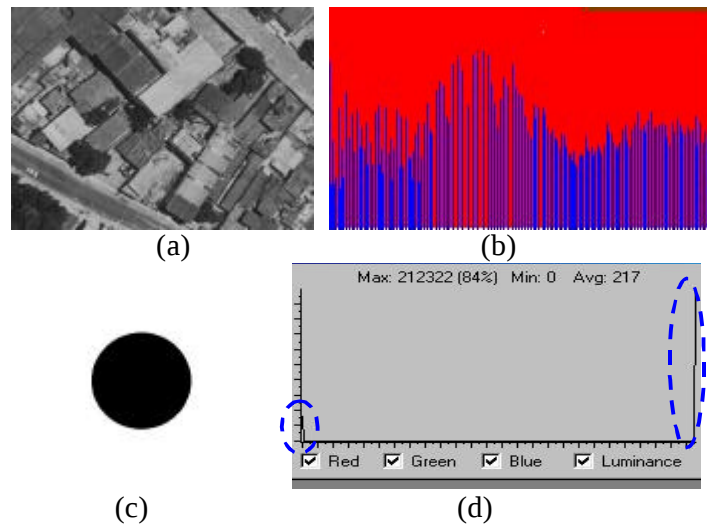


Figura 2.12- (a) Imagem aérea; (b) Histograma da imagem aérea (c) Imagem binária; (d) Histograma da imagem binária.

Existem vários métodos para obtenção de limiares, sendo tratado neste trabalho alguns dos métodos mais utilizados para casos de imagens em tons de cinza.

2.1.4.1 Técnicas de Obtenção de um Limiar

Para Sonka *et al* (1998), se alguma propriedade da imagem é conhecida (por exemplo, a área) a tarefa da seleção do limiar T é simplificada. Assim, sabendo-se a porcentagem da área que o objeto ocupa na imagem, o limiar é definido pelo valor que resulta num percentual da imagem, acima deste valor. Este método é chamado P-Tile e não será abordado neste trabalho, por ser adequado

apenas em situações restritas, ou seja, é eficiente apenas em imagens definidas por histogramas bi-modais.

Uma técnica bastante distinta é o método do triângulo, que sugere o traçado de uma linha entre os valores máximo e mínimo do histograma da imagem de bordas e utiliza como limiar o valor de brilho que apresenta o maior valor da distância entre a reta e os valores de frequência não nulos (Artero, 1999).

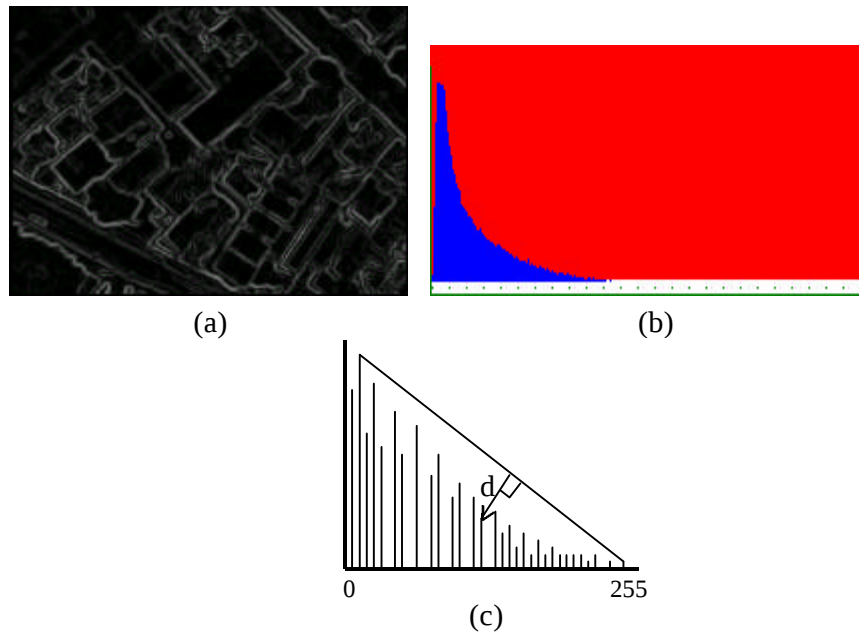


Figura 2.13 – (a) Imagem original; (b) histograma da imagem; (c) Critério utilizado para a determinação do valor de limiar pelo Método do Triângulo (valores de borda alto e fundo baixo).

Outra técnica bastante utilizada, baseada na análise discriminante, é o método de OTSU. O valor do limiar é obtido supondo que os pixels da imagem podem ser classificados em duas classes (C_0 e C_1), isto é, objeto e fundo.

Para a determinação do limiar ótimo, um dos critérios utilizados considera s_B^2 e s_T^2 como as variâncias do fundo e total entre as classes C_0 e C_1 (Sahoo *et al*, 1988). Desta forma, temos:

$$m_T = \sum_{i=0}^{l-1} ipi \quad (2.4)$$

$$m_t = \sum_{i=0}^t ipi \quad (2.5)$$

Sendo,

μ_T : desvio padrão total da ocorrência dos níveis de cinza na imagem;

μ_t : desvio padrão da ocorrência dos níveis de cinza na imagem até o valor de limiar;

i : níveis de cinza presentes na imagem; e

pi : probabilidade com que ocorrem estes níveis de cinza na imagem.

$$v_0 = \sum_{i=0}^t pi \quad (2.6)$$

$$v_1 = 1 - v_0 \quad (2.7)$$

$$m_1 = \frac{m_T - m_t}{v_1} \quad (2.8)$$

$$m_0 = \frac{m_T}{v_0} \quad (2.9)$$

$$s_T^2 = \sum_{i=0}^{l-1} (i - m_T)^2 pi \quad (2.10)$$

$$s_B^2 = v_0 v_1 (m_1 m_0)^2$$

$$h = \frac{s_B^2}{s_T^2} \quad (2.11)$$

Sendo,

η : relação entre as variâncias dos pixels do fundo e total da imagem.

O limiar ótimo é dado pela minimização da função η , ou seja,
 $t^* = ArgMinh$ (Sahho *et al*, 1988).

Outro método interessante (utiliza a teoria da informação), que se baseia na premissa de que a geração de informação pode ser modelada como um processo probabilístico (Sahoo, 1998) é o método PUN. Por esta teoria define-se a entropia (quantidade de código necessária para representar um símbolo) de cada pixel da imagem por:

$$Entropia(x) = x \log(x) \quad (2.12)$$

Pelo método, para cada possível valor de limiar são definidas 2 entropias à posteriori (do objeto e do fundo da imagem), dadas por:

$$w_0 = \sum_{i=0}^t p_i \quad (2.13)$$

$$w_1 = 1 - w_0 \quad (2.14)$$

O valor do limiar ótimo é dado por:

$$T = ArgMax\{H_b(t) + H_w(t)\} \quad (2.15)$$

A figura 2.14 apresenta resultados obtidos com a aplicação dos métodos de limiarização OTSU e PUN.

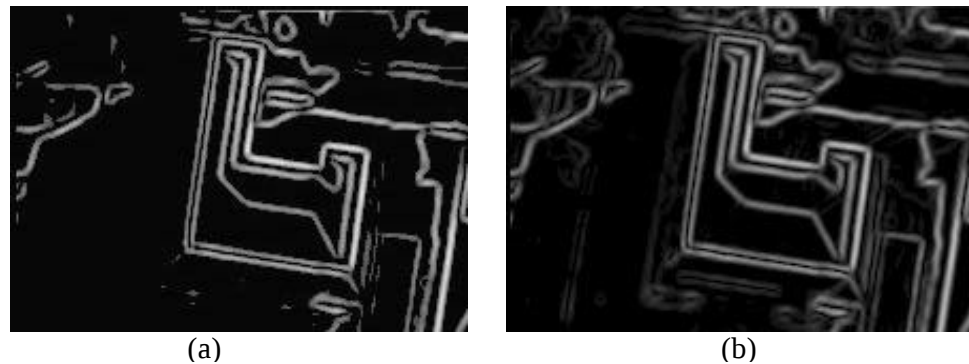


Figura 2.14 – (a) Método de limiarização OTSU; (b) Método de limiarização PUN.

Percebe-se na figura 2.14a, que o método de limiarização OTSU elimina as bordas que, neste trabalho especificamente, também são consideradas insignificantes (quinas da fachada lateral da edificação). Enquanto que com o método PUN os pixels que compõem algumas linhas consideradas insignificantes (linhas que definem a faixa lateral da EI, muros etc) não são eliminados (figura 2.14b).

2.1.5 Etapa de Afinamento de Bordas

Após o processo de detecção de bordas e limiarização, um conjunto de pixels é obtido formando uma borda espessa, com alguns pixels de largura (figura 2.15b). Desta maneira, é necessário realizar um processo de afinamento da borda, para que a mesma seja representada com largura de 1 pixel (figura 2.15a) (Pratt, 1978).

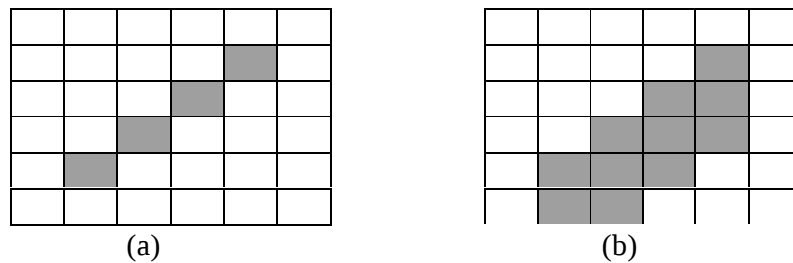


Figura 2.15 - (a) Situação ideal dos pixels representando um segmento; (b) Situação real da borda com alguns pixels de largura.

2.1.5.1 Método de Supressão Não-Máxima

Na detecção de bordas utilizando os mais variados operadores de interesse, os ângulos das bordas obtidos têm distribuições diferentes das pré-definidas pelo operador de supressão não-máxima. Por isso, antes da execução do operador de supressão não-máxima é necessário quantizar os ângulos das bordas nas direções pré-definidas pelo operador de supressão.

Neste método a eliminação dos pixels é feita perpendicularmente à direção da borda, sendo utilizadas as direções apresentadas na figuras 2.16, a fim de simplificar o processo de busca na vizinhança (Tommaselli, 1999), preservando os pixels na direção de maior variação do gradiente.

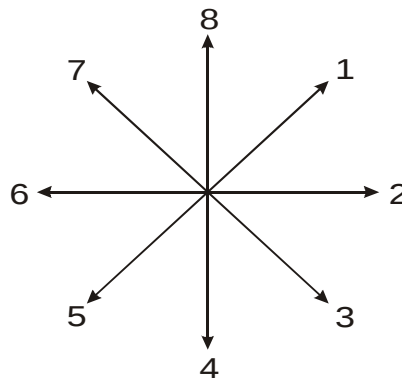


Figura 2.16- Exemplo de direções consideradas no método de afinamento por supressão não-máxima.

A comparação é feita de acordo com as direções dos pixels; por exemplo, pixel com direção de 90^0 ou 270^0 é comparado com seus vizinhos horizontais (à direita e à esquerda); já um pixel com direção de 0^0 ou 180^0 é comparado com seus vizinhos verticais (acima e abaixo). Desta forma, é verificado se os pixels vizinhos possuem a mesma magnitude do pixel pesquisado, caso não tenham são eliminados do processo. No caso de bordas inclinadas os pixels devem ser comparados com seus vizinhos na diagonal. Neste caso, como os pixels a serem comparados precisam estar a uma distância unitária e por se trabalhar com uma malha regular (não existindo pixels nestes locais) é necessária a realização de uma interpolação bilinear (figura 2.17).

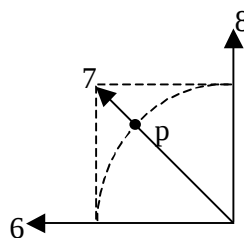


Figura 2.17 – Detalhe gráfico da necessidade de interpolação na comparação de vizinhos na diagonal (p é a magnitude interpolada procurada).

Como descrito anteriormente, o que se tem, após as etapas de detecção de bordas e limiarização, é a presença de vários pixels de largura em cada borda, sendo necessário realizar um afinamento destes pixels para facilitar o processo de varredura e rotulação. A figura 2.18 mostra o resultado obtido após a etapa de afinamento por supressão não-máxima.



Figura 2.18 - Supressão não-máxima aplicada na imagem.

2.1.6 Etapa de Conexão

A etapa de conexão é necessária para a realização do agrupamento dos pixels pertencentes à mesma borda, formando segmentos de retas. Para este processo ser realizado é necessário que se disponha da magnitude e direção da borda em cada pixel. Existem vários métodos que realizam o agrupamento dos pixels, como por exemplo a Transformada de *Hough*, que permite a detecção de linhas em imagens digitais (Pratt, 1978). Neste trabalho será apresentado apenas o método de “varredura e rotulação” proposto por (Zhou *et al*, 1989), (Venkateswar, 1994) e adaptado por (Tommaselli, 1999) e Artero (1999).

2.1.6.1 Método de Varredura e Rotulação (*Scan & Label*)

Neste método, existem algumas convenções utilizadas que classificam os pixels envolvidos no processo de varredura e rotulação (figura 2.19).

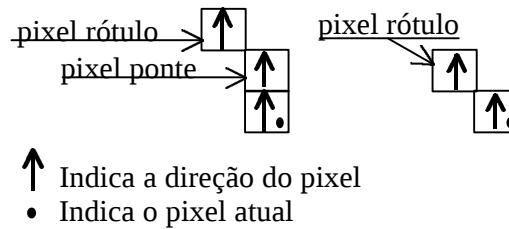


Figura 2.19- Classificação dos pixels envolvidos no processo de conexão
 (adaptado de Tommaselli, 1999).

Segundo Artero (1999), é realizada uma varredura na imagem da esquerda para a direita, de cima para baixo e para cada pixel, considerando sua direção, são verificados seus vizinhos. Ao mesmo tempo, uma estrutura de dados é utilizada para guardar as características das retas que estão sendo definidas (pixel inicial (x_i , y_i), pixel final (x_f , y_f), direção (dir) e número de pixels).

Encontrado o primeiro pixel atribui-se ao mesmo um rótulo de valor 1, sendo chamado agora de pixel rótulo. O pixel atual é aquele que está sendo pesquisado para que seja obtido um rótulo. Caso seja encontrado algum vizinho compatível e já rotulado do pixel atual, o último recebe o mesmo rótulo do primeiro. O pixel que se localiza a uma distância de no máximo 2 pixels e possui a mesma direção que o pixel atual é chamado de pixel vizinho (figura 2.20a). Quando este pixel estiver fazendo ligação entre o pixel rótulo e o atual, e não possuir rótulo, é chamado pixel ponte (figura 2.20b), sendo tratado então como um pixel sem magnitude e direção, representando um buraco na linha que está sendo traçada. Uma forma de evitar esse problema é incluir o pixel (sem magnitude e direção) na linha analisada e fornecer ao pixel ponte o mesmo rótulo e a mesma direção do pixel atual, bem como uma magnitude média (figura 2.20c) (média das magnitudes dos pixels atual e vizinho).

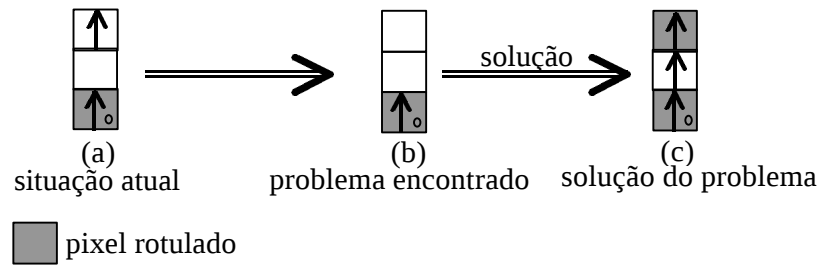


Figura 2.20 - Solução para solucionar o problema de pixels sem direção e magnitude (Adaptado de Artero, 1999).

A figura 2.21 mostra os modelos (*templates*) das vizinhanças com as respectivas direções de seus gradientes a serem verificados no processo de conexão.

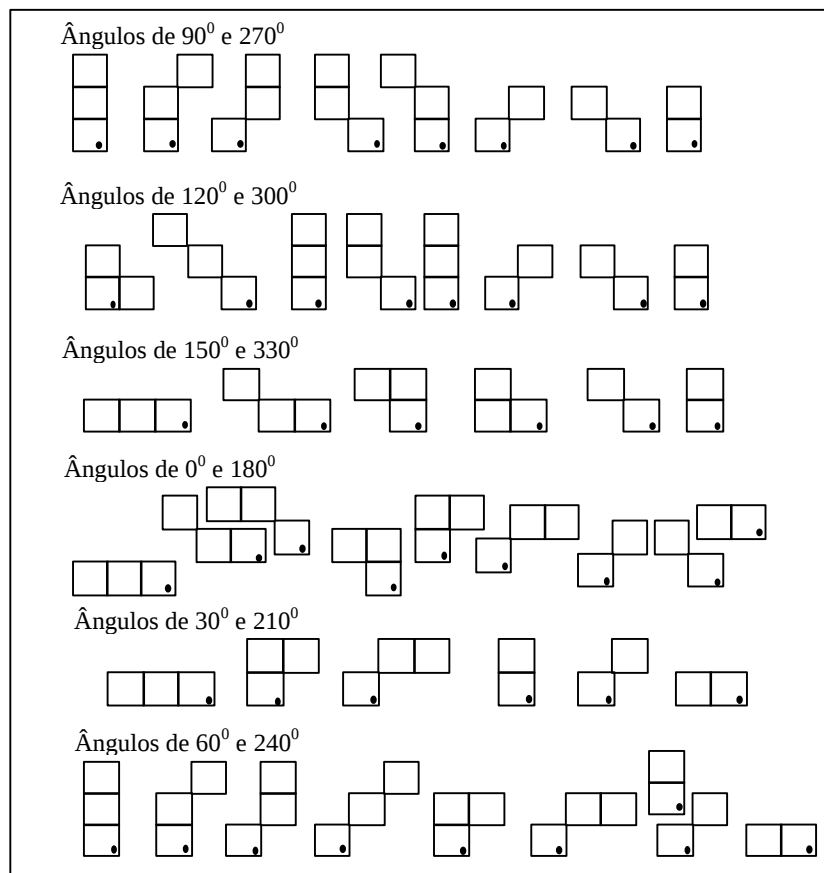


Figura 2.21 - Vizinhanças no processo de conexão (Fonte: Tommaselli, 1999).

Pelo fato deste método não ser suficientemente robusto, fornece alguns resultados indesejáveis. Por isto, foram desenvolvidas algumas formas de solucionar esses problemas, que podem ser verificadas no apêndice A (seção A1).

2.1.7 Etapa do Ajustamento

A próxima etapa realizada após a identificação dos pixels que pertencem a um dado segmento é um processo de ajustamento para que seja encontrada uma reta que melhor represente os pontos dos pixels rotulados.

No apêndice A (seção A1.2) será apresentado o método paramétrico modificado, que é utilizado neste trabalho, para o ajustamento das retas encontradas.

No caso de não se obter uma minimização suficiente (figura 2.22a), utiliza-se um critério de quebra da reta em outras menores (figura 2.22b), até que sejam obtidas retas adequadas aos pixels detectados, atendendo a um fator de qualidade previamente estabelecido.

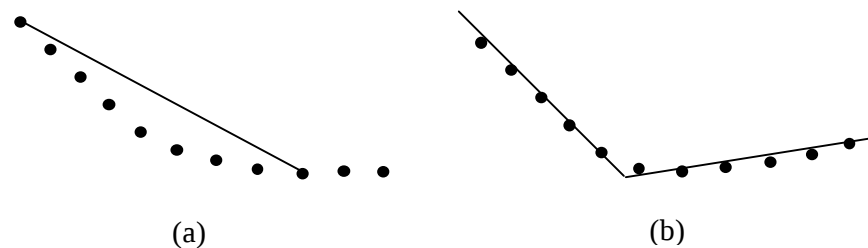


Figura 2.22 – (a) Caso em que não se consegue obter uma minimização suficiente;
(b) Quebra das retas em retas menores.

2.2 Etapa de Detecção de Cantos

Pelo fato dos operadores de detecção de bordas fornecerem uma baixa resposta nas regiões dos cantos das feições, é necessário realizar uma etapa final do processo de extração de feições, isto é, a identificação e detecção de cantos.

Existem vários métodos para esta tarefa e neste trabalho será abordado apenas o método proposto por Moravec (1989) e adaptado por Galo e Tozzi (2000).

2.2.1 Operador Moravec

De acordo com Galo e Tozzi (2000), o operador Moravec é muito utilizado devido à velocidade no tempo de processamento e também por fornecer apenas as posições aproximadas dos cantos, mas que, seguido de uma aplicação de um operador que utiliza elementos do operador FÖRSTNER (não sensível a ruídos), permite a obtenção de resultados a nível de sub-pixel.

Este método é baseado na determinação do quadrado das diferenças entre os níveis de cinza em 4 direções, sendo definidas para as direções 0° , 45° , 90° e 135° (figura 2.23a).

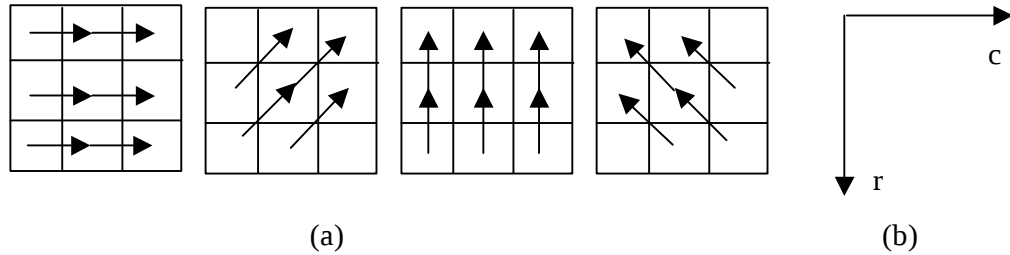


Figura 2.23- (a) Janela 3x3 mostrando as direções 0° , 45° , 90° e 135° ; (b) sistema de referência com origem no centro da janela 3x3 (Fonte: Galo e Tozzi, 2000).

Considerando a ilustração acima, os vetores direções podem ser calculados da seguinte forma:

$$V_{0^\circ} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{r=0}^2 \sum_{c=1}^2 (g(r,c) - g(r,c-1))^2 \quad (2.16)$$

$$V_{45^\circ} = \frac{1}{(n-1)^2} \sum_{r=1}^2 \sum_{c=1}^2 (g(r,c) - g(r+1,c-1))^2 \quad (2.17)$$

$$V_{90^\circ} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{r=2}^2 \sum_{c=1}^2 (g(r,c) - g(r+1,c))^2 \quad (2.18)$$

$$V_{135^0} = \frac{1}{(n-1)^2} \sum_{r=2}^1 \sum_{c=1}^2 (g(r,c) - g(r+1,c+1))^2 \quad (2.19)$$

Onde,

- n: é o tamanho da janela;
- r, c: linha e coluna da imagem; e
- N: (n-1)/2.

Considerando os resultados das equações acima a resposta do operador Moravec pode ser calculada por:

$$IO(r,c) = \min(V_{0^0}, V_{45^0}, V_{90^0}, V_{135^0}) \quad (2.20)$$

Onde,

IO: operador de interesse (*Interest Operator*);

min: respostas de magnitude mais baixas.

A figura 2.24 mostra o resultado de um teste realizado com uma imagem real utilizando o operador de Moravec.

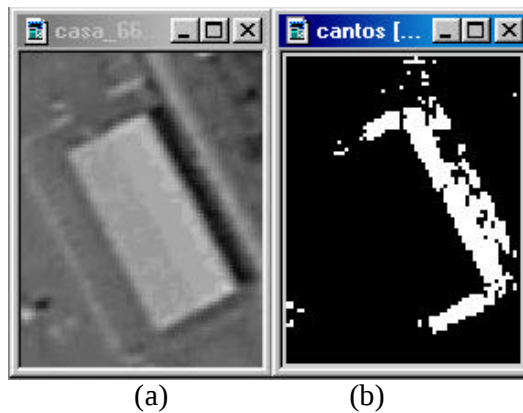


Figura 2.24– (a) Imagem original em tons de cinza; (b) Resultado dos cantos detectados com uma máscara 3x3.

Percebe-se na figura 2.24b, uma pequena translação na posição dos cantos detectados, bem como a presença de ruídos nas regiões de borda e sombras. Isto se dá pelo fato do tamanho da máscara ser pequena (3x3) e por não ser utilizado uma variação maior das direções utilizadas pelo operador Moravec (figura 2.23a). As feições existentes em imagens aéreas possuem várias inclinações e quando se encontra uma inclinação que não está representada nas máscaras, obtém-se presença de muitos ruídos nesta direção.

Galo e Tozzi (2000), realizaram uma adaptação do operador Moravec, utilizando máscaras com mais direções (diferentes ângulos de inclinação). Foram utilizadas 4 máscaras adicionais, com a finalidade de aumentar a eficiência do algoritmo. A figura 2.25 ilustra as 4 máscaras com direções 26.6° , 63.4° , 116.6° e 153.4° .

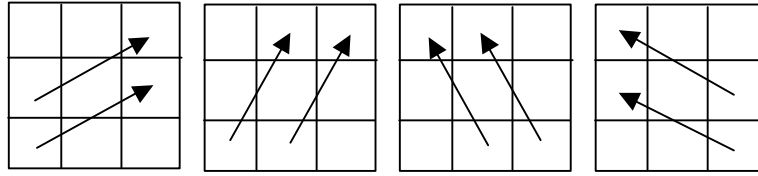


Figura 2.25 - Janela 3x3 mostrando as direções 26.6° , 63.4° , 116.6° e 153.4°
(Fonte: Galo e Tozzi, 2000).

Considerando a figura 2.25, os vetores direções podem ser calculados da seguinte forma:

$$V_{26.6^\circ} = \frac{1}{(n-1)} \sum_{r=1}^2 \sum_{c=0}^0 (g(r,c) - g(r-1c+2))^2 \quad (2.21)$$

$$V_{63.4^\circ} = \frac{1}{(n-1)} \sum_{r=2}^2 \sum_{c=0}^1 (g(r,c) - g(r+2,c+1))^2 \quad (2.22)$$

$$V_{116.6^\circ} = \frac{1}{(n-1)} \sum_{r=2}^2 \sum_{c=1}^2 (g(r,c) - g(r+2,c-1))^2 \quad (2.23)$$

$$V_{153.4^\circ} = \frac{1}{(n-1)} \sum_{r=1}^2 \sum_{c=2}^2 (g(r,c) - g(r+1,c-2))^2 \quad (2.24)$$

Considerando os resultados das equações acima a resposta do operador Moravec pode ser calculada por:

$$IO(r,c) = \min(V_{0^0}, V_{45^0}, V_{90^0}, V_{135^0}, V_{26.6^0}, V_{63.4^0}, V_{116.6^0}, V_{153.4^0}) \quad (2.25)$$

A figura 2.26b mostra o resultado de um teste realizado com uma imagem real utilizando o operador de Moravec com 8 máscaras pré-definidas, aplicando-se um limiar global. Para a obtenção automática de um limiar global utilizou-se o método OTSU descrito no capítulo 2 (seção 2.1.4).

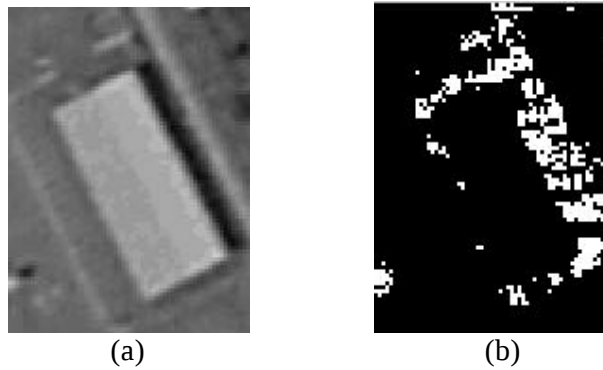


Figura 2.26 – (a) Imagem original; (b) Cantos detectados com 8 máscaras com um limiar obtido pelo método OTSU.

Percebe-se na figura 2.26b que, utilizando-se um limiar global, obtido pelo método OTSU, não se tem um bom resultado na detecção dos cantos. Percebe-se também a detecção de ruídos utilizando-se o operador Moravec. Isto pode ser explicado pelo fato de não terem sido implementadas mais máscaras contendo outras direções, ou seja, quando existe uma borda com uma inclinação não definida pelas máscaras, ruídos são detectados ao longo desta borda. Também pelo fato de não se ter uma situação controlada em imagens aéreas, é muito complicado implementar um algoritmo eficiente para detecção de cantos, além do fato de ocorrer uma translação nos cantos detectados. Por isso, optou-se por implementar uma rotina que calculasse analiticamente a intersecção entre as retas extraídas do processo de extração de edificações.

2.3 Geração do Modelo Numérico de Elevações

2.3.1 Definições

De acordo com Petrie e Kennie (1990), o termo Modelo Digital do Terreno apareceu pela primeira vez no artigo *The Digital Terrain Model – Theory and Applications*, com a seguinte definição: “O Modelo Digital do Terreno é simplesmente uma representação estatística da superfície contínua do terreno por um grande número de pontos selecionados com coordenadas XYZ conhecidas num sistema de coordenadas arbitrárias”.

Haala (1999), considera como Modelo Digital de Superfície (MDS) aquele que inclui edificações e outros objetos (tais como árvores), ao passo que o Modelo Digital do Terreno (MDT) armazenaria apenas as altitudes dos pontos na superfície do terreno.

Para Andrade (1998), entretanto, o Modelo Digital de Elevações (MDE) contém altimetria (Z) apenas, ao passo que o Modelo Digital de Terreno envolve outras feições, além da altimetria.

Nevatia *et al* (1999), consideram o Modelo Digital de Elevações como aquele que contém todas as informações das elevações contidas em uma cena, incluindo, portanto, edificações e vegetação.

No contexto deste trabalho, o Modelo Digital do Terreno (MDT) será entendido como aquele que contém apenas a informação de altitude dos pontos contidos no terreno e o Modelo Numérico de Elevações (MNE) como aquele que contém as informações de altitude das elevações existentes no terreno (edificações e vegetação).

2.3.2 Fontes de Dados

Nas Ciências Cartográficas, as fontes de dados utilizadas na aquisição, para a geração dos Modelos (de Terreno ou Elevação), são: Sensores Remotos (Fotogrametria, varredura a Laser e Radar), cartas existentes e medidas diretas no Terreno (Topografia e rastreamento de satélites-GPS). Para Petrie e Kennie (1990), existem algumas técnicas que são utilizadas para extrair coordenadas XYZ para a geração de Modelos, sendo elas:

- Diretamente no Terreno;
- Cartas;
- Varredura a Laser; e
- Fotogrametria.

Aqui serão apresentadas as apenas as técnicas de Fotogrametria e varredura a laser, por fazerem parte do enfoque do trabalho.

2.3.2.1 Varredura a Laser

Uma das modernas opções para geração de Modelos é a varredura a laser, que permite uma exatidão da ordem de 15 cm com espaçamento entre pontos de até 1 metro (Haala e Brenner, 1997).

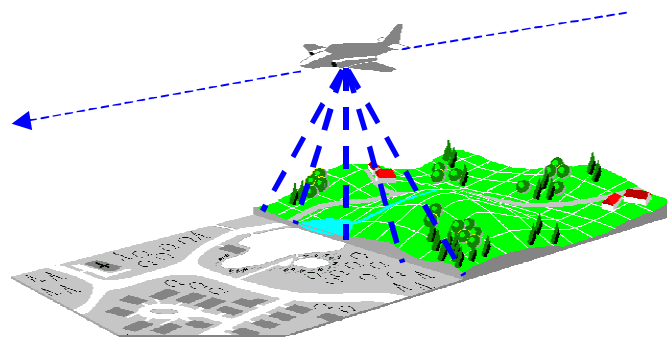


Figura 2.27 - Geração de Modelo Digital de Elevação por varredura a laser (fonte: TopoSys).

Uma característica marcante dos sistemas de varredura a Laser é a medição da primeira e última reflexão de cada pulso emitido (figura 2.28), além de detectar reflexões múltiplas oriundas de objetos (por exemplo, árvores). Este recurso permite, num processamento posterior, que se faça a discriminação de objetos acima do solo (edificações, árvores etc).

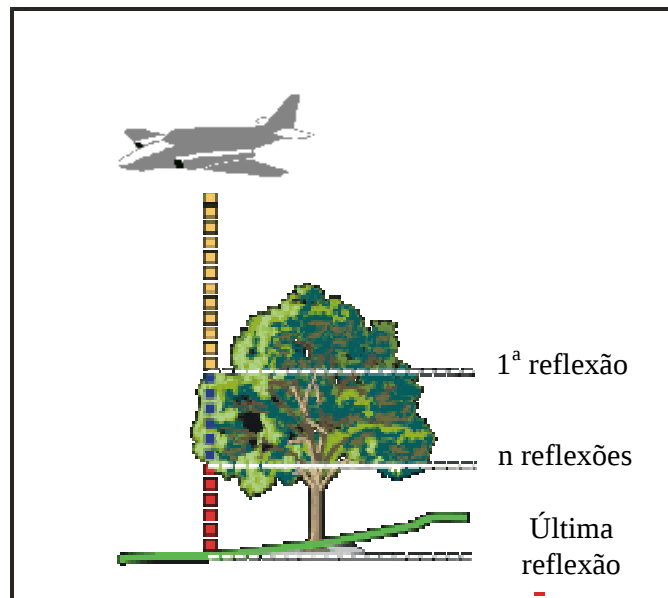


Figura 2.28 - Respostas de reflectância dos pulsos do laser.

2.3.2.2 Fotogrametria

Através de fotografias tomadas por câmaras digitais ou câmaras métricas convencionais, são formados os modelos fotogramétricos com sobreposição adequada. Os instrumentos utilizados para a geração dos Modelos de terreno e elevações são instrumentos analíticos ou analógicos, quando a fotografia é tratada analogicamente, ou seja, filme fotográfico convencional, e estações digitais quando a imagem é digital, tomada a partir de câmaras digitais ou digitalizadas.

2.3.3 Aquisição de Dados

Existem várias formas de aquisição de dados para a geração do Modelo de Elevação, sendo que esses dados podem ser adquiridos com um certo nível de intervenção do operador:

- Manual;
- semi-automática; e
- automática.

Aqui será tratado apenas o nível de intervenção do operador de forma automática, que é a forma utilizada pelo sistema Socet Set para geração de Modelos de Terreno e Elevações. As demais formas podem ser encontradas no apêndice B (seção B1).

2.3.3.1 Nível de Intervenção do Operador

2.3.3.1.1 Automática

A era digital, para a Fotogrametria, iniciou-se com a motivação para a geração automática de Modelos de Elevações, surgindo os algoritmos de correlação para determinação de pontos homólogos com o intuito de automatizar processos que são realizados pelo operador humano.

Quando não se tem um nível de intervenção do operador com a máquina, a forma de aquisição dos dados é considerada automática. Devido ao alto grau de complexidade de reconhecimento e inteligência artificial, bem como a falta de condições de luminosidade controlada, presença de sombras entre outros aspectos, os algoritmos de correlação automática de imagens (oriundos deste processo) não são totalmente confiáveis em algumas situações, como por exemplo na aquisição de pontos medidos em áreas muito urbanizadas.

Existem alguns sistemas fotogramétricos digitais que possuem ferramentas automáticas para geração de Modelos. De acordo com medidas empíricas

realizadas pelos autores, as mesmas fornecem uma confiabilidade de até 75% na medida dos pontos realizados por correlação automática de imagens.

Para Schenk (1996), a geração automática de Modelo compreende os seguintes passos:

- Determinação de pontos homólogos (correlação de imagens);
- Interpolação e densificação da superfície; e
- Edição do Modelo gerado (controle de qualidade).

De acordo com Schenk (1996), existem vários métodos de correlação de imagens e os principais são:

- (a) **correlação baseada em área:** é feita uma comparação entre a distribuição do nível de cinza de uma janela de referência com seu homólogo na outra imagem (janela de pesquisa). A janela de referência é um pedaço da imagem que percorre a imagem de pesquisa por convulsão. A comparação pode ser feita com vários critérios de medida de similaridade, tais como: função erro, correlação cruzada etc;
- (b) **correlação baseada em feições:** a correspondência é feita sobre propriedades das feições presentes na imagem. Tais feições podem ser retas, círculos ou áreas; e
- (c) **correlação simbólica ou estrutural:** este método compara descrições simbólicas nas imagens e medem a similaridade por uma função custo. As descrições simbólicas devem se referir ao nível de cinza ou feições derivadas.

2.3.4 Formas de Organização e Armazenamento do Modelo de Elevações

Existem formas de organização e armazenamento para a geração de Modelos de Terreno e Elevações. Nesta seção será tratada apenas a forma regular (grades); as demais formas (por exemplo, *TIN*) de organização e armazenamento de dados podem ser encontradas no apêndice B.

2.3.4.1 Forma de Organização

Os vértices dos retângulos podem ser os próprios pontos amostrados por perfilagem regular ou obtidos por um processo de interpolação, caso se tenha pontos amostrados de modo não regular. Uma das considerações importantes a respeito da grade regular é o espaçamento a ser estabelecido entre os seus elementos. A figura 2.29 mostra uma grade regular com pontos amostrados na grade.

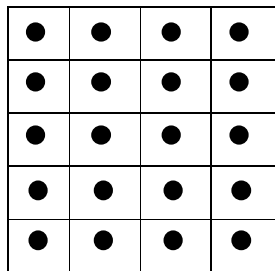


Figura 2.29 – Organização no formato regular.

Para Burrough (1986), a forma de organização em malhas regulares possui algumas desvantagens. São elas:

- Pelo fato da malha ser regular, em terrenos muito movimentados ocorre uma carência (sub-amostragem) de pontos para melhor explicitar o terreno; e
- Incapacidade de se adaptar a áreas com relevo complexo sem alterar o tamanho da malha. Devido à própria característica da malha regular é impossível adaptá-la a relevos muito movimentados.

De acordo com Wolf (2000), uma desvantagem associada ao armazenamento de informações de elevação, em grades regulares, é que para áreas planas uma grande porção da memória do computador é desperdiçada, pois são armazenadas informações redundantes.

Uma vantagem da organização de dados, em forma de grade, é sua simplicidade computacional.

2.3.4.2 Formas de Armazenamento

Para Fritsch e Pfannenstein (1992), o armazenamento dos dados do Modelo pode ser realizado a partir de arquivos seqüenciais ou por arquivos de acesso direto de estrutura de dados do tipo lista, na qual o posicionamento e a topologia são mantidos.

O armazenamento em forma de grade possui como vantagem, em relação à estrutura de dados, o acesso rápido da topologia e dos dados. Os dados são armazenados numa matriz de linhas e colunas descrevendo dados planimétricos xy , onde os elementos das matrizes são os valores de Z (altitude) (figura 2.30). Com isto, a topologia da grade regular pode ser acessada diretamente.

i \ j	1	2	3	4
1	Z_{11}	Z_{12}	Z_{13}	Z_{14}
2	Z_{21}	Z_{22}	Z_{23}	Z_{24}
3	Z_{31}	Z_{32}	Z_{33}	Z_{134}

Figura 2.30 – Forma de armazenamento dos dados da grade regular.

Após o armazenamento dos valores de Z na matriz computacional em forma numérica, o processamento é realizado por meio de vários algoritmos. Estes algoritmos incluem geração de curvas, volumes e representação tridimensional do terreno.

2.4 Arquitetura e Rotinas Operacionais do Sistema Socet Set

O sistema Socet Set[®] foi adquirido através de projeto “FAPESP-Multiusuário”, sendo o único sistema comercial aberto, pois disponibiliza um “Kit” de desenvolvimento (*DEVKIT*) contendo bibliotecas, interface de

programação e interface gráfica, que permitem ao usuário o desenvolvimento de suas próprias aplicações em linguagem C++.

O propósito do aplicativo Socet Set[®] é utilizar e dar suporte à aplicações fotogramétricas baseadas em imagens, SIG (Sistema de Informação Geográfica), interpretação de imagens, produção de mapas e base de dados vetoriais e matriciais para simulações, bem como explorar ferramentas utilizadas também em equipamentos analógicos de forma automática facilitando o trabalho do operador.

O aplicativo é escrito em linguagem C++, consistindo de bibliotecas, arquivos *headers* e aplicações. Uma variedade de bibliotecas está contida no *Kit* de desenvolvimento do sistema.

2.5 Geração Automática de Modelos de Elevação no Sistema Socet Set

O algoritmo de geração automática de Modelos de Elevações do aplicativo Socet Set, inicia seu processamento com as imagens em seu menor nível da pirâmide e com uma malha pouco densa, sendo aumentada sucessivamente a densidade da malha para cada nível da pirâmide, até atingir o nível 1:1.

No aplicativo Socet Set, existem dois métodos de geração de Modelos de Elevações:

- **Método adaptativo:** gera estratégias de correlação que se adaptam às movimentações do terreno; e
- **Método não-adaptativo:** requer uma estratégia definida pelo usuário.

De acordo com o User's Manual (1998) do Socet Set, quando se trabalha em regiões muito urbanizadas, principalmente com fotografias de escala grande, ocorrem falhas nas medidas dos pontos por correlação, pois a ferramenta automática, disponível no aplicativo, não modela as edificações, ou seja, não é capaz de fazer uma distinção entre pontos das edificações e pontos do terreno.

As estratégias utilizadas pelo sistema na geração de Modelos estão apresentadas no apêndice C.

2.5.1 Estratégia de Filtragem e Eliminação de Edificações e Árvores

Os filtros existentes no aplicativo, tentam eliminar os objetos existentes no terreno, tais como, árvores e edificações. Quando se seleciona a ferramenta é necessário fornecer a altura e a largura dos objetos de interesse. O operador deve fornecer a altura mínima e a largura máxima do objeto que se deseja eliminar. Pode-se fornecer uma altura um pouco menor que o objeto real devido à rampa lateral do mesmo.

O aplicativo gera automaticamente um Modelo por meio de estéreo-pares. O operador especifica o espaçamento entre as curvas e pode obter como informação de saída o Modelo na forma digital, para ser importado para algum CAD (*Computer Aided Device*), ou até mesmo pode ser utilizado para dar suporte para a geração de algum produto adicional, tal como a ortofoto digital.

As elevações são determinadas através das diferenças de paralaxe em x , na imagem retificada. A geração automática de terreno é um algoritmo iterativo que inicia com um nível de minificação⁷³ (figura 2.31) pequeno e um espaçamento esparso. Posteriormente é aumentada a densidade de pontos para cada nível de minificação, até que o nível da imagem original seja alcançado.

⁷³ processo que reamostra a imagem original em arquivos menores, através da mediana dos quatro pixels vizinhos.

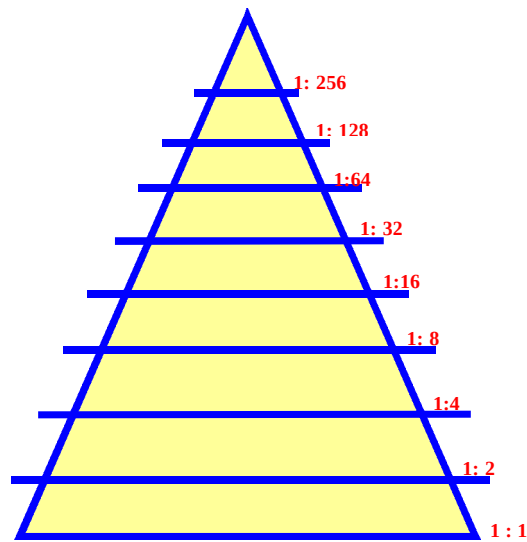


Figura 2.31 – Pirâmide de imagens (processo de Minificação).

A figura 2.32 ilustra o perfil do Modelo gerado pelo aplicativo sem a utilização de filtros, considerando uma edificação existente no terreno. Percebe-se que ocorre uma suavização na geração dos dados. No processo de correlação de imagens, o algoritmo procura pontos homólogos por correlação, não encontrando os mesmos em áreas de oclusão (ângulo morto, sombras etc).

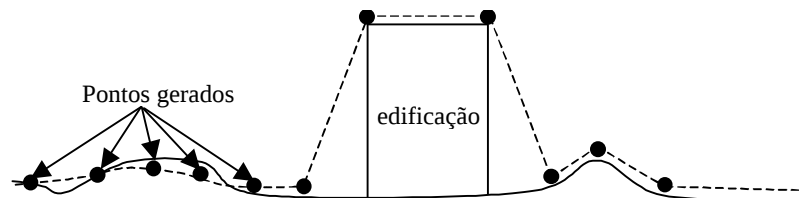


Figura 2.32 – Perfil do modelo gerado automaticamente.

A figura 2.33 ilustra o perfil do Modelo de Elevação gerado pelo aplicativo com a utilização de filtros. Percebe-se que mesmo com o uso de filtros o problema de suavização na geração dos dados é pertinente ao processo.

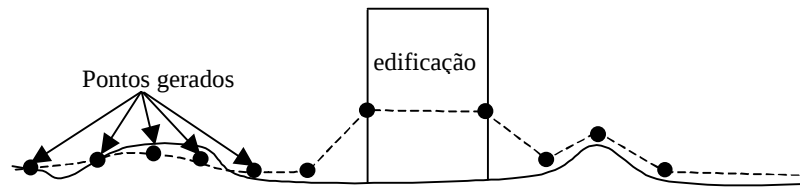


Figura 2.33 – Perfil do Modelo de Elevação gerado com a utilização de filtros de suavização.

2.6 Extração Semi-Automática de Feições no Sistema Socet Set

O sistema Socet Set possui duas ferramentas para o processo de extração de feições: o módulo EAF (Extração Automática de Feições); e o módulo *Sketch*. Neste trabalho foi analisado apenas as ferramentas do módulo *sketch*, com recursos de PDI (Processamento Digital de Imagens) para o processo de extração de feições. Essas ferramentas permitem o traçado de polígonos regulares, irregulares e o traçado de retas, a partir de um estéreo-par orientado.

2.6.1 Funções com Recursos de PDI

Com as ferramentas de extração semi-automática de feições, do módulo *Sketch*, que utilizam recursos de PDI, as bordas de uma feição podem ser delineadas pelo operador, sem a necessidade de selecionar pontos exatamente nos cantos, ou realizar o contorno das bordas com extrema precisão, pois a função refina o polígono, encontrando os cantos e as bordas, diminuindo o esforço operacional. Maiores detalhes do funcionamento desta ferramenta podem ser encontrados em Santos e Tommaselli (2001).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos e materiais:

- ✓ 01 Microcomputador Pentium(r) III MMX 128 MB RAM com 9 GB de Winchester;
- ✓ 01 Sistema Fotogramétrico Digital com o aplicativo SOCET SET[®] para Windows NT v4.0 Workstation;
- ✓ 02 fotografias aéreas convencionais da cidade de Minnieapolis dos Estados Unidos da América na escala 1:8000;
- ✓ 02 fotografias aéreas convencionais da cidade de Poços de Caldas na escala 1:8000, cedidas pela Empresa Esteio, digitalizadas com pixel de 12 μm , coloridas, convertidas para tons de cinza; e
- ✓ Ambiente de programação C++ Builder versão 4.0.

3.2 Metodologia

A proposta da pesquisa é trabalhar com uma área de estudo restrita à apenas uma EI (Edificação de Interesse), que possui seu centro de massa localizado no centro da imagem recortada pelo operador (extração semi-automática). Por isso, haverá preocupação apenas com edificações isoladas na imagem recortada. A hipótese do trabalho é utilizar um fluxo de etapas para a extração semi-automática da EI, com a finalidade de detectar retas presentes na

imagem recortada. Utilizando as regiões de alta frequência do MNE (Modelo Numérico de Elevações) gerado automaticamente pelo sistema Socet Set, como uma informação adicional para eliminar LI's (Linhas consideradas Insignificantes) (obtidas no processo de extração semi-automática de edificações) por meio de um processo de votação, para que posteriormente sejam fechados os polígonos extraídos. Nesta seção do capítulo 3 serão apresentadas as metodologias utilizadas para:

- ✓ Fechamento de polígonos;
- ✓ Gerar o MNE automaticamente no aplicativo Socet Set;
- ✓ Converter o MNE gerado numa imagem em tons de cinza; e
- ✓ Eliminar LI's, por um processo de votação.

Neste trabalho, utilizou-se o sistema fotogramétrico digital Socet Set para gerar automaticamente o MNE. Para a utilização do sistema, é necessário que o operador realize algumas etapas, tais como:

- ✓ Especificação de diretórios;
- ✓ Criação de projetos;
- ✓ Importação de imagens;
- ✓ Orientação interior;
- ✓ Importação dos pontos de apoio; e
- ✓ Aerotriangulação.

Um projeto da cidade de Poços de Caldas (realizado pela empresa Esteio) foi utilizado na etapa de geração automática de Modelos de Elevações para as análises da ferramenta desenvolvida.

Abaixo será apresentada apenas uma visão geral dos procedimentos necessários para a criação de um projeto no Socet Set.

3.2.1 Definição de Parâmetros do Projeto

Para a realização de qualquer projeto no sistema, o operador deve definir alguns parâmetros para que sejam atendidas as especificações cartográficas do trabalho, tais como *Datum*, Sistema de Coordenadas, entre outras. A tabela 3.1 mostra os parâmetros referentes a cada projeto.

Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados no projeto de Poços de Caldas.

Poços de Caldas	
<i>Datum</i>	SAD69
Formato	DD ⁰ MM' SS"
Unidade	Metros
Sistema de Coordenadas	UTM
Referência Vertical	Elipsóide
Altitudes máxima e mínima	1500 e 1000 m

3.2.2 Importação das Imagens

O certificado de calibração da câmara e os parâmetros de orientação exterior aproximados são dados necessários para a importação das imagens no Socet Set, para se garantir uma orientação adequada. Na importação das imagens, é realizado um processo onde a imagem original é reamostrada em vários arquivos (pirâmides de imagens), melhorando a eficiência do recurso de *zoom*.

3.2.3 Orientação Interior

O sistema possui ferramentas automáticas e semi-automáticas para a realização deste procedimento. Para a realização da orientação interior são utilizados parâmetros intrínsecos inseridos no arquivo de calibração. Após a execução da tarefa para cada imagem, é retornado um E.M.Q. (Erro Médio Quadrático), dado em unidades de pixel.

3.2.4 Aerofototriangulação

Existem ferramentas automáticas e interativas para a realização da fototriangulação do modelo ou bloco. No sistema, a triangulação se inicia pela importação do arquivo dos pontos de apoio. Posteriormente, o operador realiza a concatenação dos modelos determinando os pontos de passagem interativamente ou automaticamente, orientando o modelo relativamente, e a partir dos pontos de apoio materializa o referencial que se está trabalhando.

3.3 Técnicas de Extração de Feições em Empresas de Fotogrametria

Com o objetivo de realizar uma análise quantitativa e uma avaliação do processo de extração de feições que é empregada em empresas de Fotogrametria, foi realizado um estágio na Empresa AEROCARTA. Aqui, cabe apenas uma síntese do que foi visto e analisado neste estágio.

No período da avaliação, a empresa estava executando um cadastro técnico urbano, que abrangia a cidade de Mauá do ABC paulista. A escala das fotografias era 1:5000 e o produto final na escala 1:1000.

Para a execução da restituição no sistema digital, o aplicativo utiliza o módulo PRO600, que é um pacote do sistema Socet Set com ferramentas que customizam o aplicativo MicroStation para aplicações fotogramétricas, gerenciando uma conexão *online* com o aplicativo, ajudando na coleta de linhas, curvas, textos e símbolos, bem como outros elementos específicos.

Na restituição digital, mesmo sendo realizada com o módulo PRO600, constatou-se que os operadores não exploram os recursos de automação de extração de feições existentes no Socet Set (como por exemplo, a ferramenta *rooftop*), sendo apenas utilizadas os recursos gráficos do MicroStation.

Na geração de MDTs, quando se tem uma área muito urbanizada, existe a necessidade da interação do operador (edição), pois a ferramenta não modela edificações eficientemente, ou seja o algoritmo não consegue distinguir edificações de terreno. Quando se trata de áreas não urbanizadas, a geração do Modelo de Terreno é totalmente automática.

Foi feita uma análise quantitativa dos tipos de feições restituídas e do percentual que representam. Na tabela 3.2 é apresentado o percentual de extração de feições planimétricas mais significativas, quando se está realizando um projeto cadastral.

Tabela 3.2 - Percentual de extração de cada tipo de feição para o projeto cadastral de Mauá-SP.

Feições cartográficas	Tipo	Percentual (%)
Edificações	Área	55
Boca de lobo	Pontual	5
Hidrografia	Linear	10
Rodovias	Linear	10
Postes	Pontual	5
Linhas de transmissão	Linear	5
Ferrovias	Linear	10

Analisando-se a tabela 3.2 podemos afirmar que as edificações demandam maior percentual do tempo de restituição (cerca de 55%), por isso provocam maior esforço operacional, quando se está extraíndo feições planimétricas. Por este motivo é de grande interesse a automação das ferramentas de extração para este tipo de feições. As rodovias, ferrovias e hidrografia, por serem representadas linearmente, representam menor esforço, por necessitar apenas da coleta de alguns pontos no decorrer da extração, enquanto que para as edificações é necessária a coleta de no mínimo 3 pontos, para que ocorra o fechamento automático.

As estações digitais vêm oferecendo uma maior velocidade na extração pois, quando um bloco fotogramétrico é totalmente restituído, num restituidor analógico, existe a inconveniência do operador ter que orientar modelo à modelo e realizar a restituição plani-altimétrica no momento da formação de cada modelo.

Os operadores mais experientes, ainda preferem realizar a restituição nos restituidores analógicos, apesar do esforço físico (uso de manivelas e pedais) e a necessidade de maior atenção na operação. Talvez, a falta de um bom treinamento do aplicativo, tem dificultado a aceitação do avanço da automação digital, pois os

usuários do sistema não têm ainda conhecimento das ferramentas semi-automáticas de extração de feições existentes.

3.4 Metodologia Empregada para Elaboração de um Fluxo de Etapas para Extração Semi-Automática de Feições

O processo de extração de feições pode ser empregado na restituição de edificações. No caso deste trabalho, o processo é direcionado para a restituição de edificações em imagens de escala grande (1:1000 – 1:10000).

Os algoritmos implementados para as etapas de extração semi-automática de feições (especificamente edificações), estão escritos em linguagem C ANSI, no ambiente *Builder4.0*, sendo utilizado os recursos gráficos da linguagem apenas para visualização de imagens e vetores. Com isto, todas as funções escritas podem ser utilizadas em qualquer ambiente, havendo apenas a necessidade do programador reconfigurar a interface gráfica. Esta filosofia foi utilizada, pois pretende-se implementar a interface gráfica no ambiente Visual C++, a fim de integrar as funções implementadas no sistema Socet Set. As rotinas utilizadas para este processo foram aproveitadas dos códigos escritos por Tommaselli (1999) e Artero (1999). As rotinas de detecção de bordas e supressão não-máxima foram utilizadas do código escrito por Tommaselli (1999). As rotinas de suavização, limiarização, varredura e rotulação, e ajustamento de retas são utilizadas do código de Artero (1999). Como o detector de bordas fornece uma resposta pouco confiável nos cantos dos polígonos, foi implementado um algoritmo que calcula a intersecção dos cantos correspondentes à EI. Com isto, após todo o processo de ajustamento das retas é realizada uma busca em todas as coordenadas iniciais e finais (que formam um segmento de reta), verificando se existe intersecção entre as retas, por meio de análises de proximidade e diferença entre ângulos.

3.5 Etapa de Intersecção de Retas

A etapa de intersecção de retas foi estabelecida como a última de todo processo de extração de edificações, pois verificou-se em experimentos realizados, que o procedimento de fechamento de polígonos seria mais eficiente após a eliminação de LI's, porque alguns segmentos extraídos fora da EI, tornavam o processo de intersecção de retas muito carregado. A figura 3.1 apresenta um fluxograma do algoritmo implementado para realizar a tarefa de intersecção de retas.

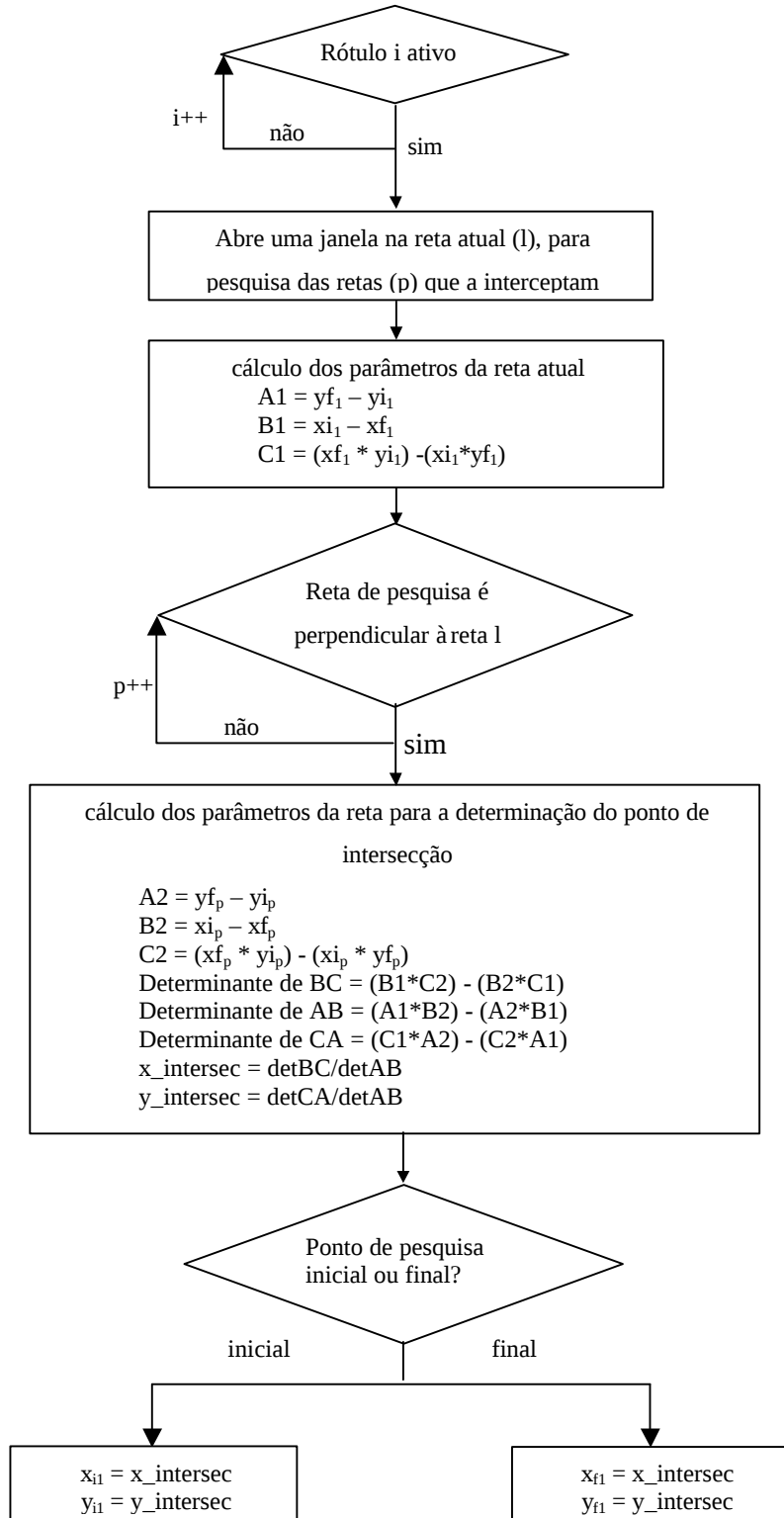


Figura 3.1 – Fluxograma para intersecção de retas.

A figura 3.2 apresenta alguns resultados obtidos no cálculo da intersecção de retas das edificações correspondentes.

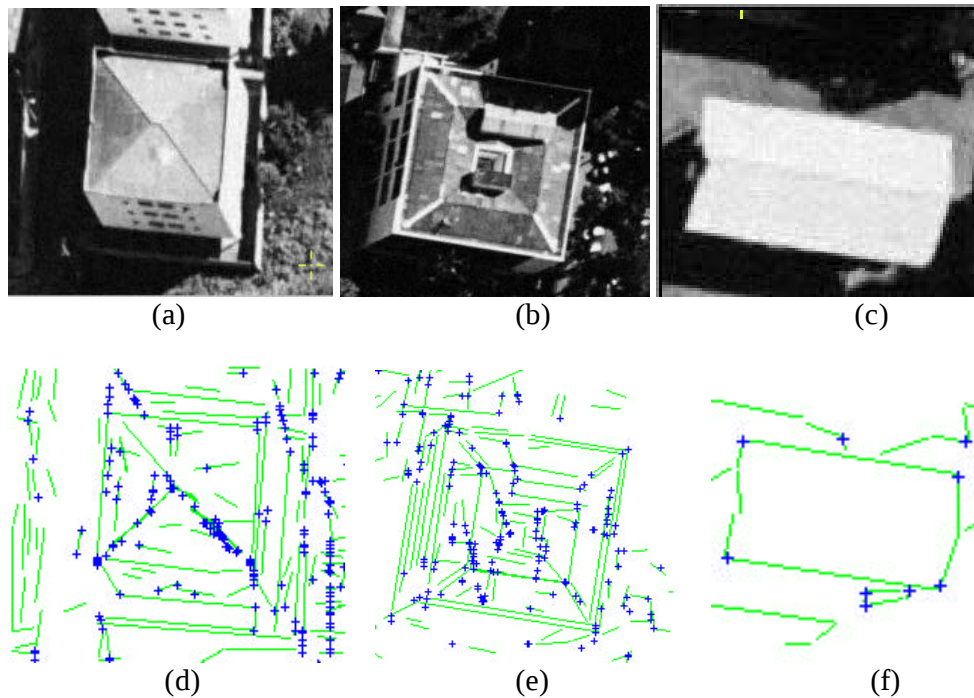


Figura 3.2 – (a), (b) e (c) Imagens originais; (d), (e) e (f) Intersecções dos cantos das retas extraídas.

Na figura 3.2 os pontos representados pelo sinal em forma de cruz são os pontos de intersecção entre as retas. Analisando a figura 3.2, verifica-se que o procedimento de fechamento de polígonos será mais eficiente após a eliminação de LI's, pois existem muitas retas que não definem a EI (figuras 3.2d e 3.2e), aumentando o custo computacional.

Para eliminar LI's é necessário utilizar a informação do MNE gerado (convertido numa imagem em tons de cinza), para que seja realizada uma operação de detecção de bordas, obtendo-se desta forma as informações de alta frequência e direção, que servirão como canal adicional neste processo. Desta

forma, o algoritmo de intersecção de retas trabalhará com maior eficiência no método, tal como pode ser visto na figura 3.2f (poucas retas a serem pesquisadas).

3.6 Metodologia Utilizada para Converter MNE Gerado numa Imagem em Tons de Cinza

Como já foi mencionado, o sistema Socet Set possui uma ferramenta para geração automática de Modelos a partir de um estéreo-par previamente orientado.

O formato de dados utilizado neste trabalho para geração de MNE é do tipo *grade*. Para gerar o Modelo de Elevações automaticamente é necessário que o operador defina o espaçamento entre os pontos que deverão ser gerados. Como é necessária alta precisão na modelagem das Elevações presentes no terreno, utiliza-se o *GSD (Ground Sample Distance)* fornecido pelo sistema, que representa o tamanho do pixel no terreno.

Para a geração do MNE, não foi utilizado nenhum filtro para a eliminação das elevações contidas no terreno (edificações e vegetação), exatamente por representarem as informações das altitudes de interesse.

Gerado o MNE, o que se tem são as informações das coordenadas planimétricas (E, N), bem como as coordenadas altimétricas (H) de cada ponto correspondente no terreno. Pelo fato do algoritmo de geração automática de MNE (sistema Socet Set) gerar uma grade irregular de pontos, é necessário obter um arquivo que contenha os dados com as coordenadas de cada ponto obtido. Com isto, é então gerado um arquivo *ASCII* das coordenadas obtidas pela ferramenta, bem como a informação do tamanho da área (definida pelo operador) que cobre a EI.

A figura 3.3 apresenta o arquivo de saída contendo as informações das coordenadas E, N e H, que representam os pontos gerados automaticamente pelo sistema Socet Set.

```
#
# The DTM grid had lower left (southwest) corner coords:
#   X or easting = 337932.7380 meters
#   Y or northing = 7589801.7000 meters
# and grid intervals:
#   X (east) grid interval = 0.2340 meters
#   Y (north) grid interval = 0.2340 meters
# For a total of 228 x 173 = 39444 points.
#
# There may be less points in this file because those
# grid points that were outside of the polygon that
# defined the DTM boundary are not included in this file.
#
337932.9720 7589801.7000 1180.2239
337933.2060 7589801.7000 1180.2075
337933.4400 7589801.7000 1180.1670
337933.6740 7589801.7000 1180.1658
337933.9080 7589801.7000 1180.1927
```

Figura 3.3 – Arquivo *ASCII* gerado pelo sistema.

O algoritmo implementado faz uma leitura no arquivo *ASCII* de saída, procurando o tamanho da área de cobertura da EI (por exemplo, 228x173), que corresponde à altura e largura da área do MNE gerado e os valores das coordenadas E, N e H de cada ponto gerado. Esta informação pode ser utilizada no algoritmo, para alocar memória apenas para a região do MNE gerado na imagem.

A definição da área é realizada manualmente pelo operador, de forma que o mesmo forneça as coordenadas do canto inferior esquerdo e superior direito, formando um retângulo cobrindo a EI (figura 3.4).

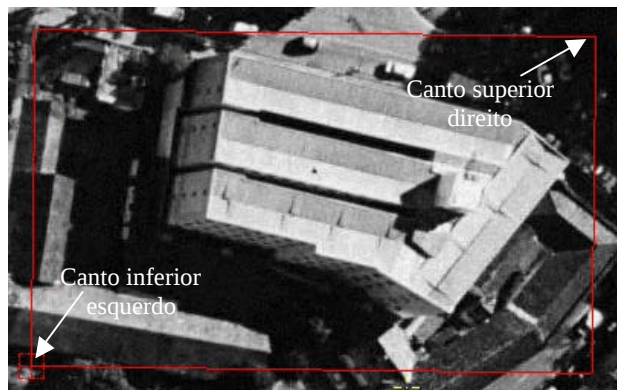


Figura 3.4 - Área de cobertura da EI definida pelo operador.

Neste trabalho, as informações de interesse são aquelas que definem o topo da EI. Por isso, para a conversão do MNE gerado, numa imagem em tons de cinza, é necessária a informação do topo da EI. Seria possível obter a informação do topo e da base automaticamente, procurando-se a altitude máxima e mínima (na região da imagem recortada, arquivo *ASCII*), caso não ocorresse uma suavização (figura 3.5) no processo de correlação automática implementado no sistema.

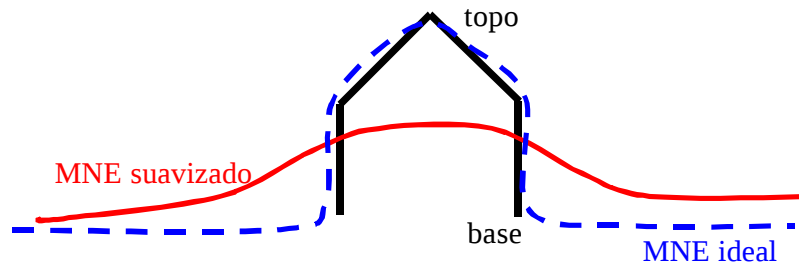


Figura 3.5 – Representação do perfil do MNE gerado pelo sistema Socet Set.

Por este motivo, foi elaborado a determinação de um limiar para definir as altitudes que representam o topo da edificação, sendo este limiar dado por um critério de porcentagem. Para isto, o operador deve entrar com as informações da base e do topo da EI (obtidas na interação com o sistema). Desta forma, é primeiramente calculado um intervalo para definir as altitudes dentro de um limite de altitudes abaixo e acima do topo da EI (figura 3.6):

$$\Delta h = \text{topo} - \text{base} \quad (3.1)$$

$$\Delta_{RP} = \Delta h * (P_L / 100) \quad (3.2)$$

Onde,

- Δ_{RP} : intervalo de pontos que possuem altitudes próximas ao topo da edificação;
- P_L : percentual de pontos que se aproximam do valor de altitude do topo (dado pelo operador);
- topo: valor de altitude do topo da edificação; e
- base: valor de altitude da base da edificação.

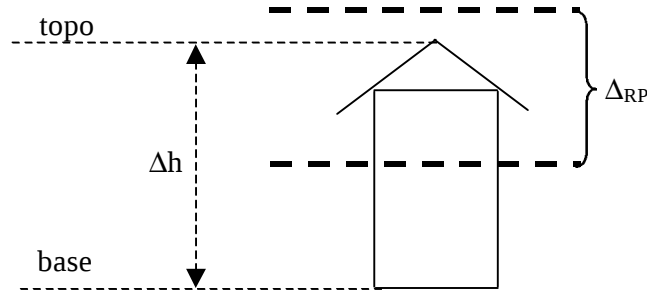


Figura 3.6 – Região de pontos definidos dentro de um limiar de altitude do topo.

Após calcular um intervalo Δ_{RP} , é calculada a média e o desvio padrão das altitudes compreendidas entre a região de pontos que possuem altitudes próximas do topo da edificação, ou seja, $\Delta_{RP} \leq \text{Altitudes} \leq \Delta_{RP}$. Com isto, obtém-se um limiar para definir os pontos que representam as altitudes do topo da EI, através de:

$$L = \bar{x} + s \quad (3.3)$$

Onde,

$\bar{x}$: média dos pontos entre Δ_{RP} ;

σ : desvio padrão da média; e

L: limiar que define as altitudes de interesse.

A figura 3.7 mostra uma outra utilidade do limiar por critério de porcentagem. Neste caso, quando se têm duas edificações (uma alta e outra mais baixa) utiliza-se uma medida de porcentagem para manter no processamento apenas valores com altitudes mais próximas do topo da EI (edificação mais alta ou mais baixa).

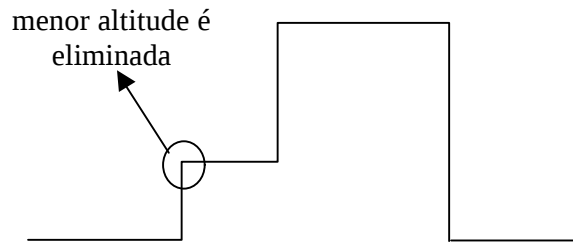


Figura 3.7 – Perfil de duas edificações.

Com isto, altitudes menores que o limiar (L) obtido são eliminadas do processamento (atribui-se valor 0), enquanto que para altitudes maiores ou iguais ao limiar é atribuído o valor 255 (branco), convertendo-se os valores do MNE gerado, numa imagem em tons de cinza. Com isto, é aplicado um operador de detecção de bordas (Nevatia e Babu), mantendo no processamento apenas bordas de interesse (informações do topo da EI). A figura 3.8 apresenta o MNE convertido numa imagem em tons de cinza e suas bordas detectadas.

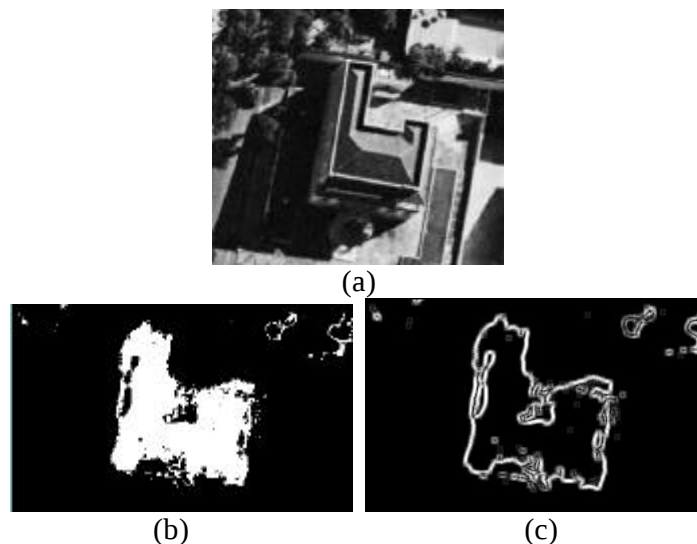


Figura 3.8 – (a) Imagem original; (b) Modelo de Elevações convertido numa imagem em tons de cinza; (c) Bordas detectadas.

Esta informação será utilizada para eliminar linhas redundantes, fazendo uma análise entre as retas extraídas da imagem original (tons de cinza) e as bordas do MNE detectadas. Um fluxograma do processo é apresentado na figura 3.9.

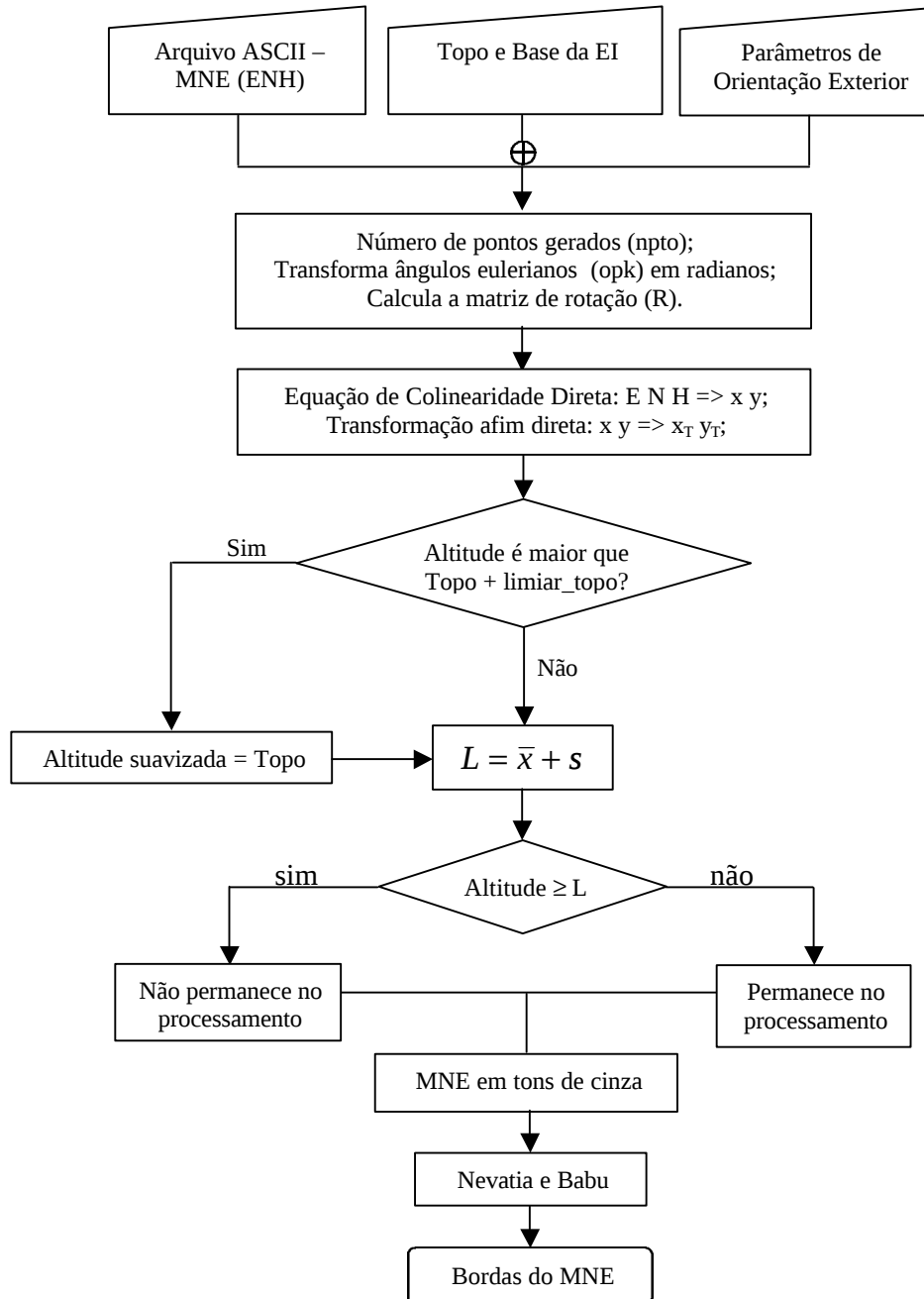


Figura 3.9 - Fluxograma do processo de conversão do Modelo de Elevações gerado numa imagem em tons de cinza.

3.7 Estudo de Zonas sem Correspondência

Nesta seção do capítulo 3, será realizado um estudo teórico sobre zonas na imagem em que não há correspondência, enfatizando os aspectos relativos ao deslocamento devido ao relevo, sombras e ângulo de abertura da câmara. Esses fatores provocam oclusões na imagem, tornando-se um grande obstáculo para os algoritmos de correlação automática de imagens.

3.7.1 Estudo Teórico de Fatores que Provocam Perturbações na Geração do MNE

Neste trabalho, a informação de altitude das elevações é utilizada para eliminar LI's, por isso, existe a preocupação no estudo do comportamento do MNE para que se tenha um resultado confiável e correto. Existem alguns elementos que afetam a geração do Modelo, quando são utilizados algoritmos de correlação de imagens, os mais expressivos são:

- ✓ deslocamento devido ao relevo;
- ✓ sombras, vegetação; e
- ✓ ângulo de abertura da câmara.

3.7.1.1 Deslocamento Devido ao Relevo

No contexto de Fotogrametria Digital, oclusões são os maiores obstáculos para os processos de correlação automática de pontos homólogos. O deslocamento devido ao relevo nas edificações causa um tipo de oclusão, de característica visual, caracterizado pela própria geometria da perspectiva central, ocorrendo radialmente em relação ao nadir. Com isto, o algoritmo de correlação não encontra correspondência em alguns pontos nas imagens sobrepostas, tendo então que realizar uma interpolação para todos os pontos que não são correlacionados (pontos críticos), gerando pontos que representam uma área maior que a edificação.

Os sistemas fotogramétricos atuais geram Modelos de Elevações automaticamente, mas não se preocupam com a correção do deslocamento devido ao relevo que geram dados não confiáveis na representação das edificações (estruturas de interesse neste trabalho), pois são ferramentas desenvolvidas para modelar pontos de terreno. Na realidade os algoritmos implementados nestes sistemas, preocupam-se em eliminar e não modelar edificações. A figura 3.10 ilustra o deslocamento devido ao relevo, enfatizando casos de edificações.

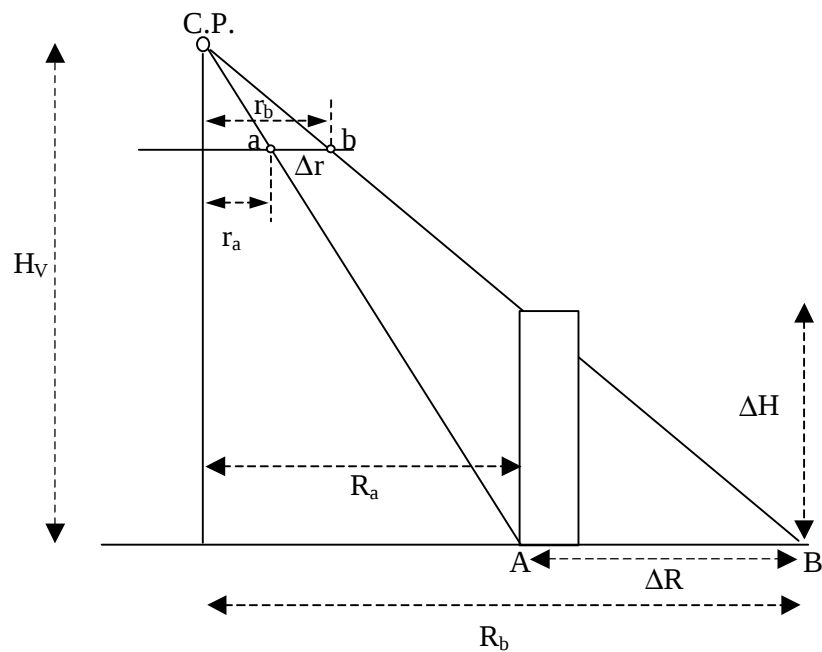


Figura 3.10 – Parâmetros do deslocamento devido ao relevo.

Onde,

- ✓ r_a, r_b : distância radial na imagem (dada entre o nadir e o ponto);
- ✓ R_a, R_b : distância radial no terreno
- ✓ Δr : é o deslocamento do objeto na imagem;
- ✓ ΔR : é o deslocamento do objeto no terreno;
- ✓ ΔH : é a altura da edificação; e
- ✓ H_v : altura de vôo.

Abaixo será descrito um modelo matemático que pode ser utilizado na correção do deslocamento devido ao relevo (para imagens verticais).

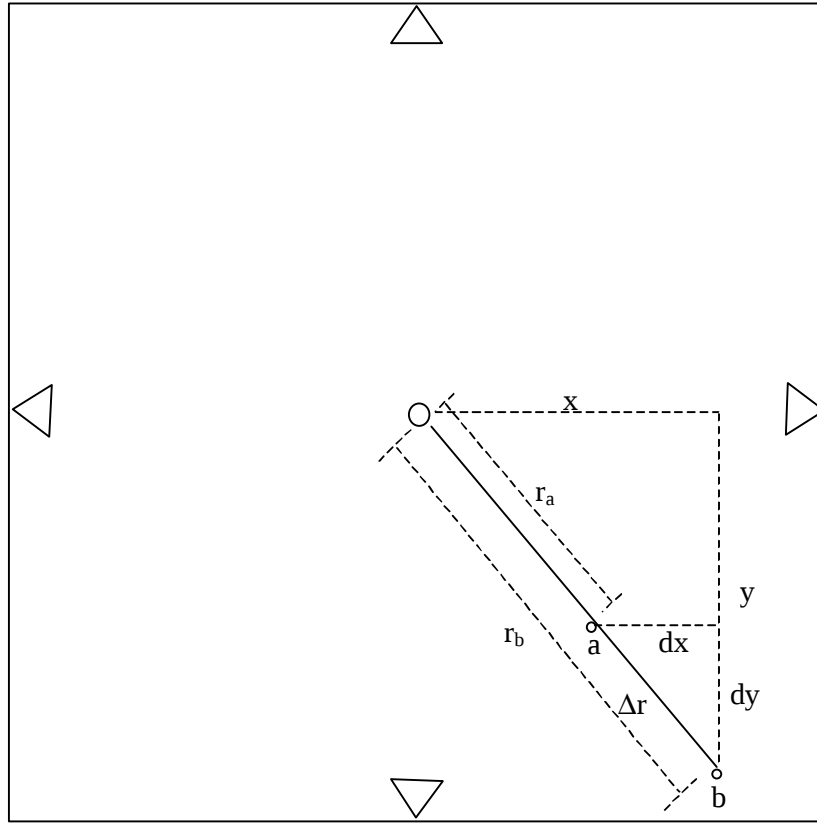


Figura 3.11 – Deslocamento devido ao relevo.

Considerando a relação de triângulos apresentada na figura 3.11, tem-se que o deslocamento devido ao relevo no espaço imagem é dado pela equação abaixo:

$$\Delta r = \frac{\Delta H}{H_v} r_b \quad (3.4)$$

Sendo,

$$r_b: \sqrt{x_b^2 + y_b^2}.$$

A correção deve ser feita, teoricamente, da base para o topo, pois a informação de interesse é o topo da edificação. A partir da equação (3.4) pode-se calcular o deslocamento radial da base (a) para que seja aplicada a correção do Modelo gerado, através de:

$$\Delta r = \frac{\Delta H}{H_v} r_a \quad (3.5)$$

Onde,

$$r_a: \sqrt{x_a^2 + y_a^2}.$$

Considerando a figura 3.11, podemos escrever a relação de triângulos, desenvolvendo o seguinte modelo matemático para o cálculo de dx:

$$\frac{\Delta r}{dx} = \frac{r_a}{x} \quad (3.6)$$

$$dx = \frac{\Delta r}{r_a} x \quad (3.7)$$

Onde,

- ✓ dx: relação entre deslocamento do objeto na imagem e a distância radial do nadir à base da edificação na direção x.

Uma formulação análoga vale para dy. Assim, pode ser realizada a correção do Modelo gerado, através de:

$$\begin{aligned} x_t &= x_a + dx \\ y_t &= y_a + dy \end{aligned} \quad (3.8)$$

Com a formulação apresentada na equação (3.8), todos os pontos de base (x_a, y_a) da edificação podem ser deslocados para o topo (x_t, y_t).

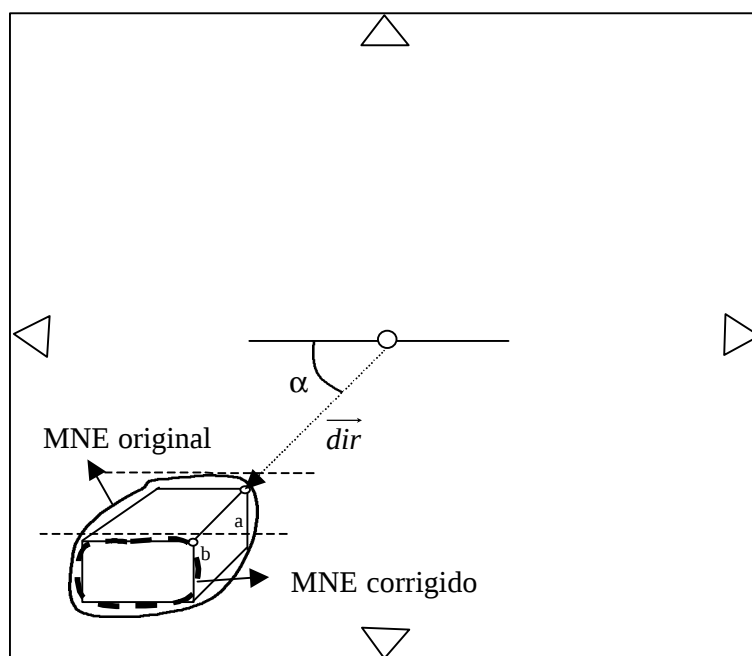


Figura 3.12 – Esquema de correção do MNE gerado (sem escala).

Considerando a figura 3.12, temos que $\vec{dir}$ é a direção da correção que será aplicada ao contorno da edificação extraída do MNE. A figura 3.13 apresenta um perfil das zonas sem correspondência de uma edificação, dada pelo deslocamento devido ao relevo.

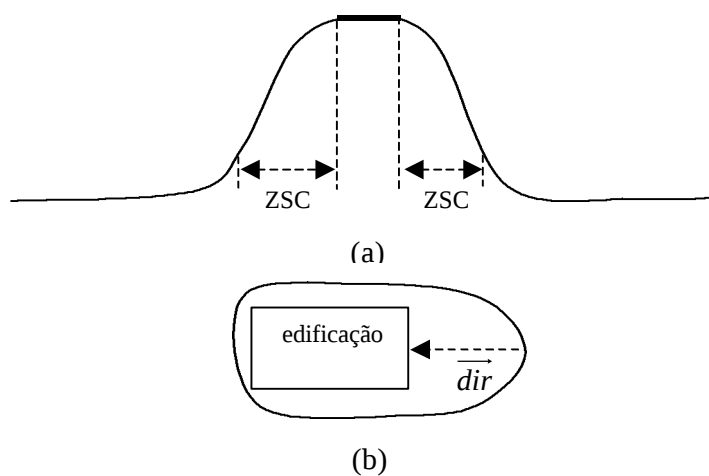


Figura 3.13 – (a) Perfil apresentado para ilustrar zonas sem correspondência; (b) Direção de correção do Δr .

A idéia descrita acima não foi implementada neste trabalho, mas pode ser utilizada como recomendações para trabalhos futuros relacionados à este problema.

3.7.1.2 Sombras

A sombra é um tipo de elemento que também gera zonas sem correspondência na imagem, sendo considerada um obstáculo no processo automático de medidas de pontos homólogos. As sombras podem ser provocadas por nuvens, feições naturais como árvores e feições antrópicas como edificações. A figura 3.14 mostra uma edificação que projeta sombra no terreno.

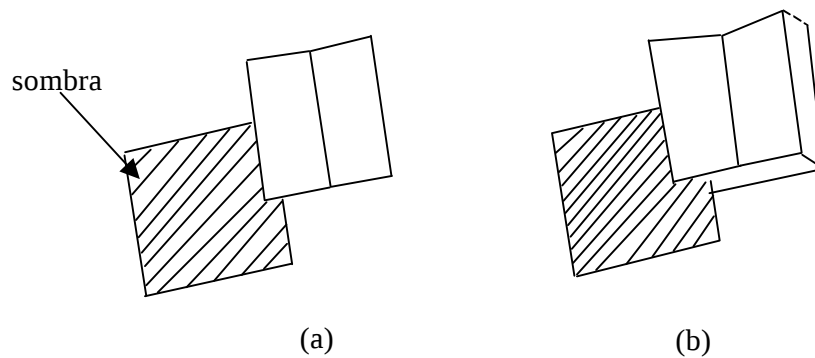


Figura 3.14 – Presença de sombras na tomada de imagens aéreas. (a) Imagem da esquerda; (b) Imagem da direita.

Neste caso na área rachurada (sombra) não ocorre correlação. Com isto, os pontos nesta área são interpolados pelo algoritmo, deformando o Modelo local (Figura 3.15a, A1). No algoritmo de correlação automática de imagens do aplicativo Socet Set, as áreas de ZSC (Zonas Sem Correspondência) são interpoladas (figura 3.15b).

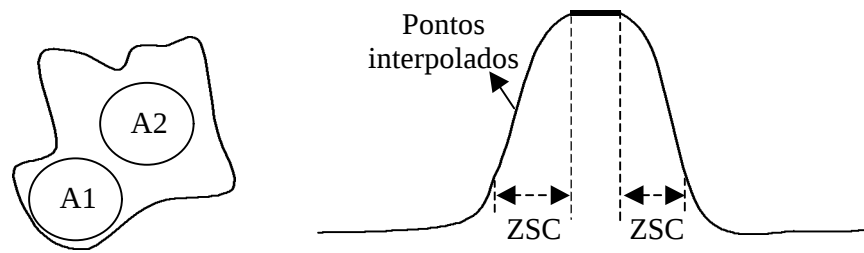


Figura 3.15 – (a) Modelo local deformado; (b) Representação da área interpolada.

No exemplo apresentado na figura 3.15a, a sombra não obstrui a edificação, mas existem casos em que sua projeção cobre partes da EI dificultando tanto o processo de detecção de bordas da edificação quanto o de correlação (figura 3.16). Atualmente, existem câmaras digitais com sensores de 12 bits de resolução radiométrica, capazes de discriminar objetos cobertos pelas sombras (sensor ADS da Leica Helava), mas mesmo assim, por se ter uma baixa resposta na área coberta pela sombra, é necessário aplicar um algoritmo de reconhecimento de padrões.

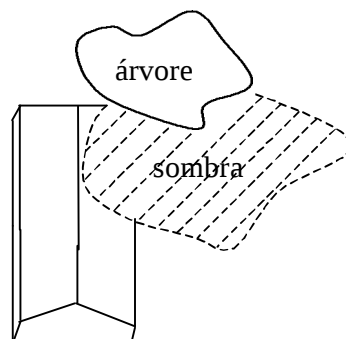


Figura 3.16 – Presença de sombra cobrindo uma parte da EI.

3.7.1.3 Ângulo de Abertura da Câmara

O ângulo de abertura da câmara estabelece uma relação muito importante na detecção de oclusões em imagens aéreas, pois quanto maior o ângulo de abertura maior será a oclusão, denominada ângulo morto. A figura 3.17, mostra

uma situação em que uma fotografia tomada a uma altitude de vôo alta, mas com uma focal grande, portanto um ângulo de abertura pequeno (α), causa um ângulo morto pequeno (figura 3.17a), em relação à uma fotografia tomada à uma altitude de vôo menor (para manter a relação de escala entre uma fotografia e outra), mas com uma distância focal pequena, portanto com um ângulo de abertura maior (α_i) e (figura 3.17) conseqüentemente um ângulo morto maior.

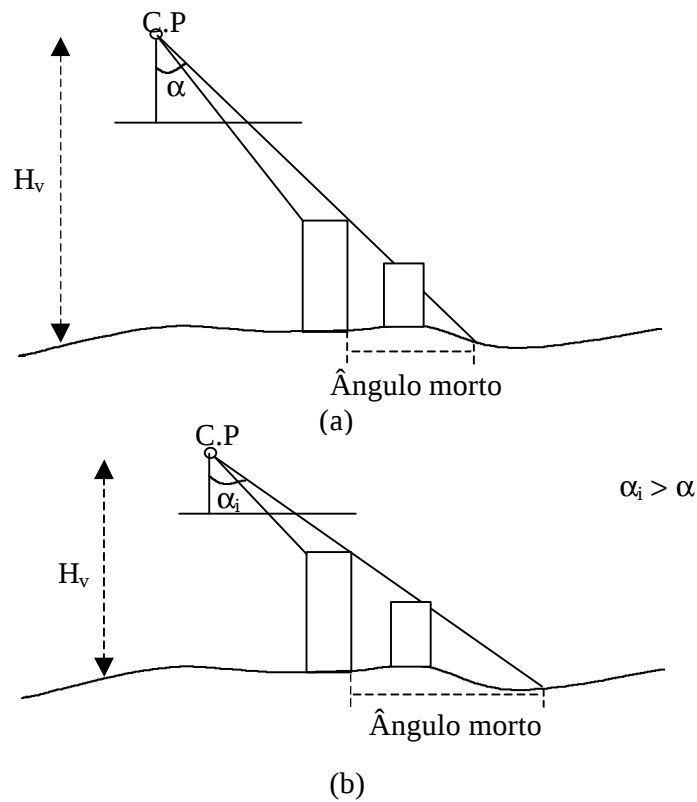


Figura 3.17 – Ilustração de ângulo morto. (a) Abertura angular pequena da câmara com altitude de vôo alta; (b) Abertura angular pequena com altitude de vôo baixa.

Outro fator que causa perturbações no comportamento do MNE é a altura da edificação, ou seja, como pode ser visualizado na figura 3.18, quanto maior a altura da edificação maior a área de oclusão na imagem.

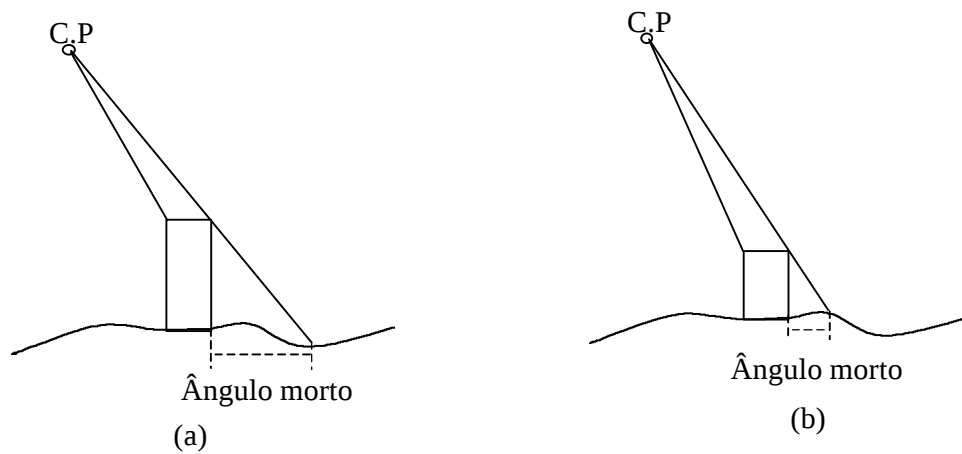


Figura 3.18 – Ilustração de ângulo morto relacionado com a altura das edificações.

(a) Edificação alta; (b) Edificação baixa.

A seguir serão analisadas situações em que aparecem todos os tipos de oclusões discutidas anteriormente, que causam problemas na geração de Modelos de elevações utilizando-se algoritmos de correlação automática de imagens.

3.7.2 Problemas do Algoritmo de Geração de Modelos de Elevações Utilizado pelo Sistema Socet Set

Aqui será descrito o problema relacionado com algoritmos de correlação automática de imagens para correspondência de pontos homólogos na geração de Modelos de Elevações (sistema Socet Set). Considerando-se a figura 3.19, temos que os pontos 1 e D possuem as mesmas coordenadas XY no terreno e coordenadas Z diferentes, sendo que na imagem possuem coordenadas $x_1y_1 \neq x_Dy_D$, efeito causado pela projeção perspectiva (deslocamento devido ao relevo).

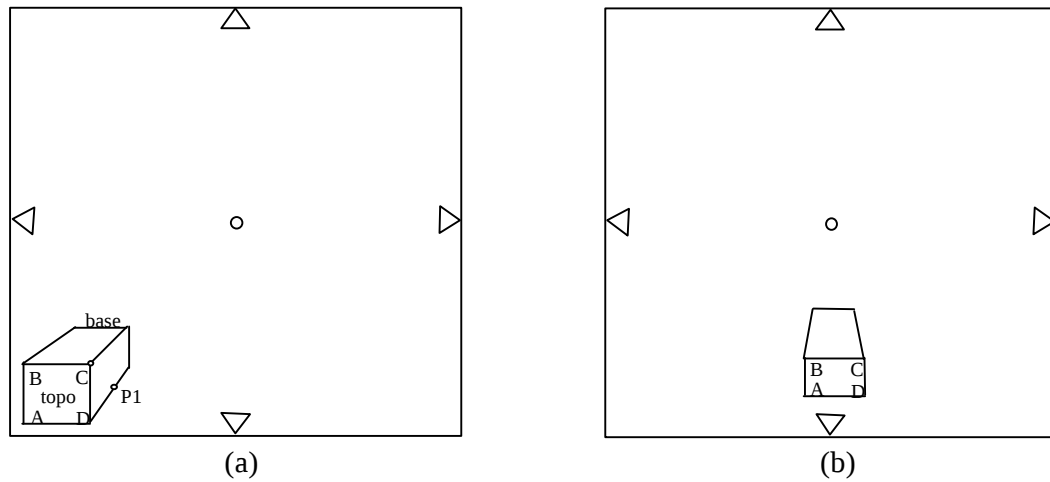


Figura 3.19 – (a) Edificação localizada na imagem da esquerda; (b) Edificação localizada na imagem da direita (representação da edificação sem escala).

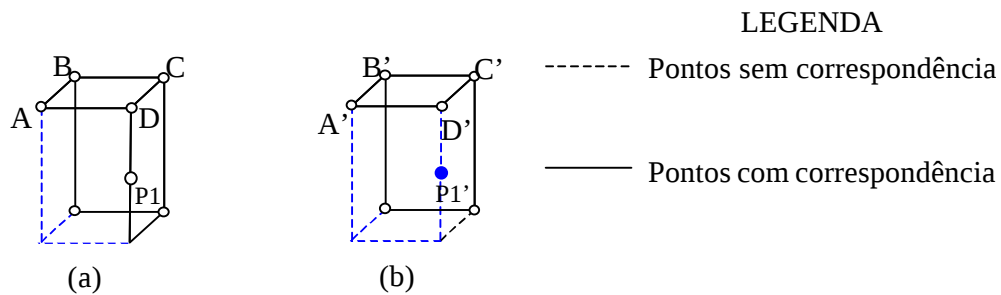


Figura 3.20 - Perfil 3D da edificação. (a) Perfil da imagem da foto da esquerda; (b) Perfil da imagem da foto da direita.

Na figura 3.20, é mostrada uma vista lateral da imagem vista na figura 3.19. Com isto, podemos verificar pontos que são visíveis na imagem da esquerda (por exemplo, ponto P1), mas não são visíveis na imagem da direita (P1'). Devido a isto, algoritmos que geram Modelos de Elevações utilizando correlação automática de imagens, ou seja, realizam medidas de similaridades de pontos considerados homólogos, falham nestes casos por não conseguirem encontrar os pontos correspondentes.

A figura 3.21 mostra uma situação ideal realizada pelo processo de correlação de imagens.

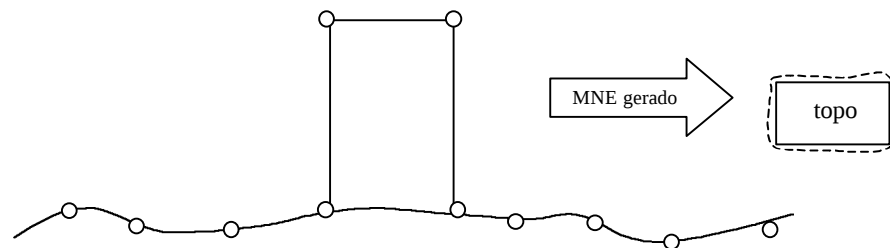


Figura 3.21 – Situação ideal na geração dos pontos por correlação automática.

Como a ferramenta de geração automática de Modelos do sistema Socet Set foi implementada para geração de Modelos de terreno sem se preocupar com a hipótese de geração de Modelos de elevações, na prática tem-se verificado que o algoritmo não é eficiente para este último problema, tendo-se encontrado perturbações no comportamento do Modelo gerado, como pode ser visto na figura 3.22.

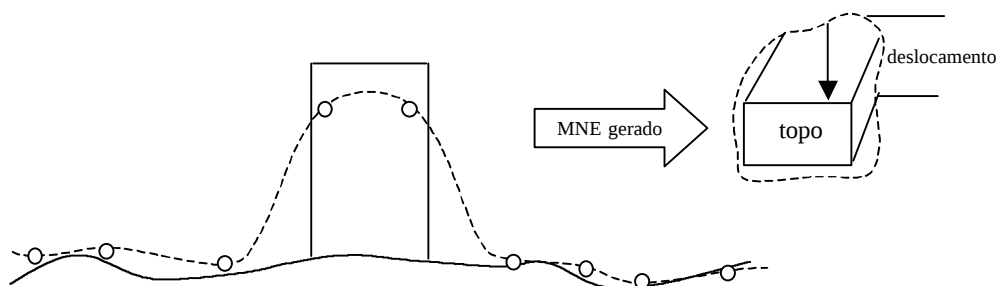


Figura 3.22 – Situação anômala fornecida pelo sistema Socet Set.

3.8 Processo de Eliminação de Linhas Consideradas Insignificantes por Votação

Através de uma análise das informações de gradiente e direção das bordas do MNE gerado (detecção de bordas), pode-se eliminar LI's (meio fio, muros, vegetação etc.) extraídas no processo de extração de edificações na imagem em tons de cinza. Esta análise é feita de forma que, para cada reta extraída na imagem em tons de cinza (figura 3.23b), seja aberta uma janela (*buffer*) de mesma direção da reta (figura 3.23c). Desta forma, é realizada uma varredura dentro da janela (figura 3.23e) acumulando-se os pixels de borda do MNE por um processo de votação. Para a contagem do número de votos é definida uma tolerância de distância dada pelo comprimento da reta (C) em questão (figura 3.23d).

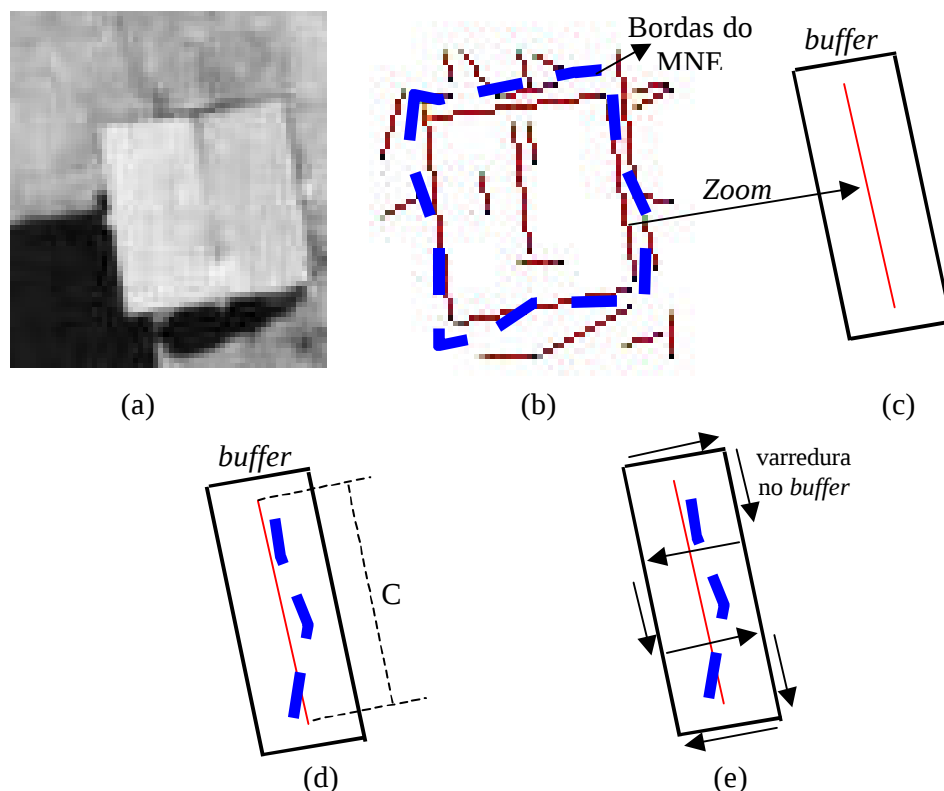


Figura 3.23 – (a) Imagem original; (b) Vetores extraídos da imagem em tons de cinza e bordas do MNE; (c) Vetor que será analisado; (d) Comprimento da reta; (e) Sentido de varredura dentro do *buffer*.

O processo de votação se dá pela contagem dos pixels de borda do MNE existentes dentro do *buffer*, onde as retas analisadas que obtiverem uma quantidade de votos dentro de um limiar definido pelo comprimento da reta (C - dada pela diferença entre os pontos inicial e final da reta) permanecem no processamento (reta 1) e mantêm-se ligadas para serem visualizadas (figura 3.24b). Caso a reta obtenha uma votação inferior ao limiar calculado, a mesma é desligada do processamento (reta 2) (figura 3.24d).

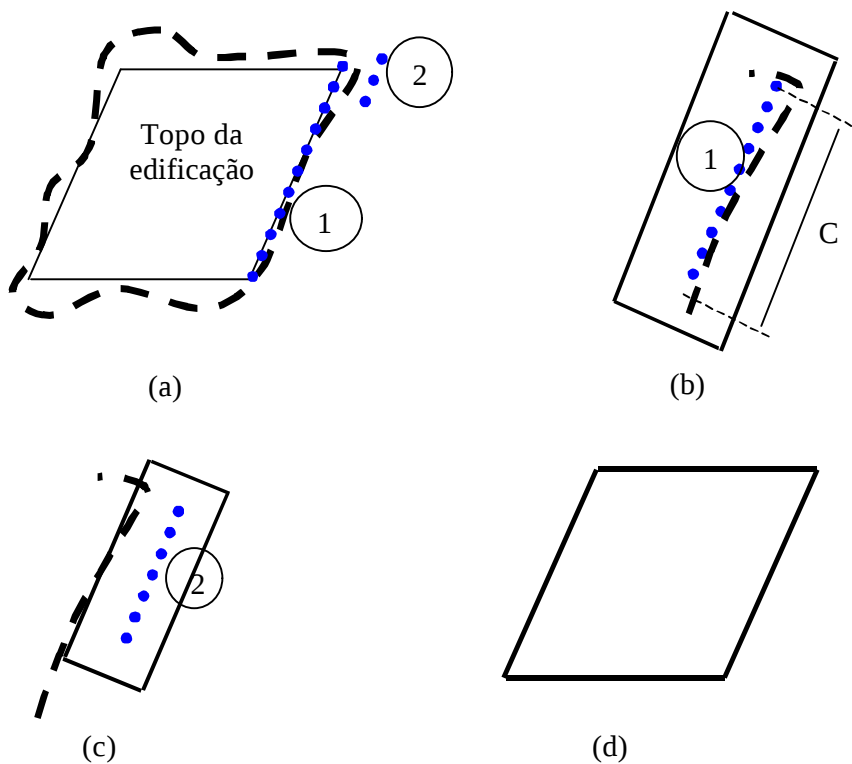


Figura 3.24 – (a) Edificação com duas retas paralelas e próximas a serem analisadas; (b) Análise da reta que define o topo da EI; (c) Análise da reta que não define o topo da EI; (d) Resultado obtido pelo processo de votação.

Na figura 3.25 será apresentado um fluxograma do processo de votação para eliminação de linhas consideradas insignificantes.

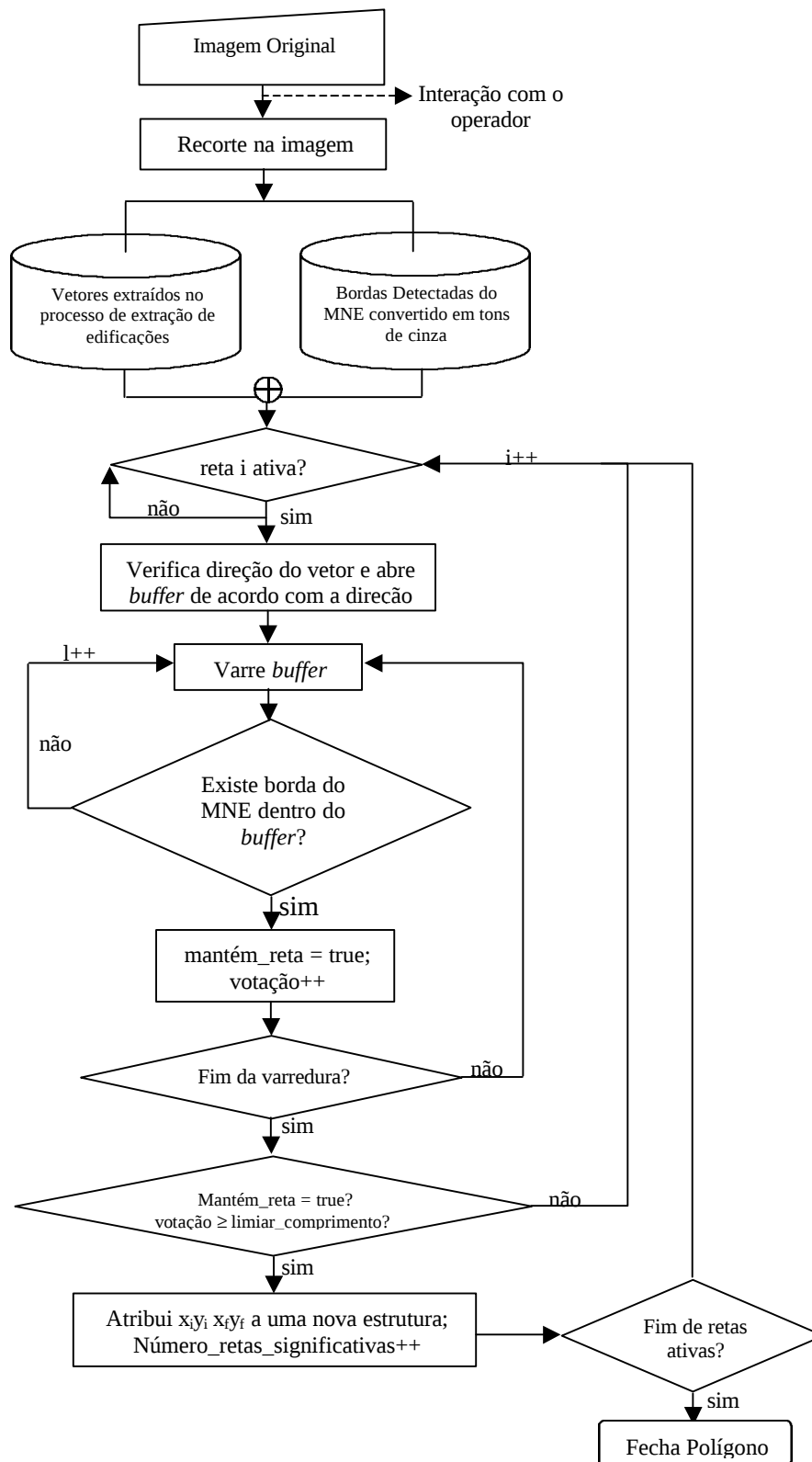


Figura 3.25 – Fluxograma do processo de votação.

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTOS E ANÁLISES

4.1 Ferramenta *Sketch* – Extração Semi-Automática de Feições do Socet Set

Foram realizados experimentos com o objetivo de estudar, analisar, identificar e avaliar a eficiência dos algoritmos implementados nas ferramentas de extração semi-automática de feições existentes no sistema, para que se tenha conhecimento da confiabilidade destas ferramentas.

A ferramenta *Sketch* manipula gráficos vetoriais e possui uma variedade de operações de edição, tais como translação, rotação, intersecção de pontos e compressão de objetos gráficos, sendo utilizada para extrair, graficamente, objetos com representação tridimensional na imagem.

As funções disponíveis na ferramenta *Sketch* podem ser classificadas como: funções geométricas ou vetoriais (CAD); e funções que utilizam recursos de PDI. Essas funções permitem o traçado de polígonos regulares, irregulares e o traçado de retas, a partir de um estéreo-par orientado.

As funções testadas e avaliadas não apresentaram nenhuma característica esperada, pois dependem demasiadamente do operador e de sua experiência na seleção dos pontos sementes, manipulação de limiares etc. Quando as imagens possuem oclusões, ruídos ou outros problemas, dificilmente os algoritmos serão eficientes. Maiores detalhes dos experimentos podem ser vistos no artigo publicado no CD do II Colóquio de Ciências Geodésicas (apêndice D).

4.2 Geração Automática de MNE

As figuras a seguir apresentam experimentos realizados utilizando-se as estratégias de geração de Modelos de Elevações disponíveis no aplicativo, bem como suas respectivas visões isométricas e imagens em tons de cinza das regiões de alta frequência. Todas as figuras que serão apresentadas, não estão em escala em relação à imagem original, para que se possa visualizar melhor os dados gerados.

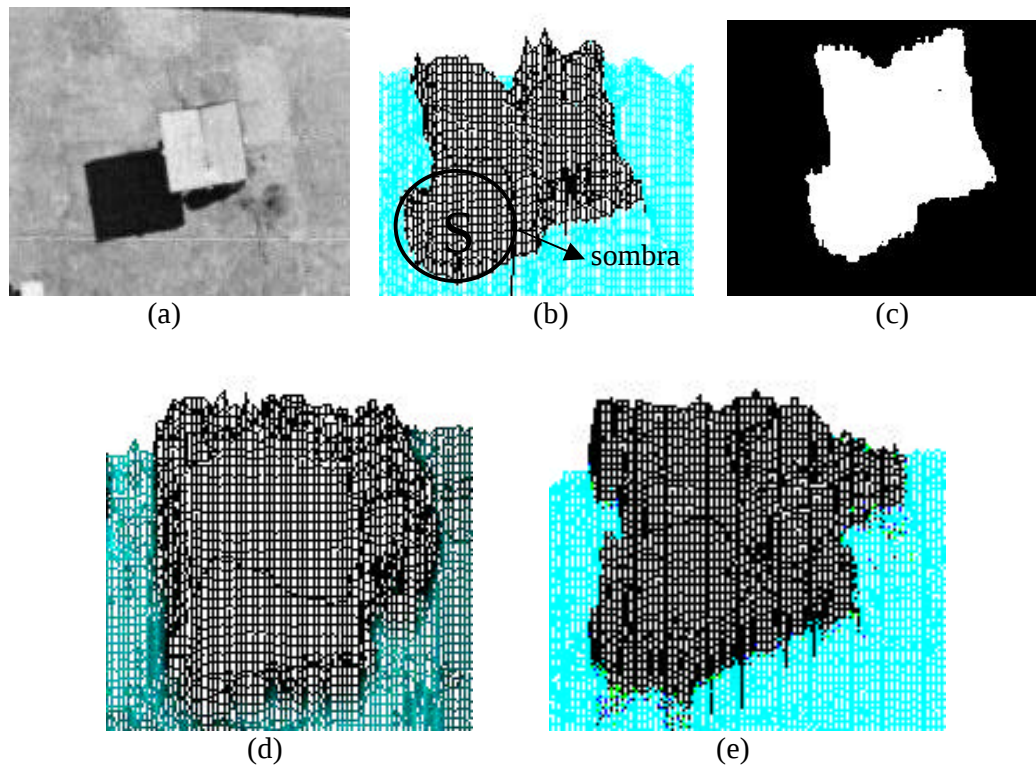


Figura 4.1 – (a) Imagem original; (b) Vista isométrica do MNE gerado com a estratégia adaptativa do aplicativo; (c) Imagem do MNE gerado em tons de cinza com a estratégia adaptativa; (d) MNE gerado com a estratégia adaptativa modificada (parâmetro para não realização de interpolação de pontos críticos); (e) Estratégia não-adaptativa *steep*.

Comparando-se visualmente a figura 4.1a (imagem original) com as figuras 4.1b (dados gerados pela estratégia adaptativa), 4.1d (estratégia adaptativa modificada) e 4.1e (estratégia não-adaptativa) percebe-se que os dados representativos na figura 4.1b modelam melhor a EI, do que os dados gerados pelas demais estratégias utilizadas.

Como pode ser visto na figura 4.1b, ocorre a modelagem de pontos que não definem a EI (S - sombra). Isto pode ser explicado pelo fato do algoritmo de correlação de imagens, implementado no Socet Set, falhar na correlação de áreas com sombras (área homogênea), interpolando os pontos (pontos críticos) projetados pela sombra da edificação, gerando um Modelo de Elevações com informações falsas.

Na estratégia adaptativa modificada, foi desligado o parâmetro de interpolação de pontos críticos (apêndice D, tabela D1.1). Nota-se que o algoritmo não interpolou pontos sem correspondência, entretanto, modelou uma parte que não é da EI, mostrando sua ineficiência (figura 4.1d).

De acordo com o User's Manual (1998), a estratégia não-adaptativa-*steep* é eficiente na medida de pontos sobre todos os tipos de terreno, mas percebe-se que o algoritmo não modela a edificação corretamente (figura 4.1e), além de consumir maior tempo computacional (de acordo com experimentos realizados) e não aceitar que o operador entre com novos parâmetros, para melhorar a eficiência do método.

A figura 4.1(c) mostra o MNE gerado, convertido numa imagem em tons de cinza. Nota-se nesta figura, que a área da edificação é representada por uma intensidade de brilho maior (que corresponde ao topo da EI), apesar de, neste caso, a sombra também estar sendo representada com a mesma altitude do topo, pois foram interpolados os pontos correspondentes à sombra projetada pela edificação. Pode-se verificar também que os limites (prováveis bordas) do MNE não são bem definidos (suavizados) e não têm boa acurácia (não representam a EI perfeitamente), devendo ser evitada a extração direta das edificações utilizando-se a informação do MNE.

Embora os resultados apresentados não possam servir para uma extração direta, perceber-se o potencial de utilização destes Modelos para reduzir o espaço de busca na eliminação de LI's, auxiliando no processo de extração de feições.

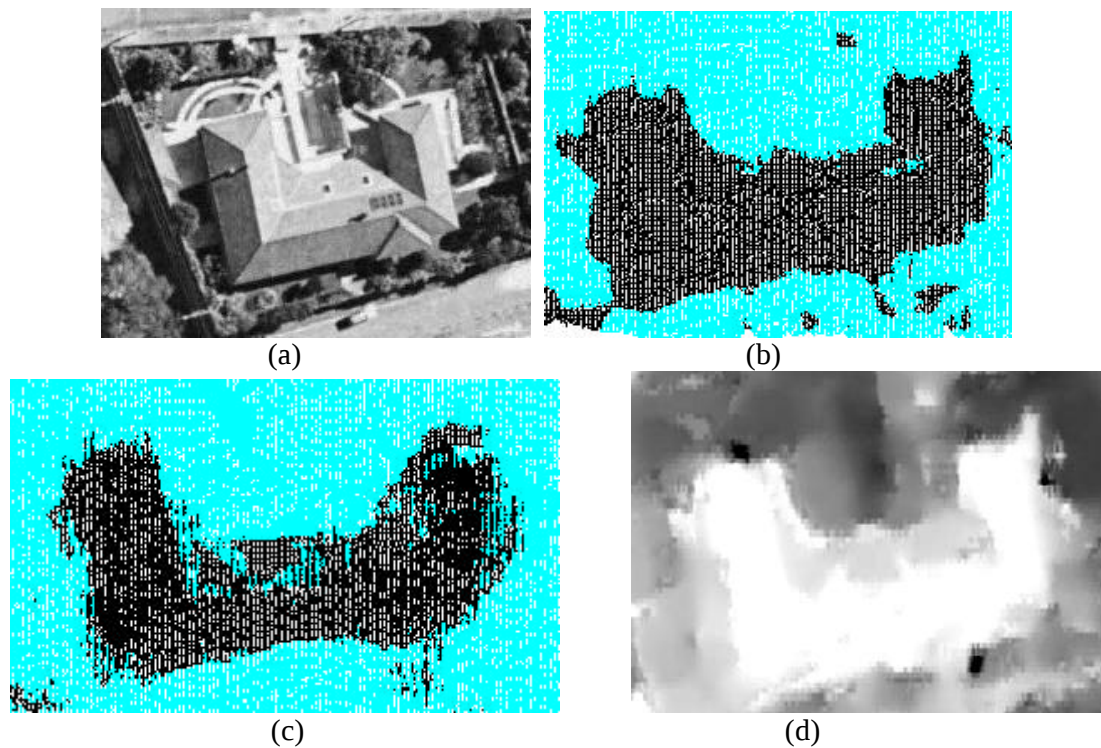


Figura 4.2 – (a) Imagem Original; (b) Vista isométrica do MNE gerado (método adaptativo); (c) Método adaptativo modificado; (d) Imagem do MNE em tons de cinza.

Nota-se na figura 4.2b, que a estratégia adaptativa modelou muito bem a edificação, considerando as limitações do algoritmo. Na figura 4.2c, a estratégia utilizada foi a adaptativa modificada. Com isto, percebe-se que a edificação foi modelada e pontos considerados críticos (não possuem homólogos) não foram interpolados, mas muitos pontos pertencentes ao topo da edificação não foram gerados (figura 4.2c). No caso deste experimento, a estratégia *steep* não alcançou um percentual de medida aceitável ($> 75\%$) para que se tenham pontos gerados com confiança.

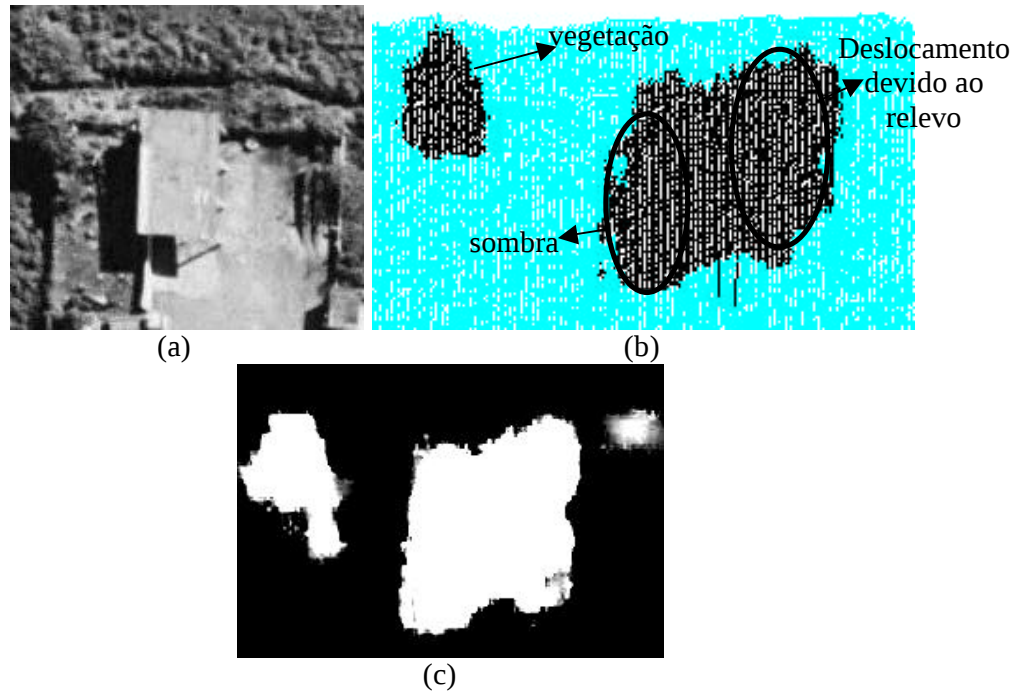


Figura 4.3 – (a) Imagem Original; (b) Vista isométrica do MNE gerado (método adaptativo); (c) Imagem do MNE em tons de cinza.

Nota-se na figura 4.3b, que a estratégia adaptativa, neste caso, não modelou perfeitamente a edificação, fato que pode ser explicado pelo deslocamento devido ao relevo e à presença de sombra projetada pela edificação. Mas percebe-se que as elevações são consideravelmente modeladas, como pode ser visto na representação da vegetação (figura 4.3b, lado esquerdo da edificação). A estratégia adaptativa modificada, não atingiu o percentual de pontos medidos, necessário para a modelagem confiável dos pontos gerados, indicando que é muito complicada a utilização desta estratégia, dependendo muito da experiência do operador com a manipulação dos parâmetros envolvidos no algoritmo. Neste experimento, a estratégia *steep* também não atingiu um percentual de medida aceitável.

Os demais experimentos realizados mostraram que o método mais eficiente na modelagem de pontos de elevação é o adaptativo, por ter obtido um comportamento geométrico bom em 85% das edificações modeladas.

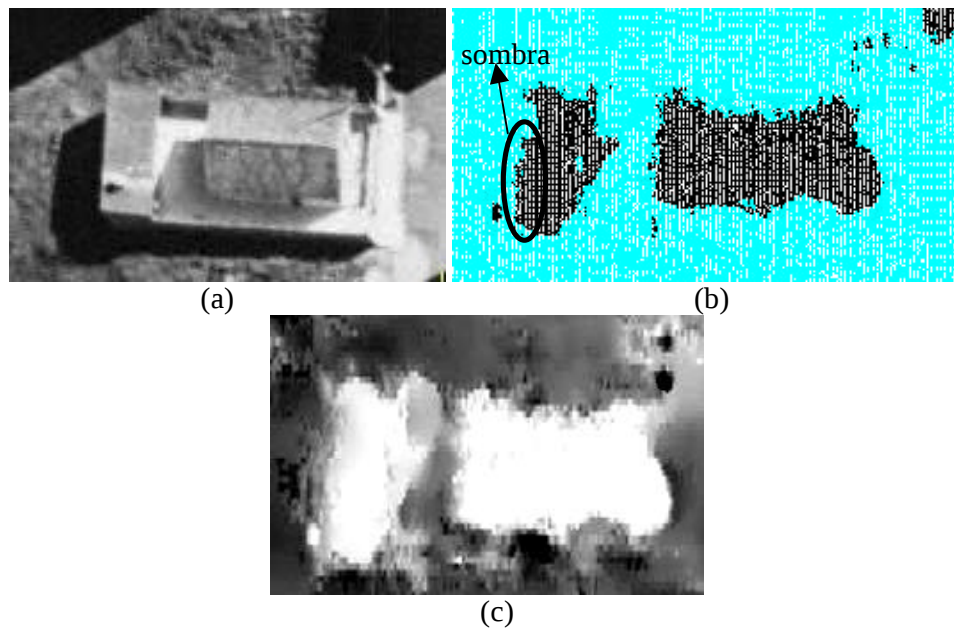


Figura 4.4 – (a) Imagem Original; (b) vista isométrica do MNE gerado (método adaptativo); (c) Imagem do MNE em tons de cinza.

Nota-se na figura 4.4b, que a estratégia adaptativa, visualmente, modelou consideravelmente a edificação, mas como descrito anteriormente ocorre uma perturbação no comportamento do MNE gerado, fatores de influência detalhados no capítulo 3 (seção 3.7), mais especificamente o deslocamento devido ao relevo, neste caso. Como já descrito em experimentos anteriores, o método adaptativo modificado e *steep*, novamente não corresponderam às expectativas, de um percentual de pontos medidos.

Na figura 4.5 serão apresentados experimentos realizados utilizando-se o método adaptativo, para geração automática de MNE.

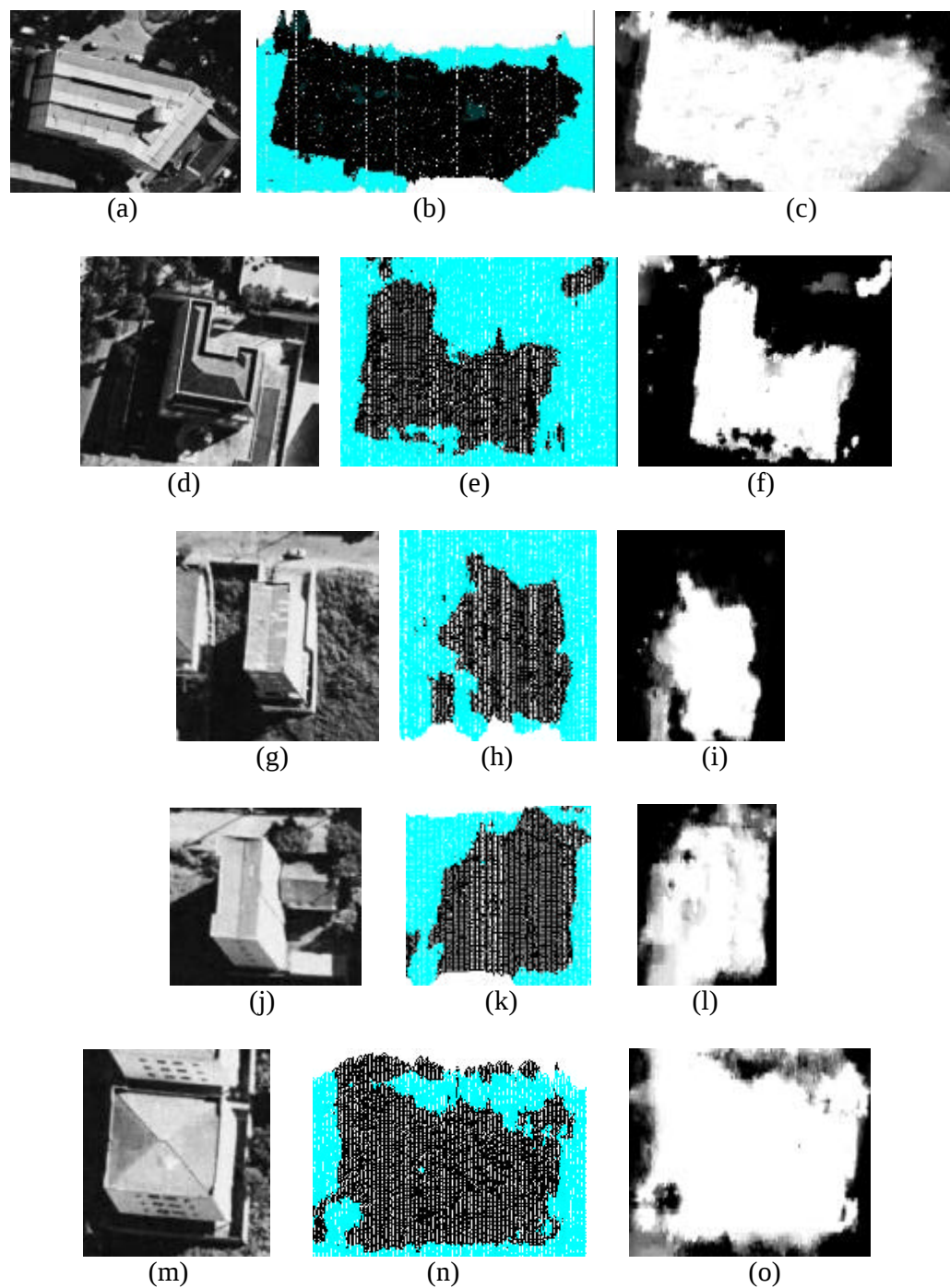


Figura 4.5 – Experimentos realizados utilizando-se o método adaptativo para geração automática de MNE.

Analizando-se as figuras correspondentes às vistas geométricas, bem como as imagens em tons de cinza do MNE gerado, pode-se afirmar que a utilização do algoritmo para correlação automática de pontos homólogos implementado no aplicativo Socet Set não é inteiramente adequada para a geração de pontos correspondentes às elevações contidas no terreno, a menos que se desenvolva um algoritmo para correção das perturbações causadas no MNE, como foi delineado na seção 3.7.

4.3 Descrição e Análise da Ferramenta de Extração Semi-Automática de Edificações de Interesse

A figura 4.6 será utilizada para identificar a localização das edificações de interesse que serão analisadas pela ferramenta implementada neste trabalho.

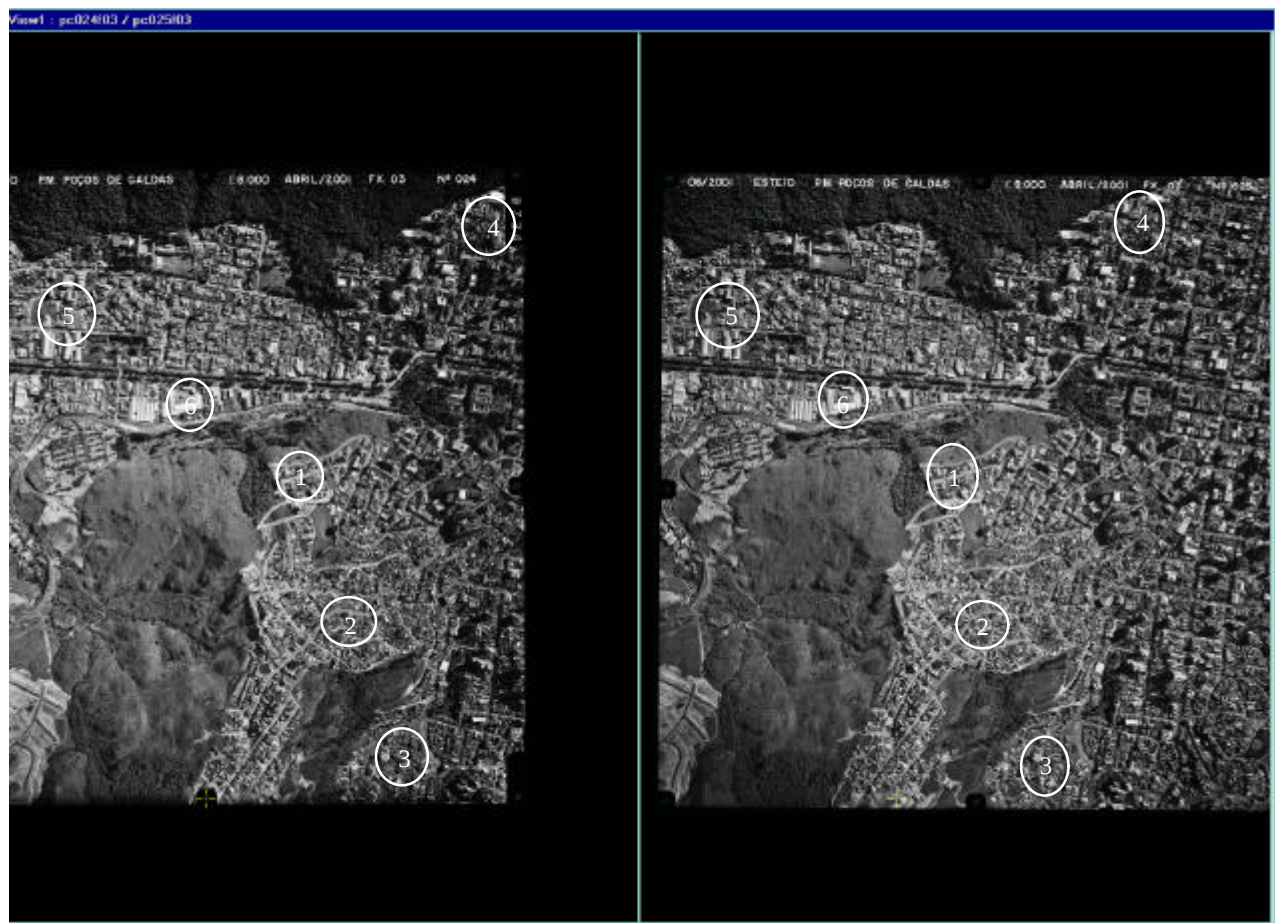


Figura 4.6 – Imagens com sobreposição da cidade de Poços de Caldas e localização das edificações de interesse.

Para a extração semi-automática de EI foi desenvolvida uma ferramenta utilizando-se a linguagem de programação C++ Builder, versão 4.0 da *Borland*, sendo implementadas todas as rotinas em C ANSI, a fim de que posteriormente, todo o código implementado possa ser utilizado no sistema Socet Set. A ferramenta oferece 3 menus, sendo um destinado à entrada da imagem original, fornecimento do arquivo ASCII dos pontos de elevação gerados e arquivo de altitudes da EI. Um outro menu oferece ao operador a possibilidade de entrada dos arquivos: parâmetros da orientação exterior da fotografia correspondente; e dos parâmetros da transformação afim e um menu opcional onde o operador pode

configurar o tamanho da janela de recorte, dependendo do tamanho da edificação de interesse.

Os arquivos de altitude da edificação contêm as informações de altitude do topo e da base da EI (processo necessário não somente para a determinação de um limiar por critério de porcentagem, mas também pelo fato de indicar a EI, caso a mesma se encontre posicionada na vizinhança de outras edificações).

O arquivo de orientação exterior é necessário para a projeção dos pontos do MNE contidos no espaço objeto, gerados pelo aplicativo Socet Set, para o espaço imagem (equação 4.1) e posteriormente para o espaço de tela (equação 4.3), utilizando-se os parâmetros da transformação afim obtidos na orientação interior da imagem (dados pelo arquivo *.sup) no Socet Set.

$$\begin{aligned} x_f &= -f \frac{r_{11} * (E - X_0) + r_{12} * (N - Y_0) + r_{13} * (H - Z_0)}{r_{31} * (E - X_0) + r_{32} * (N - Y_0) + r_{33} * (H - Z_0)} \\ y_f &= -f \frac{r_{21} * (E - X_0) + r_{22} * (N - Y_0) + r_{23} * (H - Z_0)}{r_{31} * (E - X_0) + r_{32} * (N - Y_0) + r_{33} * (H - Z_0)} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Onde,

- ✓ r_{ij} , $1 \leq i \leq 3$ e $1 \leq j \leq 3$: são os elementos da matriz de rotação R, função de κ , ϕ , ϖ . A matriz R é dada pela equação 4.2;
- ✓ x_f, y_f : coordenadas fotogramétricas;
- ✓ f : distância focal;
- ✓ E, N, H : coordenadas do MNE gerado, no espaço objeto; e
- ✓ X_0, Y_0, Z_0 : coordenadas do C.P..

$$R = \begin{bmatrix} \cos j * \cos \hat{\epsilon} & -\cos j * \sin \hat{\epsilon} & \sin j \\ \cos \hat{\iota} * \sin \hat{\epsilon} + \sin \hat{\iota} * \sin j * \cos \hat{\epsilon} & \cos \hat{\iota} * \cos \hat{\epsilon} - \sin \hat{\iota} * \sin j * \sin \hat{\epsilon} & -\sin \hat{\iota} * \cos j \\ \sin \hat{\iota} * \sin \hat{\epsilon} - \cos \hat{\iota} * \sin j * \cos \hat{\epsilon} & \sin \hat{\iota} * \cos \hat{\epsilon} + \cos \hat{\iota} * \sin j * \sin \hat{\epsilon} & \cos \hat{\iota} * \cos j \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned}x_p &= a1 * x_f + a2 * y_f + \Delta x \\y_p &= b1 * x_f + b2 * y_f + \Delta y\end{aligned}\tag{4.3}$$

Onde,

- ✓ x_p, y_p : coordenadas de tela; e
- ✓ $a1, a2, b1, b2, \Delta x, \Delta y$: parâmetros da transformação afim.

Abaixo serão apresentados os resultados dos experimentos realizados com a Ferramenta para Extração Semi-Automática de Edificações (FESA), utilizando o MNE como canal adicional para eliminação de linhas consideradas insignificantes, bem como uma análise de ZSC (Zonas Sem Correspondência) relacionadas ao deslocamento devido ao relevo, sombras e altura do objeto.

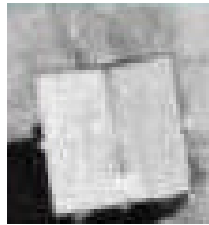


Figura 4.7 – Recorte da imagem que contém a edificação de interesse.

Na figura 4.7, tem-se a imagem original, visualizando-se uma edificação que pode ser considerada como uma situação ideal para a extração semi-automática de edificações, ou seja, sem presença de árvores, localizada próxima ao nadir (figura 4.6, posição 6), não adjacente à nenhuma outra edificação, sendo o único problema a presença de sombra (influenciando no comportamento do MNE). A ferramenta possui um campo onde o operador determina o percentual que definirá as altitudes próximas ao topo da edificação (70%, por exemplo). A figura 4.8 apresenta um esquema gráfico da posição da edificação numa fotografia 23x23 cm, considerando um exagero de escala para uma melhor visualização do problema.

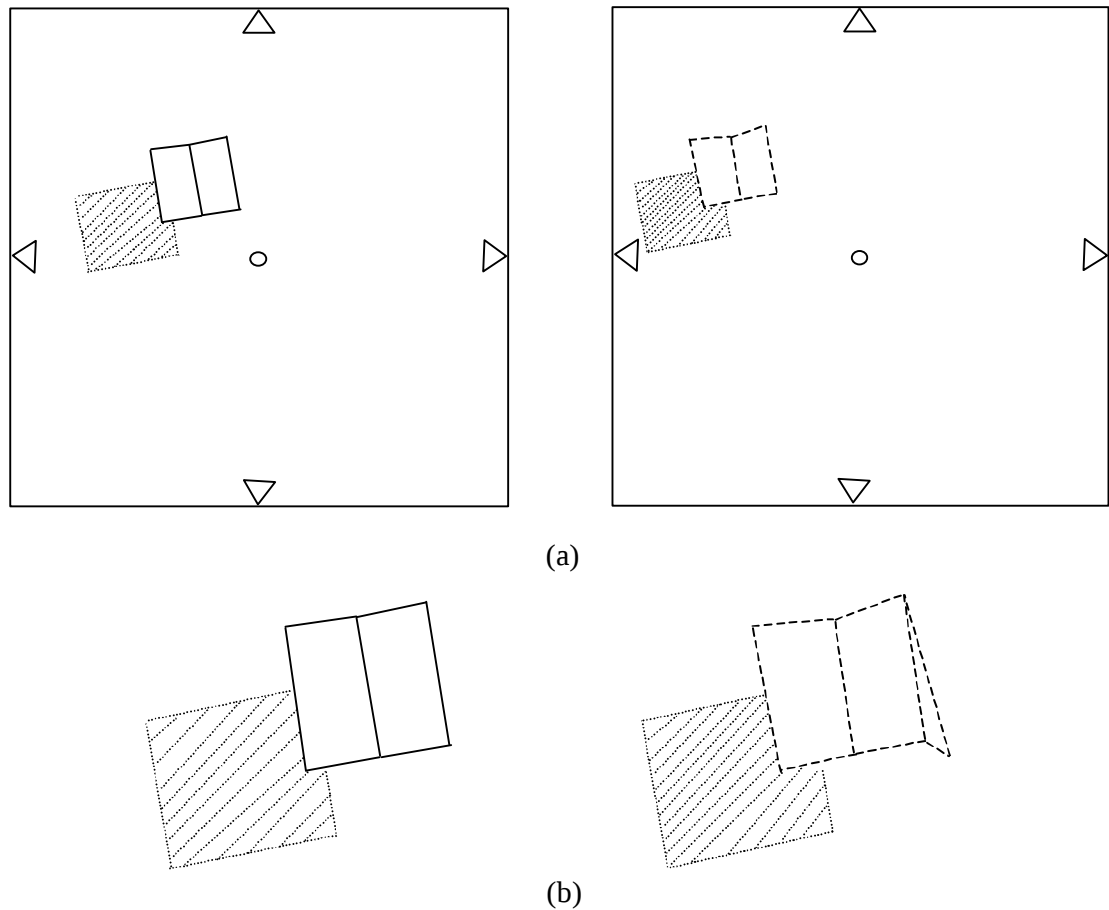


Figura 4.8 – (a) Posição da edificação numa fotografia 23x23 cm; (b) Edificações em ambas as imagens do estéreo-par.

Nota-se na figura 4.9a, que ocorre uma perturbação no MNE causada pela sombra, discutido no estudo de ZSC, no capítulo 3 (seção 3.7). Isto pode ser visualizado na figura 4.9b, notando-se o delineamento razoável das bordas do MNE gerado e convertido numa imagem em tons de cinza, ao longo das retas que compõem o topo, falhando apenas na região onde o algoritmo de geração automática de Modelos interpola os pontos que falharam na correlação (pontos de sombra), atribuindo a mesma altitude do topo da edificação à parte da sombra.

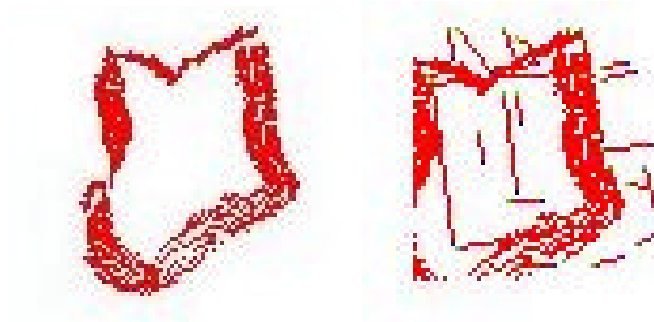


Figura 4.9 – (a) Bordas do MNE gerado; (b) Bordas sobrepostas à EI recortada.

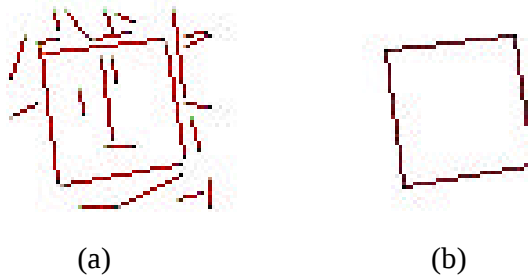


Figura 4.10 – (a) Vetores extraídos no processo de extração de feições; (b) Zoom das retas que compõem o topo da EI.

A figura 4.10a mostra as retas extraídas do processo de extração de feições (fluxo de etapas de extração automática). O resultado obtido após a utilização do MNE (figura 4.9a) para eliminação de LI's é apresentado na figura 4.10b. Analisando-se visualmente o resultado obtido, pode-se afirmar que as retas mantidas no processamento (4 retas significativas) são aquelas que realmente definem o topo da edificação.



Figura 4.11 – (a) Edificação de interesse; (b) Imagem recortada.

Na figura 4.11a, tem-se a imagem original de uma edificação localizada na posição 5 da figura 4.6. A edificação de interesse é uma edificação alta (10 metros de altura), com objetos adjacentes e com uma estrutura um pouco mais complexa que a edificação apresentada na figura 4.7 (telhado de duas águas e muros). Nota-se que existe deslocamento devido ao relevo e sombra projetada no terreno. Esta edificação está localizada mais ao NO (Noroeste) do nadir. A figura 4.12 apresenta um esquema gráfico da posição da edificação numa fotografia 23x23 cm.

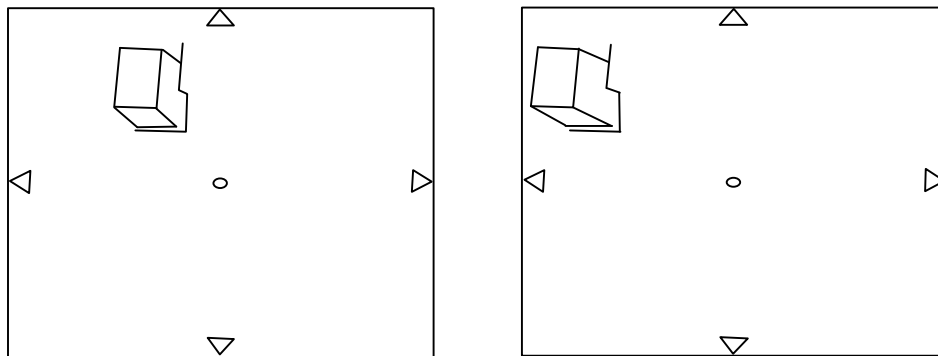


Figura 4.12 – Posição da edificação numa fotografia 23x23 cm.

Na figura 4.13a, verifica-se visualmente uma perturbação no MNE causada pelo deslocamento devido ao relevo. Na figura 4.13b, nota-se pontos do MNE sobrepostos à parte lateral da edificação, bem como pontos sobrepostos à sombra e também pouca definição das bordas.

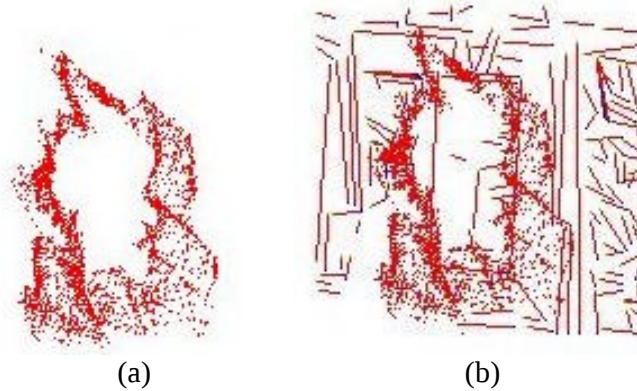


Figura 4.13 – (a) Bordas do MNE gerado; (b) Bordas sobrepostas à EI recortada.

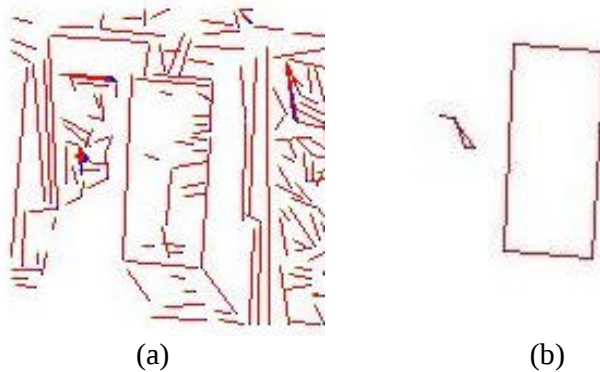


Figura 4.14 – (a) Vetores extraídos; (b) Resultado da operação realizada (zoom das retas significativas extraídas).

Na figura 4.14a, verifica-se as retas extraídas pelo processo de extração de edificações. Utilizando-se o processo de eliminação por votação são extraídas 4 retas significativas, permanecendo no processo algumas retas (lado esquerdo da figura 4.14b) que não definem o topo da edificação. Isto pode ser explicado pelo

fato da ferramenta de geração automática de Modelos de Elevações ter modelado a oclusão por sombra, representando uma falsa medida para estes pontos. Neste caso, uma operação interativa torna-se necessária apenas para editar (apagar) as retas consideradas insignificantes.



Figura 4.15 – Edificação de interesse.

Na figura 4.15, tem-se a EI mostrando uma edificação localizada nas proximidades da posição 4 da figura 4.6. Neste experimento, é testado uma edificação com 5 metros de altura, que projeta bastante sombra no terreno, com vegetações ao seu redor e muitos detalhes, como por exemplo seu telhado de duas águas com caneletas adjacentes, muros, entre outros detalhes. Esta edificação está localizada mais ao NE (Nordeste) do nadir.

Na figura 4.16a, verifica-se visualmente que foram modeladas tanto a EI, quanto as vegetações. Nota-se também que existe uma perturbação no MNE caracterizada pelo deslocamento devido ao relevo (figura 4.16b), pois existem pontos representados pelas laterais da edificação, assim como visto na figura 4.13b.

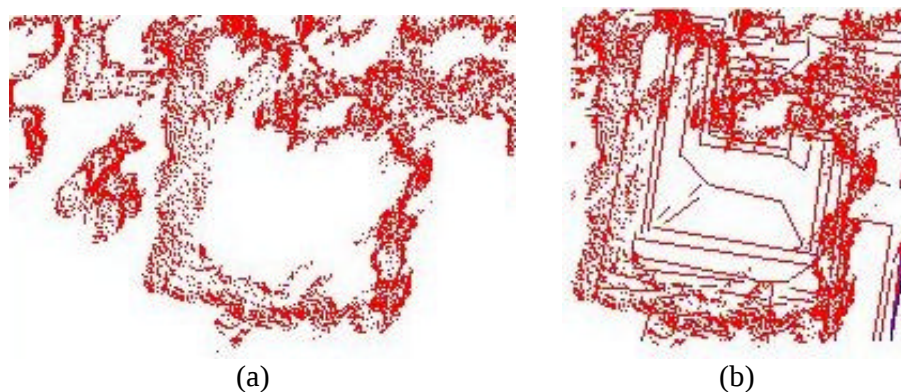


Figura 4.16 – (a) Bordas do MNE gerado com P_L de 100%; (b) Bordas sobrepostas à EI.

Neste experimento, a sombra projetada não é modelada (como nos casos anteriores), pois a base da EI foi correlacionada pelo algoritmo de correlação e, com isto os pontos de sombra interpolados não afetam a EI modelada (figura 4.17b).

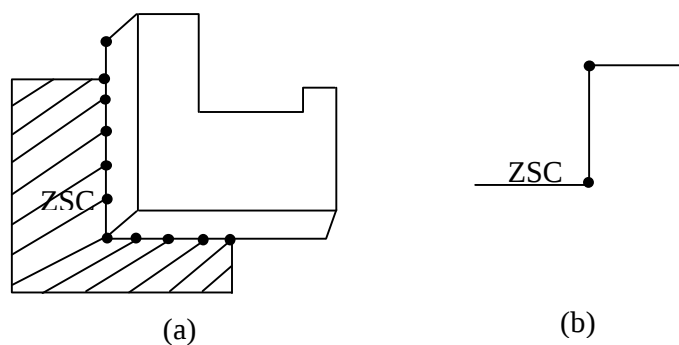


Figura 4.17 – (a) Pontos correlacionados e ZSC; (b) Perfil da EI mostrando zonas com e sem correspondência.

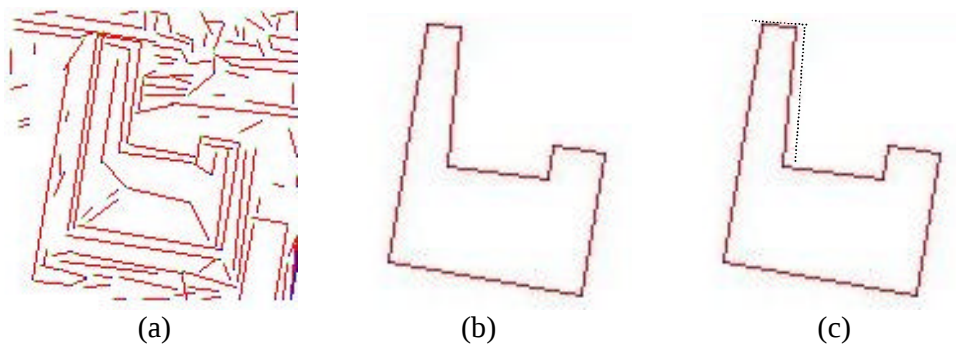


Figura 4.18 – (a) Vetores extraídos; (b) Retas significativas; (c) Zoom das retas significativas extraídas.

Na figura 4.18a, são mostradas as retas extraídas do processo de extração de edificações (143 retas extraídas). Na figura 4.18b, são extraídas 8 retas consideradas significativas, utilizando-se o processo de eliminação de LI's por votação. Na figura 4.18c, nota-se que uma das retas que define o topo da EI (linha pontilhada) foi eliminada do processo. Isto pode ser explicado pelo fato de que, na etapa de fechamento de polígonos, o algoritmo elimina retas que não estão conectadas com, no mínimo, duas outras retas. Neste caso, provavelmente a reta eliminada não fazia conexão com pelo menos duas retas. Com isto, torna-se necessária uma interação do operador com a ferramenta, para adicionar a reta eliminada do processo.

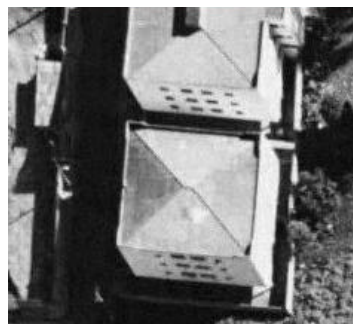


Figura 4.19 – Imagem original e edificação de interesse.

A edificação apresentada na figura 4.19 está localizada nas proximidades da posição 5 da figura 4.6. Como pode ser visto na figura 4.20 a EI possui uma estrutura complexa, com telhado de 4 águas, com uma proteção (platibanda) ao longo do limite do telhado, além de ser adjacente à uma outra edificação com a mesma altura.

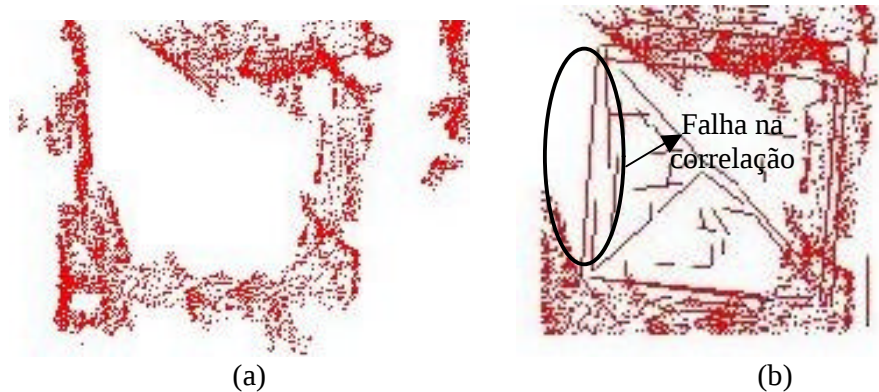


Figura 4.20 – (a) Bordas do MNE gerado com limiar de 70%; (b) Bordas sobrepostas à EI.

Na figura 4.20a, percebe-se que o MNE foi modelado com a perturbação de deslocamento devido ao relevo, bem como a edificação adjacente. Verifica-se visualmente na figura 4.20b, que ocorre uma falha na geração do MNE (parte superior esquerdo) que pode ser explicada, provavelmente, pela projeção da sombra no terreno.

Na figura 4.21a é apresentada as retas extraídas no processo de extração de feições (96 retas). Analisando o resultado obtido, pode-se perceber que pelo fato da proteção existente no topo da edificação projetar sombras, ocorrem quebras no alinhamento das bordas (figura 4.21a), detectando bordas falsas. Neste experimento, permanecem 4 retas significativas após o processo de eliminação de LI's (figura 4.21b) e outras 4 retas que necessitarão de alguma interação do operador com a ferramenta para edição (figura 4.21c).

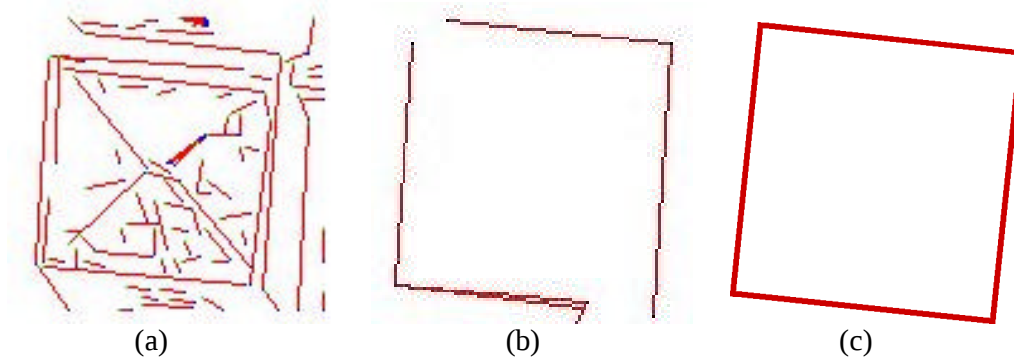


Figura 4.21 – (a) Retas extraídas; (b) Retas extraídas após o processo de eliminação de LI's; (c) Retas significativas editadas.

Na figura 4.22, a EI está localizada próxima à região do nadir (figura 4.6, ponto 1). Verifica-se na imagem, que a edificação de interesse possui uma estrutura bastante complexa, com telhado de quatro águas, bem como uma pequena estrutura no telhado na parte traseira da edificação e também alguns pequenos detalhes em seu cume. Esta edificação possui 3 metros de altura, não sendo considerada uma edificação alta.



Figura 4.22 – Edificação com estrutura complexa.

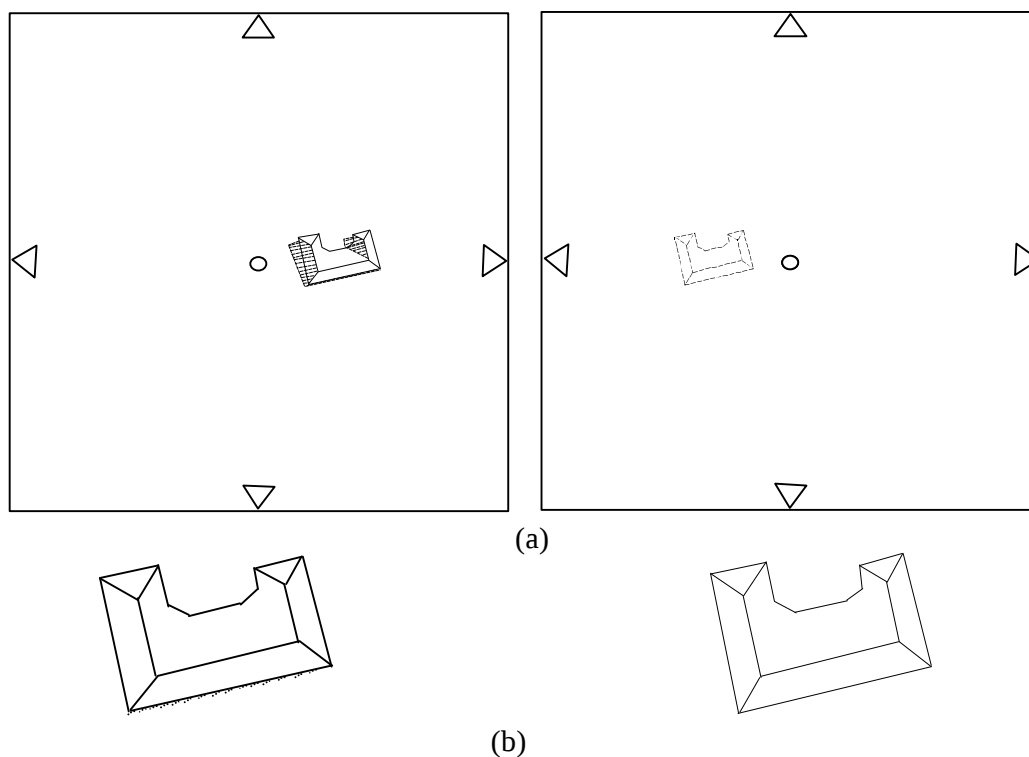


Figura 4.23 – (a) Posição da edificação numa fotografia 23x23 cm; (b)
Edificações em ambas as imagens do estéreo-par.

Na figura 4.24a, percebe-se visualmente que o MNE foi modelado corretamente não sofrendo nenhuma das perturbações discutidas anteriormente, mas aparentemente o algoritmo adaptativo suaviza o MNE gerado, bem como apresenta falhas na correlação de alguns pontos (figura 4.27b), por não ter sido implementado para este tipo de tarefa.

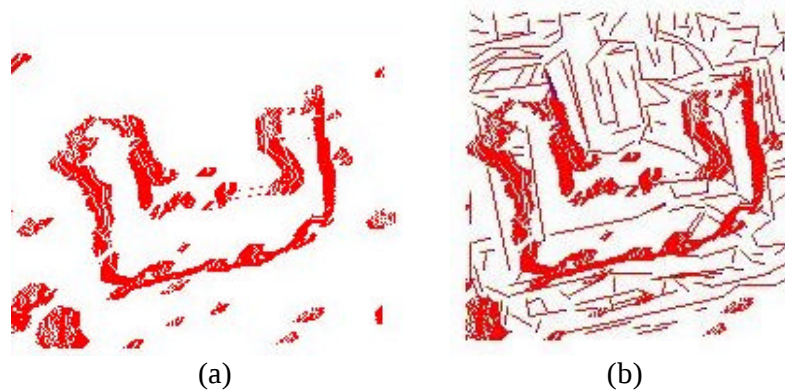


Figura 4.24 – (a) Bordas do MNE gerado; (b) Bordas sobrepostas à EI.

A figura 4.25 apresenta os resultados obtidos com a ferramenta de extração semi-automática de edificações de interesse.

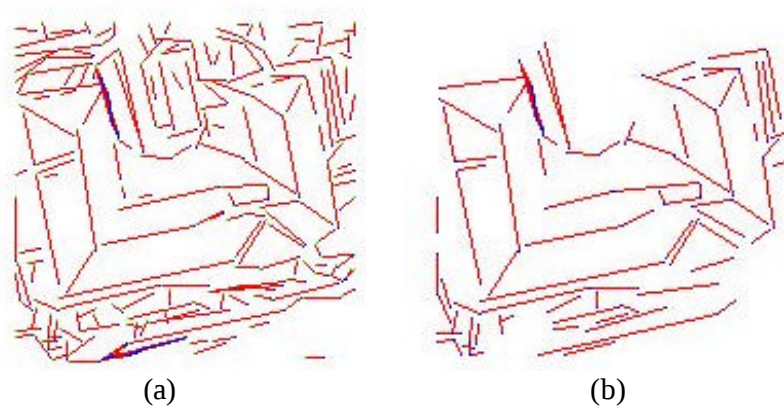


Figura 4.25 – (a) Retas extraídas do processo de extração de feições; (b) Retas significativas.

Analisando-se a figura 4.25a, não se pode considerar o resultado obtido satisfatório, mesmo porque a EI possui uma estrutura muito complexa e também a sombra projetada pela edificação provoca quebras no alinhamento da borda no processo de extração (figura 4.25b).

O detalhe arquitetônico na parte traseira da edificação também interrompe o segmento da borda no processo de extração. A presença de árvores, com mesma altura da EI faz, com que sejam mantidas retas que não pertencem à EI, aumentando o esforço operacional (caso o operador realize um trabalho de edição na estrutura).

No caso da presença de estruturas muito complexas, é necessário que o operador realize manualmente a restituição da EI, pois no algoritmo implementado, após a etapa de fechamento de polígonos é realizada uma varredura nos vetores analisando se existem retas não conectadas com nenhuma outra reta.



Figura 4.26 – Recorte da EI.

A edificação de interesse (figura 4.26) encontra-se posicionada no ponto 2 da figura 4.6 (região SO). Observando a figura 4.27, nota-se que existe um deslocamento radial da edificação em relação ao nadir.

Neste experimento, existe uma edificação vizinha (com 1 metro abaixo do topo da EI). A estrutura desta edificação é simples, possuindo um telhado de 4 águas que, de acordo com os experimentos realizados anteriormente, não é um problema para a eficiência da ferramenta implementada, principalmente por ser utilizado um limiar por critério de porcentagem, para a determinação das altitudes que representam o topo da EI. Esta edificação possui 6 metros de altura, não sendo considerada uma edificação alta.

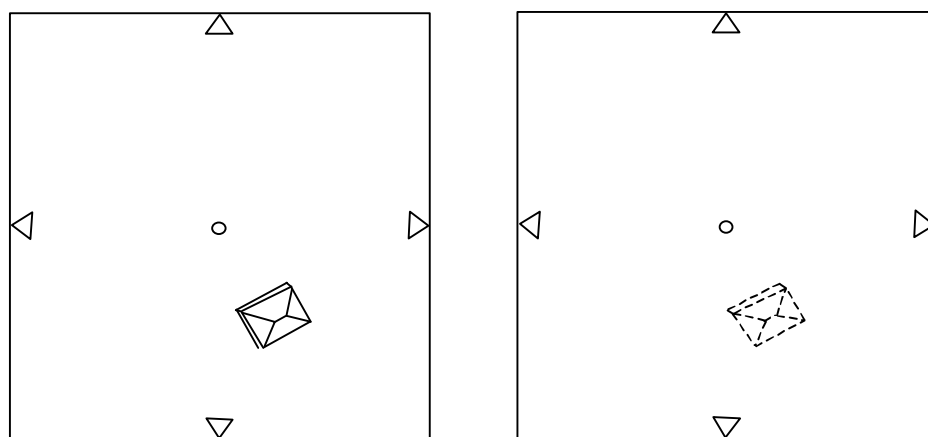


Figura 4.27 – Posição da edificação numa fotografia 23x23 cm (posição SO, ponto 2).

Na figura 4.28a, verifica-se visualmente que o MNE foi modelado adequadamente em relação à forma da EI, sendo também modelada uma parte da edificação vizinha com a mesma altitude dos pontos correspondentes. Nota-se na figura 4.28b que o MNE foi modelado sofrendo a perturbação do deslocamento devido ao relevo.

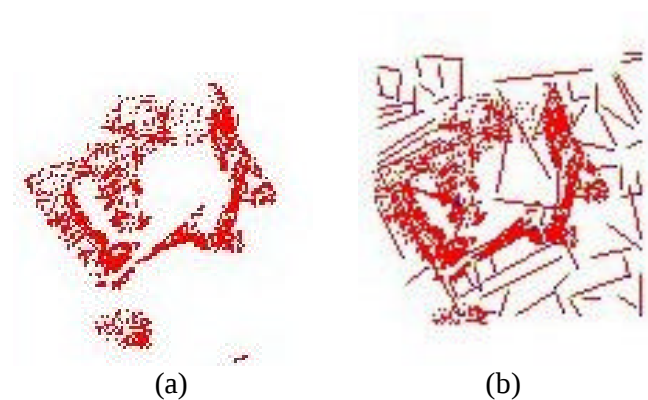


Figura 4.28 – (a) Bordas do MNE gerado com limiar de 60%; (b) Bordas do MNE sobrepostas à EI.

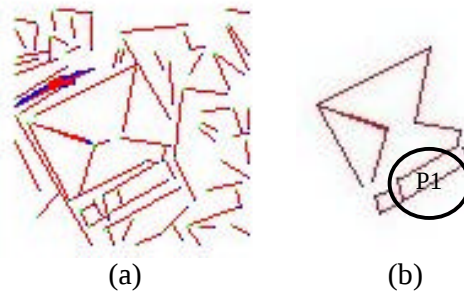


Figura 4.29 – (a) Retas extraídas; Zoom das retas significativas extraídas.

Na figura 4.29a, são apresentadas as retas extraídas no processo de extração de feições. Na figura 4.29b são mostradas retas que permaneceram no processo que utiliza o MNE como um canal adicional para eliminação de LI's. Neste experimento, das 4 retas que definem o topo da EI, apenas 1 não foi mantida no processo (figura 4.29b).

Algumas retas que não definem o topo da edificação também são mantidas no processo. Isto é explicado pelo fato da projeção de uma árvore, que provocou quebra na reta que define a borda do topo, sobre o cume da EI e também pela edificação vizinha possuir uma altura próxima à do topo da EI. Com isto, é necessária uma edição no resultado obtido.



Figura 4.30 – Imagem original e edificação de interesse.

De acordo com a figura 4.31, a EI apresentada na figura 4.30 está localizada no ponto 3 da figura 4.6 (região SO), bastante afastada do nadir. Por isso, nota-se um deslocamento devido ao relevo grande (figura 4.31). Percebe-se que a EI possui uma estrutura bastante simples, mas ocorre a presença de uma pequena projeção de sombra no cume (canto esquerdo da EI). Esta edificação possui telhado de quatro águas com uma altura de 12 metros e projeta sombra sobre o terreno.

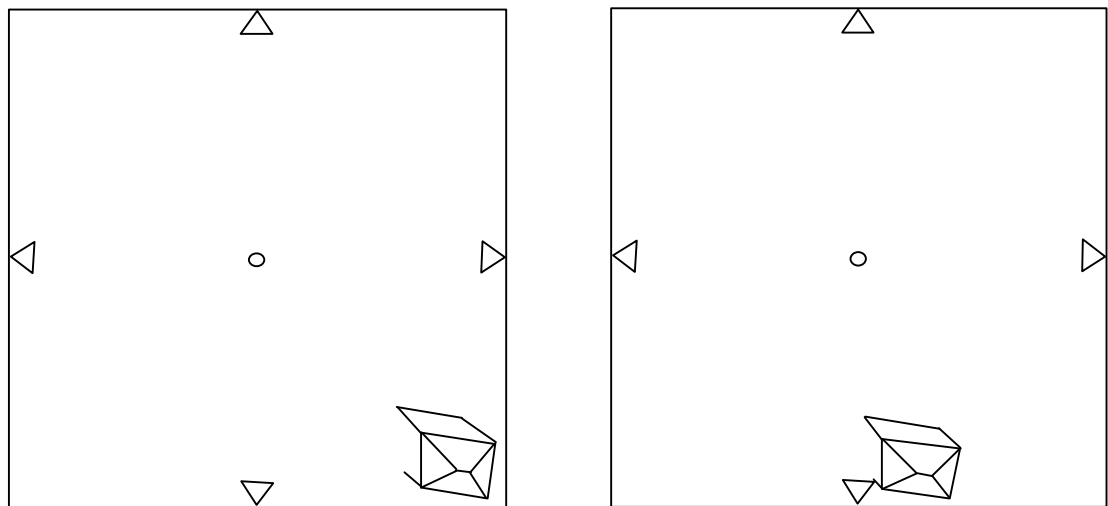


Figura 4.31 – Posição da edificação numa fotografia 23x23 cm (região SO, estrutura com exagero de escala).

Na figura 4.32a, verifica-se visualmente que o MNE foi modelado sofrendo influências do deslocamento devido ao relevo e da sombra projetada no terreno. Apesar disso, como pode ser visto na figura 4.32b, o MNE gerado modela adequadamente o topo da EI.

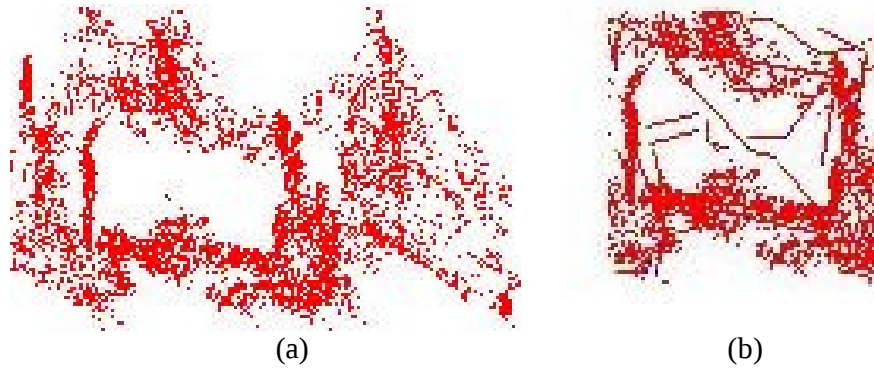


Figura 4.32 – (a) Bordas do MNE gerado com limiar de 45%; (b) Bordas do MNE e EI.

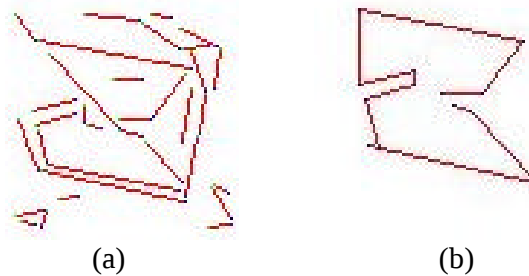


Figura 4.33 – (a) Retas obtidas pelo fluxo de etapas de extração; (b) Retas significativas.

Como pode ser visto na figura 4.33a, o algoritmo de extração de feições detectou bordas falsas (devido a projeção de sombra no topo da EI) fornecendo um alinhamento de borda quebrada. Neste caso, o algoritmo implementado para fechamento de polígonos elimina a borda quebrada, pois irá se conectar apenas com uma única reta.

Neste experimento, das 4 retas que definem o topo da edificação 2 são extraídas, enquanto as demais retas dependem de uma interatividade do operador com a ferramenta para a edição das demais retas necessárias, além da eliminação

das retas que não são significativas e mantiveram-se no processamento (figura 4.33b).

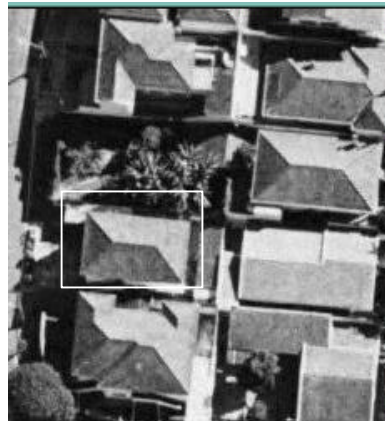


Figura 4.34 – Imagem original e recorte da edificação de interesse.

A EI apresentada 4.34 encontra-se à NE do nadir (figura 4.6). Nota-se que é uma edificação com uma estrutura simples, com telhado de quatro águas, adjacente à árvores e edificações, sendo uma delas com altura maior (edificação na parte inferior da tela). Nota-se também, que a edificação projeta sombra no terreno e uma borda do telhado (superior direita) não aparece na imagem, devido à posição e iluminação do Sol no momento da tomada da fotografia. Esta edificação tem 7 metros de altura, sendo considerada uma edificação alta.

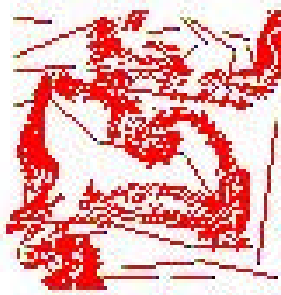


Figura 4.35 – Bordas sobrepostas à edificação de interesse.

Na figura 4.35, percebe-se que o MNE não é modelado adequadamente sofrendo perturbação do deslocamento devido ao relevo e também ocorre falhas na correlação de alguns pontos de elevação.

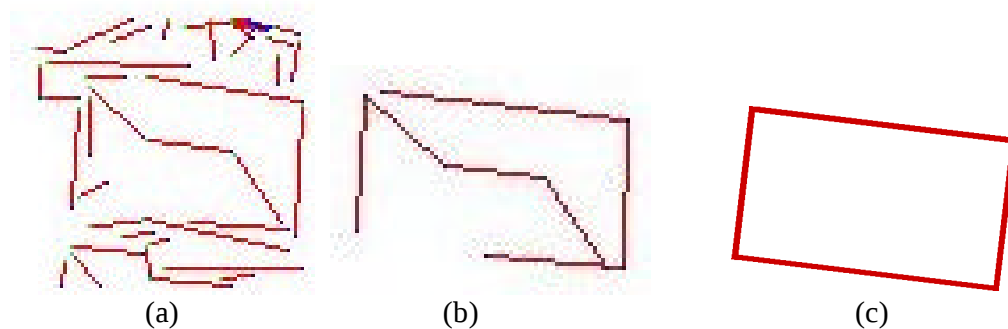


Figura 4.36 – (a) Retas extraídas; (b) Resultado obtido.

Na figura 4.36, pelo fato da EI não ter bordas bem definidas (borda à esquerda), bem como a projeção de sombras das árvores adjacentes à edificação (borda superior, canto esquerdo), o processo de extração de feições não detectou eficientemente as bordas que definem a EI. Com isto, ocorre uma quebra no alinhamento das bordas citadas acima, exigindo do operador a realização de uma pequena edição no resultado obtido, ou seja, neste caso, eliminar linhas interiores e fechar o polígono (figura 4.36c).

Na tabela 4.1 e 4.2, encontram-se dados representativos da diminuição do esforço operacional, considerando o caso proposto neste trabalho e o caso real, utilizando-se o MNE gerado como um canal adicional para eliminar LI's.

Tabela 4.1 – Dados representativos da diminuição do esforço operacional no caso proposto.

Caso Proposto				
Edificação de Interesse	Cantos da EI	Pontos coletados (operador)	Retas extraídas	Percentual de esforço exigido (%)
Figura 4.7	4	1	4	25
Figura 4.11	4	1	4	25
Figura 4.15	8	1	8	12.5
Figura 4.19	4	1	4	25
Figura 4.22	8	1	8	12.5
Figura 4.26	4	1	4	25
Figura 4.30	4	1	4	25
Figura 4.34	4	1	4	25

Tabela 4.2 – Dados representativos da diminuição do esforço operacional em casos reais.

Edificação de Interesse	Cantos da EI	Pontos coletados (operador)	Retas extraídas da EI	Retas a editar	Percentual de esforço exigido (%)
Figura 4.7	4	1	4	-	25
Figura 4.11	4	1	4	7	50
Figura 4.15	8	1	8	2	37.5
Figura 4.19	4	1	3	5	75
Figura 4.22	8	1	8	7	87.5
Figura 4.26	4	1	2	10	75
Figura 4.30	4	1	2	8	75
Figura 4.34	4	1	3	4	75

Na tabela 4.1 foi considerado o esforço (coletar os cantos das edificações) que o operador realizaria para restituir EI's, transformando esse esforço numa análise quantitativa de número de pontos a serem coletados e editados. Pode-se verificar com os números apresentados na tabela 4.2 que, quando se tem uma edificação isolada e bem definida (figura 4.7), o esforço operacional diminuirá em mais de 75% (considerando que o operador não necessitará de coletar os cantos com precisão) em relação ao esforço que ele despenderia para restituir uma EI manualmente. Já no caso da edificação apresentada na figura 4.11, o esforço diminuirá em torno de 50%, considerando que o operador deverá apagar (mais 1 ponto dado) as retas que não definem a EI, mas que foram extraídas.

A edificação apresentada na figura 4.15 mostra que o esforço operacional exigido será de 37.5%. Ao contrário do experimento anterior, apesar do operador ter que coletar mais 2 cantos para editar a EI, como o número de cantos a ser coletado deveria ser maior numa restituição manual (8 cantos), o resultado obtido, neste caso, ainda favorece a metodologia proposta. Isto porque a edição/eliminação interativa é menos demorada e exige menor precisão na pontaria, do que a definição de um canto.

No caso das edificações apresentadas nas figuras 4.19, 4.26, 4.30 e 4.34, o esforço operacional exigido será de 75%. Neste caso, o operador deverá coletar mais cantos da EI e apagar retas falsas.

Na tabela 4.2, a edificação apresentada pela figura 4.22, indica que, neste caso, é mais viável o operador restituir a EI manualmente, pois é exigido um esforço operacional em torno de 90%, pois das 8 retas que definem a EI, apenas uma foi extraída corretamente.

Analisando os dados representativos da tabela 4.2, no caso de uma extração semi-automática de edificações de interesse, onde o operador necessite coletar 1 ponto semente no centro da EI, afirma-se que a metodologia utilizada é válida, pois a interação é mínima, porém necessita-se de um considerável melhoramento no processo e principalmente na modelagem das elevações.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Este trabalho apresentou um fluxo de etapas para extração de feições e o resultado de testes realizados com dados reais aplicados com a ferramenta desenvolvida para extração semi-automática de edificações de interesse, utilizando o MNE como um canal adicional para eliminação de linhas consideradas insignificantes.

Para elaboração de um fluxo de etapas para extração automática de feições foram realizados testes com os diferentes métodos utilizados nas etapas que utilizam Processamento Digital de Imagens (suavização, detecção de bordas, limiarização e afinamento). Verifica-se, nos experimentos realizados com a Ferramenta de Extração Semi-Automática de Edificações (FESA) que, definir um fluxo de etapas robusto é muito complicado, pois em situações reais de trabalho é difícil controlar os fatores naturais (iluminação etc), principalmente a presença de sombras e árvores, projetadas sobre as EI.

Como já descrito anteriormente, a proposta desta pesquisa é trabalhar com uma área de estudo restrita à apenas uma EI, que possui seu centro de massa aproximado localizado no centro da imagem recortada pelo operador. Para a avaliação da metodologia proposta (eliminação de LI's por votação) foram utilizadas imagens em tons de cinza que representa a EI (imagem recortada) e uma imagem em tons de cinza das regiões de alta frequência do MNE (hipótese da pesquisa), gerado automaticamente pelo sistema Socet Set.

Para a utilização destas duas classes de problemas são identificados:

- ✓ Problemas relacionados com a imagem em tons de cinza da EI; e

- ✓ Problemas relacionados com a imagem em tons de cinza do MNE gerado.

O maior problema relacionado com extração de feições nas imagens em tons de cinza é a presença de sombras e árvores. Neste caso, a presença de sombras e árvores (que cobrem a estrutura das edificações), faz com que o algoritmo detecte falsas bordas, e também quebre as retas que definem o topo da EI.

No caso de presença de sombras, a melhor solução seria a implementação de algoritmos de reconhecimento de formas. Já para a presença de árvores, uma classificação na imagem (utilizando cores e/ou textura), separando os objetos (vegetação e edificação), seria a solução mais conveniente para o problema.

Na metodologia apresentada, utiliza-se as regiões de alta frequência do MNE como um canal adicional para eliminar LI's por um processo de votação. De acordo com experimentos realizados, nota-se que o algoritmo de correlação automática do aplicativo Socet Set, é muito deficiente na modelagem de Elevações (árvores e edificações), pois sofre perturbações no comportamento do MNE gerado, não sendo considerado adequado para a solução do problema. Essas perturbações descritas no capítulo 3 (seção 3.7), são caracterizadas principalmente por:

- ✓ Deslocamento devido ao relevo;
- ✓ Sombras;
- ✓ Altura da EI; e
- ✓ Falha na correlação dos pontos para a geração do MNE. Com isto, ocorre uma interpolação nestes pontos críticos, deformando o Modelo de elevação.

O deslocamento devido ao relevo pode ser corrigido utilizando-se a equação (3.13) apresentada no capítulo 3 (seção 3.7), considerando a direção do deslocamento dada em relação à posição da EI na imagem em tons de cinza. Quanto à falha na correlação automática de imagens pode-se implementar um

algoritmo de correlação que não faça a interpolação de pontos considerados críticos (pontos que definem as sombras, por exemplo), modelando apenas pontos que definem a EI.

De modo geral, os experimentos realizados apresentaram resultados satisfatórios, principalmente quando se tem EI isoladas. Em alguns casos é necessário equalizar o histograma da imagem, para melhorar a eficiência do algoritmo de extração de feições, bem como uma maior interação do operador com a ferramenta.

Com isto, verificou-se que processo de extração de feições é uma tarefa complexa, consistindo de diferentes etapas tais como reconhecimento, computação dos atributos das feições, agrupamento, estruturação, modelamento geométrico e geração de hipóteses, bem como a verificação das mesmas. Tornar este processo automático é uma tarefa minuciosa e complicada, exigindo a integração de todas as informações possíveis de se obter. A existência dos variados tipos de estruturas e formas de edificações, oclusões, efeitos de sombras, deslocamento devido ao relevo, ruídos, baixo contraste, entre outros fatores, torna a tarefa ainda mais difícil. Para o funcionamento robusto de uma ferramenta para extração semi-automática de edificações com análise do MNE, é necessária a integração de mais descritores topológicos, geométricos e radiométricos.

5.2 Recomendações

De acordo com a análise dos experimentos realizados, tanto em relação à avaliação da eficiência das ferramentas de extração semi-automática de feições do sistema Socet Set, quanto da ferramenta implementada recomenda-se:

- ✓ Implementar um algoritmo que faça o reconhecimento de formas e reestruturação da edificação de interesse (geração de hipóteses), bem como a definição de mais descritores (análise de textura, cor etc), pelo fato das edificações não possuírem nem tonalidade nem formas padronizadas;

- ✓ Implementar um algoritmo que realize uma classificação de objetos naturais (vegetação) e objetos antrópicos (edificações), para solucionar o problema de obstruções (acarretados pela projeção de árvores, comum em países tropicais) das bordas que definem as edificações. Para isto, pode-se utilizar o histograma de direções da EI e da vegetação, gerado a partir das imagens em tons de cinza. Neste caso, é realizada uma varredura por uma janela de pesquisa gerando histogramas de direções em cada pedaço da imagem varrida. A partir dos histogramas gerados, os objetos são classificados;
- ✓ Corrigir as perturbações (ZSC) causadas no comportamento do MNE gerado por correlação automática. O problema de deslocamento devido ao relevo pode ser corrigido com o auxílio de uma técnica de morfologia matemática (erosão), onde os pontos pertencentes à base da EI são deslocados até a posição do topo da edificação, sendo a erosão dada em função do deslocamento radial da base em relação ao topo. No caso do problema com a projeção de sombras, pode-se implementar um algoritmo de correlação automática de imagens para gerar o MNE, de forma que não sejam interpolados os pontos que definem as sombras projetadas pelas EI's (gerando Modelos falsos) e que não suavize o Modelo de Elevações;
- ✓ Utilizar sensores a laser aerotransportado que adquirem dados digitais de elevação do Terreno e das Elevações nele existentes. Nestes casos, problemas de ZSC não ocorrem, pois as medidas são feitas diretamente no terreno. O problema de classificação de objetos também pode ser solucionado, pois estes sensores possuem recursos de medição da primeira e última reflexão, permitindo, num processamento posterior, distinguir os objetos medidos (classificação); e
- ✓ Integrar a ferramenta desenvolvida ao sistema Socet Set, contribuindo com o conjunto de ferramentas existentes para extração semi-automática de feições existente no aplicativo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E BIBLIOGRAFIA

Referências Bibliográficas

AGOURIS, P. e SCHENK, T., Multiple Image Matching. ISPRS Commission III, pp. 802-807, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING Digital Photogrammetry: An Addendum to the Manual of Photogrammetry. ASPRS, USA, 1979.

ANDRADE, J. B., Fotogrametria. Curitiba, Editora SBEE, pp. 245, 1998.

ARTERO, A. O., Técnicas Para a Extração Automática de Feições Retas em Imagens Digitais. Dissertação de Mestrado –Universidade Estadual Paulista, FCT, Presidente Prudente, pp. 117, 1999.

ATKINSON, K. B., Range and Vision. University College London, pp. 219-226, 1996.

BARBOSA, R. L., Geração de Modelo Digital do Terreno por Aproximações Sucessivas utilizando Câmaras Digitais de Pequeno Formato. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, FCT, Presidente Prudente, Presidente Prudente, pp. 96, 1999.

BURROUGH, P. A., Digital Elevation Models: principles of geographical information system for land resources assessment monographs on soil and resources survey. Oxford, 1986.

FRITSCH, D. e PFANNENSTEIN, A., Integration of DTM data structures into GIS data Models. America Society Photogrammetry & Remote Sensing, Commission III, pp. 497-503, 1992.

GALO, M. e TOZZI, C. L., Combining Operators To Sub-Pixel Corner Estimation. Artigo não publicado.

GEMAEL, C., Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas. Curitiba, Editora UFPR, 1994.

GONZALEZ, RAFAEL C. e WOODS, R. E., Processamento de Imagens Digitais, Tradução: Roberto Marcondes César Junior e Luciano da Fontoura Costa. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, pp. 509, 2000.

HAALA, N. e BRENNER C., Interpretation of Urban Surface Models Using 2D Building Information. Computer Vision and Image Understanding. Vol. 72, n. 2, November, pp. 204-214, 1999.

NEVATIA, R.; HUERTAS, A.; KIM, Z., The MURI Project for Rapid Feature Extraction in Urban Areas. IAPRS. Vol. 32, Part 3-2W5 "Automatic Extraction of GIS Objects from Digital Imagery". Munchen, September, 1999.

PETRIE, G. e KENNIE, T. J. M., Terrain Modeling in Surveying and Civil Engineering. Caithness: Whittles, 1990.

SCHENK, A. F., Automatic generation of DEM's. Digital photogrammetry: in addendum to manual of photogrammetry, America Society Photogrammetry & Remote Sensing, pp. 145-150, 1996.

SHARIF, M. e MAKAROVIC, B., Optmizing progressive and composite sampling for DTMs. ITC Journal, n. 2, pp. 104-111, 1989.

TOMMASELLI, A.M.G., Extração Automática de Feições Lineares em Imagens Digitais para Aplicações Cartográficas. Bolsa de Produtividade em Pesquisa-2C, Relatório Técnico do Período de 03/97 a 02/99, Presidente Prudente, 1999.

TOMMASELLI, A. M.G. e SANTOS, D. R., Uma estratégia para extração semi-automática de feições com análise do MNE. Congresso Brasileiro de Cadastro Multifinalitário - COBRAC, pp. 10, 2000.

TOMMASELLI, A. M. G. e TOZZI, C. L., Extração de Linhas Retas em Imagens Digitais, In: Anais do XVI Congresso Brasileiro de Cartografia, Rio de Janeiro, 1993.

USERS' MANUAL, Socet Set version 4.1, 1998.

ZHOU, Y. T.; VENKATESWAR, V.; CHELLAPA, R., Edge Detection and Linear Extracting using a 2D Random Field Model. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. 11, n. 1, 1989.

WOLF, P. R. e DEWITT, B. A., Elements of Photogrammetry: with applications in GIS. 3rd edição, pp. 608, 2000.

Bibliografia

ALMEIDA, J., Ortofoto Digital. Dissertação de Mestrado, Curitiba, 1989.

CHEN, L. e HSU, W., Extraction of Man-Made Buildings In Multispectral Stereoscopic Images. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B3. Amsterdam, 2000.

DAL POZ, A.P. e TOMMASELLI, A.M.G., Strategy to detect ground control in digital images. In: Automatic Target Recognition 8. Proceedings of the SPIE, Vol. 3371, Orlando, pp.436-447, 1998.

DAL POZ, A.P.; TOMMASELLI, A.M.G.; CINTRA, J.P. Relational Matching Applied to Automatic Extraction of Ground Control in Digital Images. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Viena, 1996.

FORSTNER W., Model Based Detection and Location of Houses as Topographic Control Points in Digital Images. 16th ISPRS. Vol. III Kyoto, pp.505-517, 1988.

GATO, H. E. R., Uma Abordagem Semi-Automática para Extração de Feições por Crescimento de Regiões em Imagens Digitais. Presidente Prudente, 2000, 179p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus de Presidente Prudente, Universidade Estadual Paulista.

GULCH, E., Extraction of 3D Objects from Aerial Photographs. In: Proceedings COST UCE ACTION C4 Workshop 'Information Systems and Processes for Urban civil engineering applications', Roma, 1996.

GULCH, E., Application of Semi-Automatic Building Acquisition. In: Automatic extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, ed. By A. Gruen-Basel, Boston, Berlin, Birkhauser, 1997.

NEVATIA, R. e LIN, C., Building Detection and Description from Single Intensity Image. Computer Vision and Image Understanding. Vol. 72, n. 2, November, pp. 101-121, 1998.

PETINATTI, F., Modelagem Digital e Representação Gráfica de Superfícies. Dissertação de Mestrado. Escola politécnica da USP. São Paulo, 1983.

SANTOS, D. R., Avaliação de Técnicas de Extração de Feições numa Empresa de Aerolevantamento. Relatório de Estágio. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. Presidente Prudente. Abril, pp. 30, 2001.

SIEBE E. e KAUFMANN, K., Urban Heights for Radio Planning. GIM International. January, 2001.

TAO, C., An Integrated Approach to Road Centerline Reconstruction using Stereo Image Sequences from a Mobile Mapping System. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Part B3, Viena, pp. 857-862, 1996.

TRINDER, J.C., Extration of Man-Made Features by 3-D Active Contour Models. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Part B3, Viena, pp. 874-879, 1996.

VOHRA, V.K. e DOWMAN, I.J., Automatic Extraction of Large Buildings from High Resolution Satellite Images for Registration with a Map. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Part B3, Viena, pp. 903-908, 1996.

WALKER, A.S., Pratical Automation in Commercial Digital Photogrammetry. Photogrammetric. Record, 15/18, pp. 657-664, 1997.

APÊNDICE A

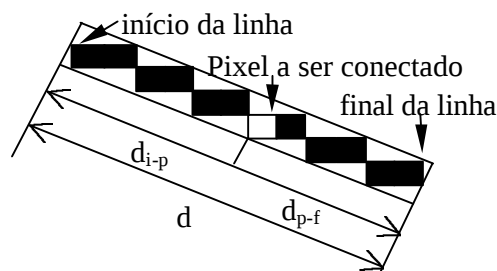
A1 Detalhes das Etapas de Extração de Feições

O apêndice A detalha alguns procedimentos das etapas de conexão e ajustamento de retas do processo de extração de feições, tais como:

- ✓ Determinação dos pixels extremos dos segmentos; e
- ✓ Método Paramétrico modificado.

A1.1 Determinação dos Pixels Extremos dos Segmentos

Um dos resultados indesejáveis do método de conexão e varredura (capítulo 2, seção 2.1.6.1) está em não haver uma forma robusta para estabelecer os pixels início e fim de cada segmento. Uma possível forma de auxiliar esta tarefa, no momento da construção dos segmentos, é utilizar medidas de distância para verificar se o pixel atual deve ser mesmo classificado como final ou inicial da reta. A figura A1.1 mostra o esquema utilizado para resolver este problema.



d_{i-p} é a distância entre o início da linha e o ponto a ser conectado;
 d_{p-f} é a distância entre o pixel a ser conectado e o final da linha;
 d é a distância entre o início e o final da linha.

Figura A1.1 - Esquema utilizado para resolver o problema de quebras de segmentos (Adaptado de Artero, 1999).

Pelo esquema sugerido, caso $d_{i-p} > d$ então o pixel é rotulado e a estrutura da linha recebe suas coordenadas como o fim da linha. Caso $d_{p-f} > d$, o pixel atual é rotulado e a estrutura da linha recebe suas coordenadas como início da linha. Se $d > d_{p-f}$ e $d > d_{i-p}$, então o pixel atual é rotulado, porém os pixels início e fim da reta são mantidos (Artero, 1999).

Um segundo problema que ocorre no método de varredura e rotulação pode ser visualizado na figura A1.2. Percebe-se que, para linhas com uma inclinação entre 0° e 30° , apesar dos pixels constituintes da mesma terem sido detectados com uma mesma direção (na etapa de detecção) e estarem devidamente conectados em uma vizinhança 8, ainda assim o resultado da conexão resulta em um conjunto de pequenas retas, quando a linha deveria ser única.

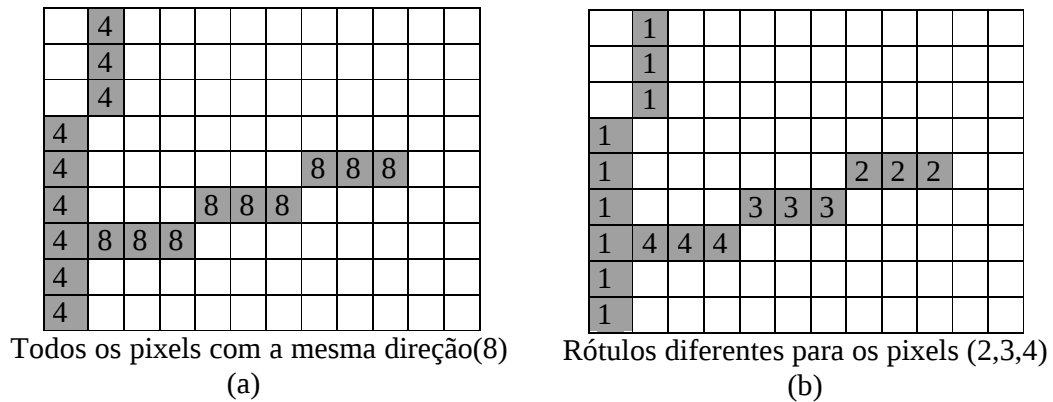


Figura A1.2- (a) Direção dos pixels de uma dada reta e (b) resultado da conexão utilizando o método da varredura e rotulação (rótulos diferentes para pixels com uma mesma direção).

Conforme mostra a figura A1.2a, todos os pixels da borda apresentam a mesma direção, porém, conforme é mostrado na figura A1.2b verifica-se que eles não recebem o mesmo rótulo, provocando uma fragmentação da reta. A figura A1.3 mostra um detalhe dos pixels, seus rótulos e a causa do problema.

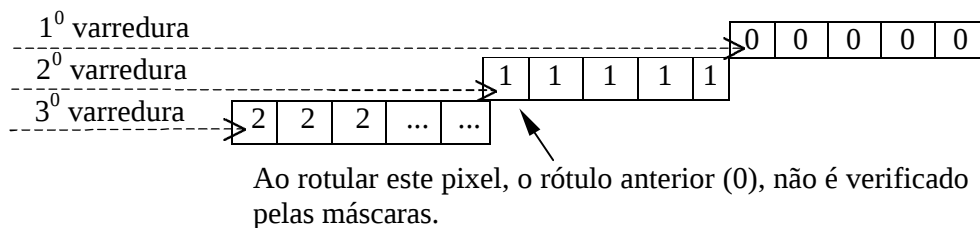


Figura A1.3- Problema que ocorre no método Varredura e Rotulação (Fonte: Artero, 1999).

Uma sugestão para corrigir o problema é sempre verificar se um pixel está sob a ação de 2 rótulos vizinhos, e neste caso, herdar o menor deles, fazendo uma propagação em todos os demais pixels já rotulados com o rótulo atual. Desta forma tem-se o procedimento apresentado na figura A1.4.

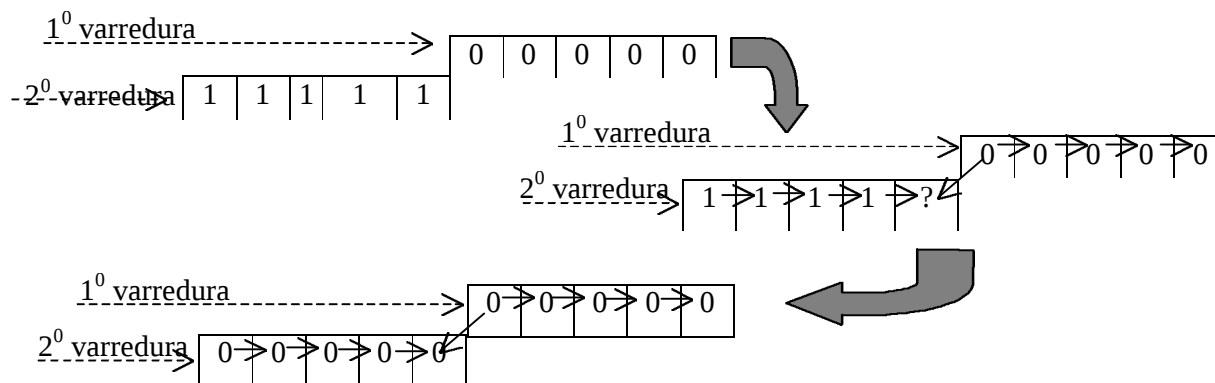


Figura A1.4- Sugestão para a correção do problema no método Varredura e Rotulação (Fonte: Artero, 1999).

Este esquema tem apresentado bons resultados em diversas situações, mas a sua utilização não é imprescindível, pois a etapa de reconexão de segmentos colineares também pode resolver o problema (Artero, 1999).

Mesmo utilizando o esquema apresentado na figura A1.4, alguns segmentos continuam apresentando resultados insatisfatórios na definição de seus pixels extremos. A figura A1.5 mostra o detalhe de um segmento e dos seus pixels

extremos obtidos na etapa de rotulação. Nota-se que os pixels início e fim não se encontram realmente nos extremos do segmento, pois para tal segmento o resultado esperado seria aquele exibido em A1.5b.



Figura A1.5- Localização dos pixels extremos (a) antes e (b) depois da correção.

Uma forma de solucionar o problema apresentado na figura A1.6a, é verificar a condição abaixo:

$$\exists \text{ necessidade se } L < \frac{N}{2} \quad (\text{A1.1})$$

Onde,

L: comprimento da reta;

N: número de pixels que define a reta.

Caso tenha-se um pequeno comprimento de reta para um grande número de pixels, fica claro na equação (A1.1), a necessidade de corrigir o problema apresentado. Com isto, o algoritmo implementado apóia-se na condição de distância entre pixels, definindo os 4 pixels extremos em x e y. Em seguida o algoritmo determina os 2 pixels mais distantes entre os 4 possíveis (Artero, 1999).

A1.2 Ajustamento de Linhas Retas

O método de ajustamento paramétrico, utilizando o Método dos Mínimos Quadrados (Gemael, 1994) apresenta o seguinte modelo matemático:

$$L_a = F(X_a) \quad (\text{A1.2})$$

A equação (A1.3) é o modelo linearizado da equação (A1.2).

$$v = AX + L \quad (A1.3)$$

Sendo,

- v : vetor dos resíduos;
- A : matriz das derivadas parciais das equações em relação aos parâmetros incógnitos;
- X : vetor das correções dos valores aproximados dos parâmetros incógnitos do modelo (a_{ij}); e
- L : vetor das observações.

O vetor das correções dos valores aproximados, ou seja a solução do método é dada por:

$$X = (A^t P A)^{-1} A^t P L \quad (A1.4)$$

$$L = L_0 - L_b \quad (A1.5)$$

Onde,

- L_0 : vetor dos parâmetros aproximados; e
- L_b : vetor das observações.

Neste trabalho, deseja obter a equação das retas que melhor se ajustam aos conjuntos de pixels rotulados na etapa anterior como pertencentes à borda (Artero, 1999). No caso a equação de linhas retas é dada por:

$$y = ax + b \quad (A1.6)$$

Aqui são conhecidos os valores de x e y , no qual deseja-se obter os valores de a e b . A composição da matriz A é dada em função da derivada parcial em relação aos parâmetros:

$${}_n A_u = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial a x_2} & \frac{\partial F}{\partial b} \\ \frac{\partial F}{\partial a x_3} & \frac{\partial F}{\partial b} \\ \frac{\partial F}{\partial a x_n} & \frac{\partial F}{\partial b} \end{bmatrix} \quad (A1.7)$$

A composição do vetor L é dada em função das incógnitas:

$${}_u L_1 = \begin{bmatrix} -y_1 \\ -y_2 \\ \dots \\ -y_n \end{bmatrix} \quad (A1.8)$$

e a matriz peso (P) é definida por:

$$P = \sigma_0^2 \sum_{1_b}^{-1} \quad (A1.9)$$

Sendo,

- σ_0^2 : variância da unidade peso a priori;
- $\sum_{1_b}^{-1}$: matriz covariância dos valores observados.

$$\Sigma_L = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (A1.10)$$

No caso apresentado acima, tem-se um problema quando os valores de y são iguais (retas verticais), onde o sistema não pode ser resolvido, pois a matriz $A^T P A$ não possui uma inversa.

A1.3 Paramétrico Modificado

Uma solução que pode ser utilizada para evitar problemas com retas verticais é dada por Tommaselli (1993). Onde é apresentada uma metodologia para ajustar, pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), os parâmetros da reta na sua forma paramétrica. Inicialmente, ele considera duas formas para essa representação: uma para retas com inclinação aproximadamente horizontais e outra para verticais. A parametrização utilizada para segmentos aproximadamente horizontais é dada por:

$$y = ax + b \quad (A1.11)$$

A outra é utilizada para segmentos aproximadamente verticais (Tommaselli e Tozzi, 1993):

$$x = a'y + b' \quad (A1.12)$$

A figura A1.6 mostra as regiões onde utilizar cada uma destas formas paramétricas para representar as retas.

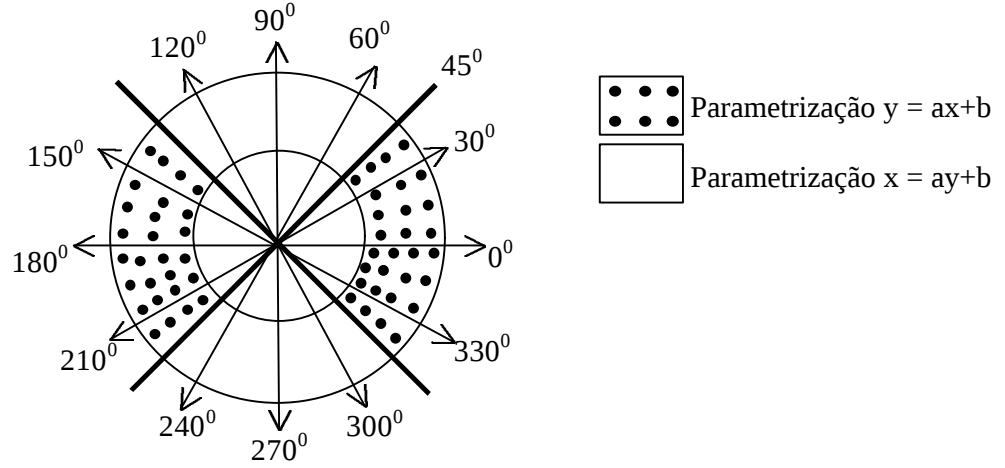


Figura A1.6 - Parametrização utilizada em cada região (Fonte: Artero, 1999).

O cálculo dos parâmetros a, b, a' e c' é dado respectivamente por (Tommaselli, 1993):

$$a = \frac{1}{D} \cdot \left(n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i \right) \quad (\text{A1.13})$$

$$b = \frac{1}{D} \cdot \left(- \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i + \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n y_i \right) \quad (\text{A1.14})$$

$$D = \sum_{i=1}^n x_i^2 n - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad (\text{A1.15})$$

$$a' = \frac{1}{D'} \cdot \left(n \cdot \sum_{i=1}^n y_i x_i - \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (\text{A1.16})$$

$$b' = \frac{1}{D'} \cdot \left(- \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i x_i + \sum_{i=1}^n y_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (\text{A1.17})$$

$$D' = \sum_{i=1}^n y_i^2 n - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \quad (\text{A1.18})$$

onde n é o número de píxeis pertencentes à reta.

As variâncias de a, b, a' e c' são dadas respectivamente por:

$$\sigma_a^2 = \frac{n}{D}, \sigma_b^2 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{D}, \sigma_{a'}^2 = \frac{n}{D'}, \text{ e } \sigma_{b'}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{D'} \quad (\text{A1.19})$$

Como as coordenadas iniciais e finais, utilizadas para ligar as retas encontradas, são valores inteiros (linha e coluna), os pixels extremos não pertencem à reta ajustada por uma fração de pixel (figura A1.7). Para solucionar este problema é necessário calcular as coordenadas dos vértices em valores reais (x_{iR} , y_{iR} e x_{fR} , y_{fR}) que representam a reta e projetar os vértices sobre a reta ajustada.

O cálculo das coordenadas dos vértices da reta baseia-se na intersecção entre a reta ajustada e sua normal passante pelo centro do pixel. Para isto são utilizadas as seguintes equações:

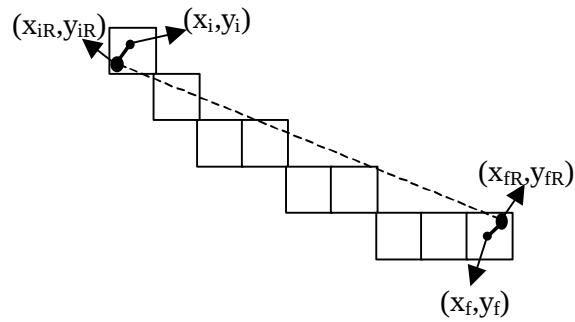
$$\begin{aligned} x_i &= \frac{(B_1C_1 - B_2C_2)}{(A_1B_2 - A_2B_1)} \\ y_i &= \frac{(B_1C_2 - B_2C_1)}{(A_1B_2 - A_2B_1)} \end{aligned} \quad (A1.20)$$

Onde considera-se que as retas estão na forma $Ax + By + C = 0$ e:

$$\begin{array}{ll} A_1 = -a & A_2 = 1 \\ B_1 = 1 & e \quad B_2 = a \\ C_1 = -b & C_2 = -x_f - ay_f \end{array} \quad (A1.21)$$

Para as retas com parametrização $x = ay + b$, os parâmetros são:

$$\begin{array}{ll} A_1 = 1 & A_2 = a \\ B_1 = -a & e \quad B_2 = 1 \\ C_1 = -b & C_2 = -y_f - ax_f \end{array} \quad (A1.22)$$



A1.7 – Pixels em valores inteiros projetados para pixels em valores reais.

Outra possibilidade é calcular os valores ajustados para os pixels extremos da reta.

APÊNDICE B

B1 Formas de Geração de MNE

Existem várias formas de aquisição, organização e armazenamento dos dados para geração de Modelos de Elevação e Terreno. No apêndice B serão tratados detalhes da geração manual, semi-automática e automática de MNE, bem como os variados tipos de armazenamento e organização dos dados.

B1.1 Formas de Aquisição dos Dados

B1.1.1 Manual

A aquisição é considerada analógica quando é feita sem auxílio de ferramentas ou instrumentos mais elaborados, ou seja, quando o operador realiza todo o processo, como por exemplo, a identificação visual dos pontos homólogos sem a utilização de algoritmos que automatizam este processo. As coordenadas XYZ são obtidas utilizando instrumentos que possuem componentes ópticos, tais como: nível, teodolito, estação total e restituidor analógico.

Existem 3 maneiras para adquirir os dados para geração de Modelos:

- Fotogrametria;
- Cartas topográficas; e
- Diretamente no Campo.

Com a Fotogrametria pode-se utilizar instrumentos restituidores analógicos, analíticos ou digitais. A coordenada Z dos pontos é obtida através da paralaxe em x correspondente entre os pontos homólogos.

O operador pode traçar curvas de nível, seguindo os pontos de elevação com a marca flutuante. O operador pode também traçar perfis e a partir do perfil gerado, interpolar as curvas de nível.

Através de cartas topográficas, o operador pode interpolar a coordenada Z a partir das curvas de nível representadas no mapa, tendo as coordenadas explícitas no mesmo, bem como realizar uma digitalização da carta interpolando as coordenadas XY a partir do valor de Z representado pela cota.

Para a coleta de dados realizada diretamente em campo, utiliza-se instrumentos de levantamento topográfico, tais como, GPS (*Global Positioning System*), Estação Total e nível. Com o GPS, o operador pode coletar por meio de um, dois ou mais receptores, as coordenadas XY e h (altitude geométrica), sendo H (altitude ortométrica) obtida com a determinação da informação da ondulação geoidal (N) da região. Com estação total e nível, o operador pode realizar um levantamento geométrico, obtendo as coordenadas XYZ do terreno correspondente em relação a um referencial topográfico local.

A forma de aquisição de dados por meio de cartas é a mais barata, pois além de não exigir operadores especializados não necessita de instrumentos caros, como os restituidores e os receptores GPS. Quanto à precisão, vale dizer que, as altitudes obtidas por meio de nivelamento geométrico têm precisão muito maior que as oriundas de um modelo fotogramétrico e mesmo da altitude geométrica obtida pelo GPS. A figura B1.1 ilustra um diagrama estruturado da entrada de dados após a aquisição dos mesmos.

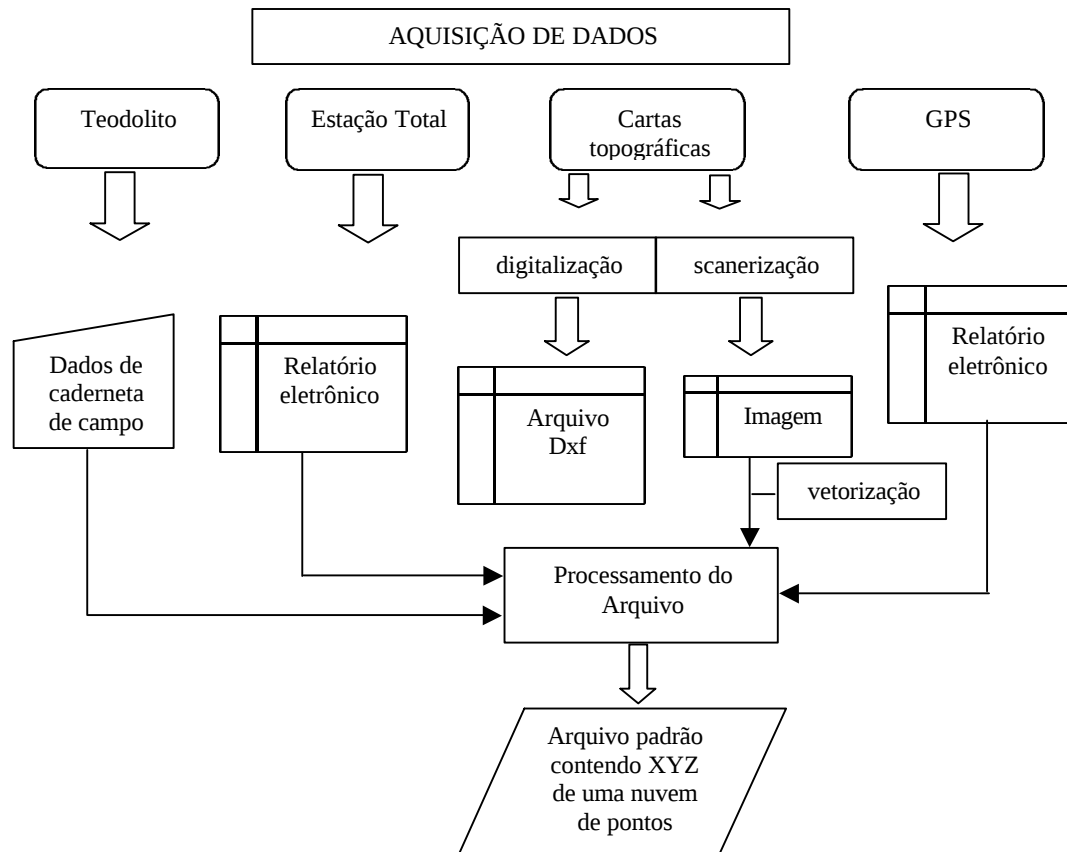


Figura B1.1 – Diagrama estruturado da entrada de dados.

Um dos problemas da abordagem manual é que ela se torna muito exaustiva ao operador. É necessário dedicar muita atenção na identificação dos pontos. O tempo gasto neste processo é muito grande, mas muitas empresas ainda preferem a utilização dos restituidores analógicos para a geração de Modelos de terreno e elevação, principalmente quando se tem uma área bastante homogênea, pois ocorrem falhas nas medidas automáticas dos pontos.

B1.1.2 Semi-Automática

A aquisição semi-automática combina ações do operador com a máquina. Neste caso, o operador fornece os parâmetros que simplificam e aceleram o processo de geração, restringindo a área de atuação do algoritmo.

É necessário mencionar que na imagem digital, geralmente, existem regiões, da própria superfície, bastante homogêneas, enquanto que em outras regiões da mesma imagem as variações dos níveis de cinza são maiores. Nesse caso, a aquisição semi-automática permite um processamento unicamente influenciado pela região.

Para a aquisição de dados de coordenadas XYZ semi-automática, a técnica mais comumente utilizada é a Fotogrametria, sendo feita por meio de restituidores analíticos ou estações digitais (*Digital Photogrammetry Workstation*). Outra técnica muito utilizada é a vetorização de isolinhas (curvas de nível).

Quando são utilizados sistemas digitais fotogramétricos, o MNE pode ser extraído através de uma interação do operador com a ferramenta (entrada de parâmetros de altitude, filtros, delimitação de áreas de interesse, formato de geração etc) ou automaticamente.

B1.2 Formas de Organização dos Dados

- **Forma semi-regular:** seria a forma de organizar os dados através de uma malha regular acrescida de pontos notáveis, muito comum na coleta de seções transversais (perfis) em topografia, quando são coletadas as diferenças de níveis em intervalos regulares, mas também em pontos especiais, como córregos, topos de morros etc.
- **Forma irregular:** A forma de organização irregular é um Modelo de superfície usado para criar, armazenar, analisar e mostrar informações pertinentes ao terreno. É formada por um conjunto de pontos xy coletados aleatoriamente.

A forma de organização irregular dos dados, permite a geração de Modelos de informação eficientes para análise e visualização de terreno, através de:

- Interpolação dos valores de Z;
- Cálculo de Declividade;
- Cálculo da área e do comprimento da superfície;
- Cálculo de volume e análise de cortes;
- Determinação de visibilidade entre dois pontos;
- Análise de visibilidade a partir de um ou mais pontos de observação;
- Avaliação da qualidade visual de cada região visualizada;
- Geração de perfis através de superfícies; e
- Sombras baseadas numa fonte de iluminação de posição específica.

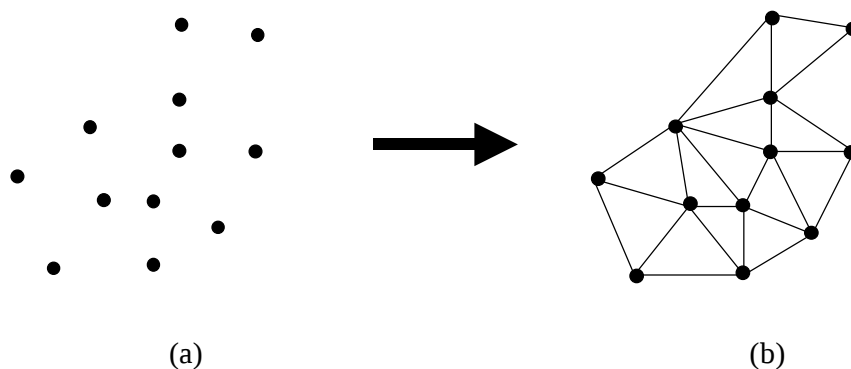


Figura B1.2 - Representação da forma de organização irregular dos dados. (a) Representação irregular dos dados coletados; (b) Representação triangular dos dados.

Fritsch e Pfannenstein (1992), sugerem uma outra forma de organizar os dados, que é uma combinação das formas regular e irregular:

- **Híbrida:** A combinação das duas formas (regular e irregular), resulta na integração de uma informação geomorfológica adicional. É equivalente, na prática, à forma de organização de dados irregular.

B1.3 Formas de Armazenamento

Fritsch (1991), sugere diferentes formas para a armazenagem dos dados no formato *TIN*:

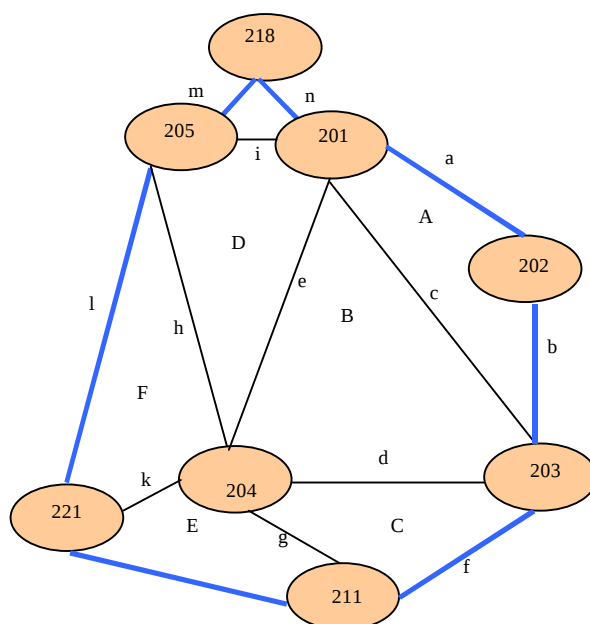


Figura B1.3 - Estrutura de dados.

Na tabela B1.1, é apresentada uma lista de vértices, onde cada vértice possui coordenadas XYZ, ou seja, cada célula armazena coordenadas tridimensionais, como mostra a tabela B1.2.

Tabela B1.1 – Armazenamento dos dados em relação aos vértices, por meio de uma lista de vértices.

Vértices			
Vértices	X	Y	Z
201	X_{201}	Y_{201}	Z_{201}
202	X_{202}	Y_{202}	Z_{202}
203	X_{203}	Y_{203}	Z_{203}
205	X_{204}	Y_{204}	Z_{204}
211	X_{211}	Y_{211}	Z_{211}
218	X_{218}	Y_{218}	Z_{218}
221	X_{221}	Y_{221}	Z_{211}

Na tabela B1.2, é apresentada uma lista de arestas com seus vértices inicial e final.

Tabela B1.2 - Armazenamento dos dados em relação às arestas e aos vértices.

Arestas			
Arestas	Vértices	Arestas	Vértices
a	201,202	h	204,205
b	202,203	i	201,205
c	201,203	j	211,221
d	203,204	k	204,221
e	201,204	l	205,221
f	203,211	m	205,218
g	204,211	n	201,218

Na tabela B1.3, é apresentada uma lista de faces com as arestas que as compõem.

Tabela B1.3 - Armazenamento dos dados em relação às faces e às arestas.

Faces	
Faces	Arestas
A	a,b,c,
B	c,d,e
C	f,g,h
D	e,h,i
E	g,j,k
F	h,k,l
I	i,m,n

De acordo com Wolf (2000), o armazenamento dos dados no formato *TIN* com linhas de descontinuidade é muito mais eficiente em termos de armazenamento de dados. Desta forma, as elevações podem ser adquiridas como pontos críticos, por exemplo: vales; divisões de água; etc.

No formato *TIN*, os triângulos podem ser assumidos com faces planas, representadas no espaço tridimensional. A triangulação de *Delaunay* é um dos métodos geralmente utilizados para construir estes triângulos.

- Neste método, as linhas são desenhadas entre os pontos mais próximos, sem intersecção entre as linhas. Uma generalização no Modelo *TIN* permite a inclusão de linhas de descontinuidade para fornecer uma maior confiabilidade do terreno.

O armazenamento no formato Híbrido, utiliza a organização dos dados de grade regular em diferentes formas na triangulação. A figura B1.4 mostra um exemplo, onde os triângulos são organizados em relação às arestas.

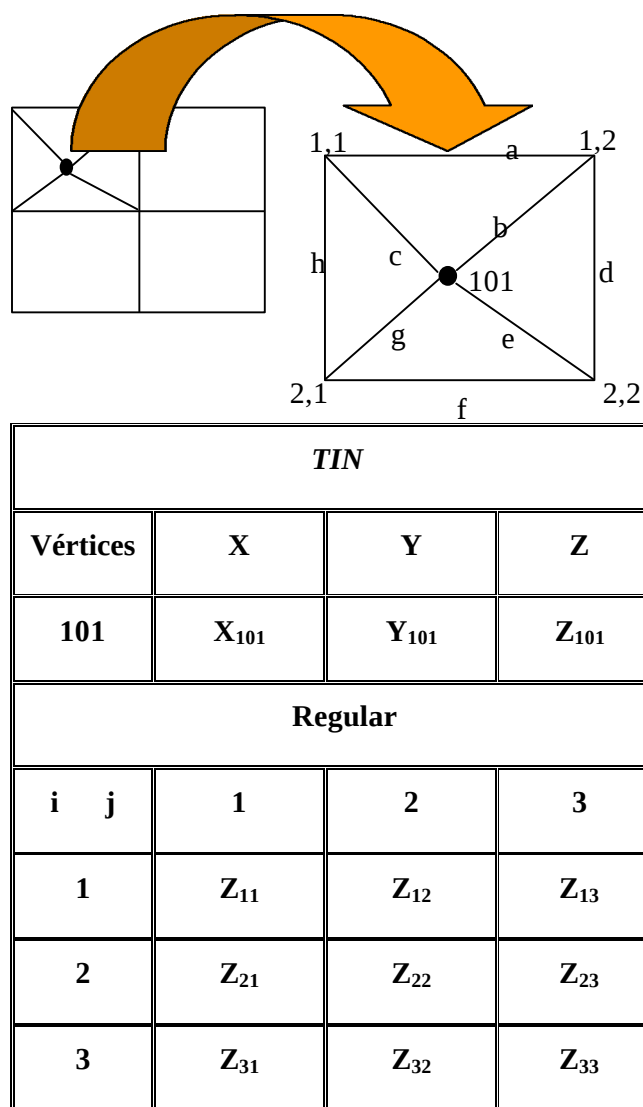


Figura B1.4 - Organização dos dados no formato Híbrido.

APÊNDICE C

C1 Estratégias para Geração Automática de MNE

O aplicativo Socet Set, possui 2 estratégias para a geração automática de MNE, sendo uma considerada adaptativa e outra não adaptativa. Essas estratégias possuem vários parâmetros que controlam a geração automática de Modelos por correlação automática de imagens. Considerando vários fatores, tais como, tamanho da janela de correlação, tamanho da janela de pesquisa, entre outros.

C1.1 Estratégias Não-Adaptativas

As estratégias não-adaptativas utilizam um algoritmo de correlação para calcular as elevações a partir do estéreo-par. Estas estratégias dependem de uma série de parâmetros que são ajustados pelo operador para aumentar a qualidade do Modelo que será gerado, dependendo do comportamento do terreno e das imagens que estão sendo processadas.

A tabela C1.1 mostra as doze estratégias mais comuns e descreve regras para a situação mais adequada de uso de cada uma.

Tabela C1.1 – Descrição das estratégias.

Declividade máxima no terreno	Alta velocidade na extração	Alta acurácia na extração	Alta acurácia e filtragem de edificações ou árvores	Alta acurácia e velocidade para MNE com <i>grid</i> muito denso
20°	Flat	Flat_1	Flat_plus	Flat_dense
30°	Rolling	Rolling_1	Rolling_plus	Rolling_dense
50°	Steep	Steep_1	Steep_plus	Steep_dense

- **Estratégia *flat*:** Estratégia usada em terrenos planos ou modelos com pequena paralaxe em x. O critério para a maior declividade é baixo (20 graus) permitindo a filtragem de pequenas árvores e casas, sendo que nada muito inclinado é modelado. Nesta estratégia utiliza-se uma janela de correlação maior e o processamento é mais rápido que as estratégias *rolling* e *rough*.
- **Estratégia *rolling*:** Esta estratégia é de maior custo computacional, utilizada para terrenos médios e permite rampas acima de 30 graus.

Estas estratégias trabalham com o segundo nível da pirâmide de imagens, isto é, trabalham com imagens reamostradas. As mesmas estratégias podem ser utilizadas no nível de resolução original (1:1) e produzirão resultados mais precisos, mas a um custo computacional maior.

As estratégias *flat_plus* e *rolling_plus* são similares às anteriores, exceto que há uma filtragem adicional para remover árvores e edificações, além de realizar uma suavização adicional em pontos críticos do Modelo gerado.

C1.2 Estratégias Adaptativas

A estratégia adaptativa utiliza indução para gerar o Modelo de Terreno, através de um algoritmo de correlação adaptativo, que gera o Modelo adaptativamente de acordo com a inclinação do terreno. Esta estratégia não permite o trabalho simultâneo com vários pares de imagem.

Tabela C1.2 – Exemplo de parâmetros utilizados para gerar o Modelo de elevações.

NUM_PASSES	8							
ATE_MODE	1	1	1	1	1	1	1	1
CORR_AREA_2D	15	15	15	15	15	15	15	15
CORR_CURV_LIM	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
CORR_CUTOFF	0.5	0.5	0.5	0.45	0.45	0.4	0.4	0.45
DELZ_LIM	3	3	3	3	3	2	2	2
DIFF_SP_LIM	9.24	9.24	9.24	9.24	9.24	9.24	9.24	9.24
HW_ERR	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
LOW_SP_LIM	400	400	400	400	200	200	200	200
MAX_CORR_AREA_2D	15	15	15	15	15	15	15	
MAX_ITER	0	0	0	0	3	3	3	3
MMDL_ERR	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
RETRIES	0	0	0	0	0	0	0	0
SEC_PEAK_LIM	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
SP_CUTOFF	6	6	6	6	6	2	2	1
AUTO_U_SRCH	0	0	0	0	0	0	0	0
U_SRCH_DIST	50	50	50	50	50	50	50	50
U_SRCH_MAX	50	50	50	50	50	50	50	50
VLLY_LIM	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
WINDOW	0	0	0	0	0	0	0	0
YP_LIM	4	4	4	4	4	4	4	4
RRDS	32	32	16	16	8	8	4	4
X_SPACING	1	1	1	1	1	1	1	1
Y_SPACING	1	1	1	1	1	1	1	1
FOM_LIMIT	0	0	0	0	0	0	0	0
SLOPE_LIMIT	90	90	90	90	90	90	90	90
SPIKE_LIMIT	20	20	20	20	15	15	15	3
INTERPOLATE	no	no	no	no	no	no	no	no
APPLY_THIN_FILTER	no	no	no	no	no	no	no	no
THIN_FILTER_THRESH	0	0	0	0	0	0	0	0
APPLY_OBSTRUCTION_FILTER	no	no	no	no	no	no		no
OBSTRUCTION_SIZE	0	0	0	0	0	0	0	0
OBSTRUCTION_SLOPE	0	0	0	0	0	0	0	0
OVER_COLLECT	no	no	no	no	no	no	no	no

Vários parâmetros são definidos nos arquivos de estratégia, como pode ser visto na tabela D1.1. Abaixo serão fornecidos os significados de cada parâmetro apresentado.

- ✓ Num_passes: número de passos que devem ser executados para gerar o MNE. A estratégia e o nível de minificação mudam em cada passo. O limite de passos é de 1 a 12;
- ✓ ATE_mode: liga o modo de extração. 1 = Processamento utilizando correlação; 2 = Processamento de refinamento para geração de ortofotos;
- ✓ Corr_area_2D: dimensão da janela para correlação 2D, dada em pixels. O tamanho é automaticamente expandido se o sinal de correlação é muito baixo. O limite varia de 3 até 60;
- ✓ Corr_curv_lim: curvatura mínima no pico da função de correlação. A curvatura é o valor absoluto da segunda derivada da função de correlação. Uma alta curvatura indica uma medida precisa. O limite é de 0 à 2.
- ✓ Corr_cutoff: valor mínimo de correlação dos pontos. A correlação é normalizada num limite de -1 até 1;
- ✓ Max_iter: número máximo de iterações executadas durante a correlação;
- ✓ Delz_lim: não é utilizado quando $Max_iter = 0$. Quando $Max_iter > 0$, as iterações irão parar se a mudança máxima na paralaxe em x for o menor $Delz_lim$. Se Max_iter é dividida e a paralaxe em x é maior que $Delz_lim$, o ponto é *flagged* como *Large_elev_change*;
- ✓ Diff_sp_lim: limite de diferença no sinal de correlação entre as duas imagens calculadas. O cálculo para a diferença no sinal é feito com $diff_signal_power = (signal_power_1 - signal_power_2) / signal_power_2$;
- ✓ Hw_err: erro na correlação dos pontos associados. Usado para calcular a precisão da correlação;

- ✓ *Low_sp_lim*: limite de baixo sinal de correlação. Se o quadrado do sinal é menor que o valor do limite, *cor_área* é aumentada até que o sinal esteja acima deste valor;
- ✓ *Max_corr_area_2D*: dimensão quadrática máxima da área usada para correlação 2D, em pixels. Se o tamanho inicial especificado pela *corr_área_2d* resulta numa área mais baixa no sinal, a área é iterativamente aumentada até que *Max_corr_area* seja dividida;
- ✓ *Mmdl_err*: erro constante associado com o modelo matemático. Usado para calcular a precisão dos pontos.
- ✓ *Retries*: indica se o algoritmo deve remedir automaticamente pontos que falharam no processo de correlação (0=no, 1=yes);
- ✓ *Sec_peak_lim*: porcentagem a priori de picos de correlação;
- ✓ *Sp_cutoff*: sinal mínimo de correlação;
- ✓ *U_srch_dist*: distância de pesquisa na direção u epipolar, a partir do centro da janela de correlação. Indica quantos pixels serão pesquisados à esquerda e à direita do centro da janela. Limite de 1 até 50;
- ✓ *U_srch_max*: distância de pesquisa máxima na direção u epipolar. A área de pesquisa é iterativamente aumentada até o máximo, se os picos de correlação ocorrerem na borda da área de pesquisa. Limite de 1 até 50;
- ✓ *Window*: indica qual imagem é fixada durante a correlação (0=esquerda, 1=direita);
- ✓ *Yp_lim*: máxima paralaxe em y para correlação 2D. Se a paralaxe em y é maior que o limite é detectada uma paralaxe excessiva;
- ✓ *Rrds*: níveis de minificação utilizados para medidas realizadas em cada passo do processo. Limite de 1 até 2048;
- ✓ *X_spacing*: usado para medir pontos da grade na direção x;
- ✓ *Y_spacing*: usado para medir pontos da grade na direção y;
- ✓ *Slope_limit*: usado para checar rampas excessivas entre os pontos na grade. A unidade de medida é em graus. Limite de 0° à 90° ;

- ✓ *Spike_limit*: usado para checar picos no MNE. Unidade de medida é em graus. Um valor como 5⁰ permite a medida de pequenos picos e um valor como 1⁰ permite a medida de picos suaves. Limite de 0⁰ à 90⁰;
- ✓ *Interpolate*: quando a variável está ligada, os pontos considerados suspeitos serão interpolados. Caso contrário esses pontos serão eliminados do processamento;
- ✓ *Apply_thin_filter*: quando a variável está ligada é aplicada uma suavização no MNE em áreas não críticas;
- ✓ *Thin_filter_thresh*: este limiar é uma porcentagem do espaçamento dos pontos;
- ✓ *Apply_obstruction_filter*: remove objetos;
- ✓ *Obstruction_size*: tamanho do objeto de interesse a ser removido; e
- ✓ *Obstruction_slope*: rampa utilizada para determinar se um objeto no MNE é uma obstrução.

APÊNDICE D

AVALIAÇÃO DE FERRAMENTAS DE EXTRAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DE FEIÇÕES EXISTENTES NO SISTEMA *SOCET SET*

Daniel Rodrigues dos Santos ⁽¹⁾
Antonio Maria Garcia Tommaselli ⁽²⁾

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT
Campus de Presidente Prudente
Rua: Roberto Simonsen, 305
Presidente Prudente – S.P.
{dsantos, tomaseli}@prudente.unesp.br

(1) Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas.

(2) Prof. Adjunto do Departamento de Cartografia.

Publicado nos anais em CD-ROM do Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas
Curitiba - 2001

AVALIAÇÃO DE FERRAMENTAS DE EXTRAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DE FEIÇÕES EXISTENTES NO SISTEMA *SOCET SET*

RESUMO

Os primeiros restituidores fotogramétricos eram instrumentos analógicos, os quais demandam muito tempo para a realização das tarefas fotogramétricas, tendo como inconveniente o alto custo, a introdução de erros provocados pelas tarefas repetitivas dos operadores e pelos componentes ópticos e mecânicos, e a inexistência de processos automáticos. Com o advento e popularização dos computadores, surgiram os Sistemas Fotogramétricos Digitais, que tornaram possível a automação de algumas tarefas, tais como a orientação interior e relativa, a geração de M.D.T. (Modelo Digital do Terreno) e de ortofoto digital. Entretanto, a fase que demanda maior tempo dos operadores e que, portanto, é a de maior custo, ainda não está automatizada. A extração de feições é a etapa na qual formas geométricas bidimensionais, caracterizadas pela descontinuidade dos tons de cinza, são detectadas e mapeadas. A extração semi-automática de feições tem sido apontada como a ferramenta que possibilita um substancial aumento na produção durante a restituição, particularmente de áreas urbanas. Alguns sistemas digitais possuem ferramentas de extração semi-automática de feições usando recursos de Processamento Digital de Imagens. O sistema digital utilizado neste estudo foi o Socet Set, que é um aplicativo escrito em linguagem C++, consistindo de bibliotecas, arquivos *headers* e aplicações. Neste trabalho são identificadas as ferramentas de extração semi-automática de feições do sistema Socet Set e classificadas como vetoriais ou matriciais. As ferramentas matriciais são aquelas que recorrem a algoritmos de Processamento Digital de Imagens, enquanto que as vetoriais são semelhantes às existentes em aplicativos CAD. A eficiência e confiabilidade destas ferramentas serão objeto de discussão e avaliação neste trabalho.

ABSTRACT

The first photogrammetric plotters were analog plotters, which require too much time in the photogrammetric tasks, and have other drawbacks such as the high cost, the errors introduced both by repetitive tasks of operators and by optic and mechanic components, and the lack of automation. With the advent and popularization of computers, the Digital Photogrammetric Systems become available, making feasible the automation of many tasks, e.g., the interior and relative orientation, D.T.M. generation (Digital Terrain Model) and digital orthophoto production. However, the stage that demands more time of operators and that is more time consuming, has not been successfully automatized. In the feature extraction step geometric shapes, described by differentiation of gray levels, are detected. The semi-automatic feature extraction has been regarded as the tool that could improve the photogrammetric plotting production. Just a few Digital Systems have integrated tools for semi-automatic feature extraction with image processing capabilities. The Digital System used this research was the Socet Set, which is a software written in C++, containing libraries, files *headers* and applications. In this work semi-automatic feature extraction tools are identified and classified as vector or raster based. The raster tools perform Digital Image Processing functions whilst vector tools are similar to the existing CAD functions. The efficiency and reliability of these tools will be evaluated and discussed in this work.

1 INTRODUÇÃO

Nos primórdios da Fotogrametria, surgiram os primeiros restituidores analógicos. Esses instrumentos exigem dos operadores um grande esforço, demandando tempo e provocando, muitas vezes, fadiga, devido às operações sistemáticas, principalmente nos processos de restituição de modelos. Outros problemas relacionados aos restituidores analógicos são: alto custo; introdução de erros provocados pelas tarefas repetitivas dos operadores e pelos componentes ópticos e mecânicos e inexistência de processos automáticos.

A “popularização” da Fotogrametria Digital trouxe um aumento considerável na demanda de produtos no mercado atual, pois os sistemas digitais comercialmente disponíveis não exigem especialização dos operadores e possuem um custo global menor que os instrumentos analógicos.

Com o advento dos Sistemas Fotogramétricos Digitais tem se tornado possível a automação de algumas tarefas, destacando-se: orientação interior e relativa (reconhecimento de padrões automáticos e *matching* de pontos); geração de M.D.T. (Modelo Digital do Terreno); e a geração de ortofotos digitais. Tarefas como a extração de feições e a orientação absoluta ainda não estão automatizadas, pois são operações complexas que exigem heurísticas bem definidas e Inteligência Artificial. A fase que demanda maior tempo dos operadores e que, portanto, é a de maior custo é a restituição. Apenas alguns sistemas digitais possuem ferramentas de extração semi-automática de feições que utilizam recursos de Processamento Digital de Imagens. Estas ferramentas para extração semi-automática de feições, disponíveis no Sistema Fotogramétrico Digital, visam facilitar e acelerar as tarefas dos operadores aumentando a produtividade e a confiabilidade. O sistema digital utilizado neste estudo foi o Socet Set da *LHSystems*.

O objetivo desta pesquisa é o estudo, análise, identificação e avaliação da eficiência dos algoritmos implementados nas ferramentas de extração semi-automática de feições existentes no sistema, para que se tenha conhecimento da confiabilidade destas ferramentas.

2 EXTRAÇÃO DE FEIÇÕES

A extração de feições é a etapa da produção que exige maior esforço por parte do operador. Por isso, existe uma grande preocupação dos fotogrametristas em relação à produtividade e à eficiência das ferramentas implementadas para a realização desta etapa. As edificações representam cerca de 50% do total de feições que devem ser extraídas numa restituição com propósitos cadastrais. É muito complicada a implementação de ferramentas de extração de feições inteiramente automática, pois as formas das entidades são bastante diversificadas. São necessárias estratégias semi-automáticas bem definidas, fazendo com que esta etapa ainda seja dependente do operador humano, tanto para o reconhecimento de formas, quanto para o fornecimento de pontos

sementes, dando início ao processo de extração. A má qualidade das imagens (presença de ruídos, oclusões etc), também dificulta o trabalho dos algoritmos implementados para a extração automática de feições.

Para Steger (1996), existem diversos métodos para se extrair feições em imagens digitais, variando conforme o tipo de feição que se quer extrair. Assim, os algoritmos são desenvolvidos de modo a obter o máximo de desempenho para um tipo específico de alvo. Basicamente, os métodos de extração de feições são agrupados em dois conjuntos:

- Extração de feições retas; e
- Extração de feições poligonais ou áreas.

Existem três modos de extração de feições, considerando o grau de dependência do operador:

- Extração manual: todo processo é realizado pelo operador humano;
- Extração automática: o processo é totalmente independente do operador humano; e
- Extração semi-automática: algumas etapas dependem de reconhecimento e interpretação do operador.

2.1 Etapas do Processo de Extração Semi-Automática de Feições

Como as ferramentas automáticas são de difícil implementação, devido aos fatores apresentados, trata-se, neste trabalho, apenas da abordagem semi-automática, que é a abordagem de maior interesse atual.

Existem várias seqüências possíveis para o processo de extração semi-automática de feições lineares, e as mais comuns são (Tommaselli, 1999):

- (1) **Suavização com preservação de bordas:** este filtro é aplicado antes da detecção de bordas para detectar ruídos e para reduzir a detecção de bordas nas áreas de textura homogênea que são internas às regiões, mas sem suavizar as bordas;
- (2) **Detecção de bordas:** determina, para cada pixel na imagem, a magnitude e a direção do gradiente de cinza naquele ponto;
- (3) **Limiarização:** consiste na separação entre as bordas dos objetos existentes na imagem e o fundo da imagem.
- (4) **Afinamento por supressão não máxima:** a detecção de bordas produz bordas com largura não unitária. A supressão não máxima busca remover aqueles pixels que não são máximos locais afinando as bordas para uma largura de um pixel;
- (5) **Conexão e ajustamento de linhas:** a conexão de linhas consiste em localizar todos os pixels pertencentes a uma mesma borda e agrupá-los, de forma a constituírem uma única feição, enquanto o ajustamento consiste na determinação

da equação da reta que melhor se ajusta aos pixels pertencentes ao dado segmento constituído; e

- (6) **Detecção de cantos:** é necessário definir os cantos dos objetos por um processo geométrico de prolongamento das linhas das bordas, pois os operadores de borda não definem estes cantos.

3 SISTEMA SOCET SET

3.1 Arquitetura

O aplicativo Socet Set da *LHSystems*, é o único sistema fotogramétrico aberto, disponibilizando um “Kit” de desenvolvimento (*DEVKIT*) contendo bibliotecas, interface de programação e interface gráfica, que permitem ao usuário o desenvolvimento de suas próprias aplicações em linguagem C++ (*Users’ Manual*, 1998).

O aplicativo é escrito em linguagem C++, consistindo de bibliotecas, arquivos *headers* e aplicações. A figura 1 apresenta a arquitetura do aplicativo.

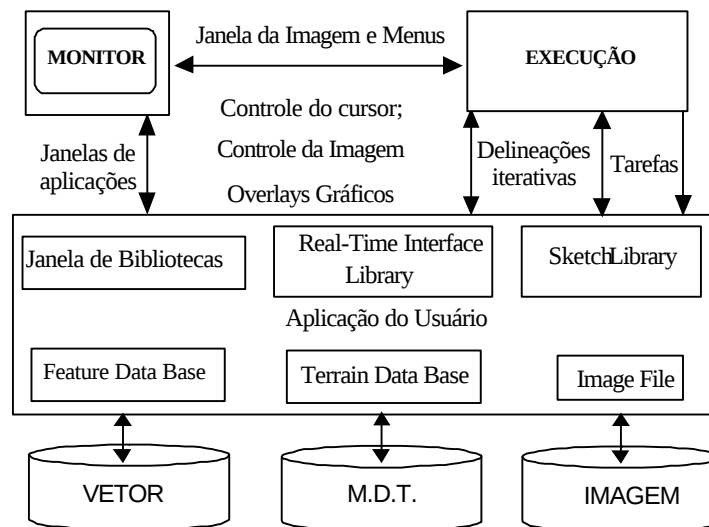


Figura 1 – Arquitetura do aplicativo Socet Set.

3.2 Extração de Feições no SOCET SET

O sistema Socet Set possui duas ferramentas para o processo de extração de feições: o módulo E.A.F. (Extração Automática de Feições); e o módulo *Sketch*. Nesta pesquisa trataremos apenas do módulo *Sketch*, que utiliza tanto ferramentas geométricas (CAD) como recursos de Processamento Digital de Imagens (P.D.I.) para o processo de extração de feições. A ferramenta *Sketch* manipula gráficos vetoriais e possui uma variedade de operações de edição, tais como translação, rotação, intersecção de pontos e compressão de objetos gráficos, sendo utilizada para extrair, graficamente, objetos com representação tridimensional na imagem.

As funções disponíveis na ferramenta *Sketch* podem ser classificadas como: funções geométricas ou vetoriais (CAD); e funções que utilizam recursos de P.D.I.. Essas ferramentas permitem o traçado de polígonos regulares, irregulares e o traçado de retas, a partir de um estéreo-par orientado.

3.2.1 Funções Geométricas

As funções consideradas geométricas são utilizadas para capturar vértices, copiar, deletar, armazenar, exportar e importar feições, segmentos de formatos gráficos (*dxf* e *dgn*) ou coordenadas (*ASCII*). Neste estudo serão enfatizadas as funções de extração semi-automática de feições, que utilizam recursos de P.D.I..

3.2.2 Funções que Utilizam Recursos de Processamento Digital de Imagens

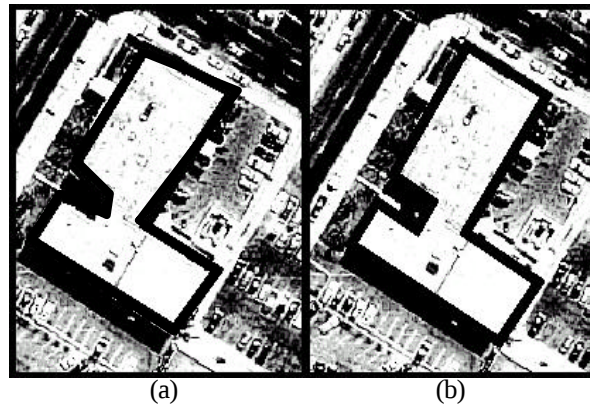
Com as ferramentas de extração semi-automática de feições, do módulo *Sketch*, que utilizam recursos de P.D.I., as bordas de uma feição podem ser delineadas pelo operador, sem a necessidade de selecionar pontos exatamente nos cantos, ou realizar o contorno das bordas com extrema precisão (figura 2a). A ferramenta refina o polígono ou a reta indicada, encontrando os cantos e as bordas, o que diminui o esforço operacional. Abaixo estão os tipos de feições e modos que a ferramenta *Sketch* possui, dependendo apenas de um reconhecimento e de uma extração grosseira pelo operador.

- **Rooftop_irregular:** utilizado em edificações que não possuem lados paralelos ou perpendiculares;
- **Rooftop_square:** usado em edificações que possuem cantos com ângulos retos, forçando os lados a serem perpendiculares; e
- **Rooftop_parallel:** usado para edificações do tipo paralelepípedo, forçando os lados opostos a serem paralelos.

O modo de extração de edificações *rooftop* possui três formas para a computação da coordenada Z, a fim de representar perfeitamente os objetos gráficos extraídos. São elas:

- **average_Z:** a altitude da feição é encontrada através da média das altitudes dos pontos selecionados pelo operador;
- **find_Z:** a altitude é encontrada através da paralaxe das duas imagens, e são calculados novos valores de Z para os cantos da edificação extraída (algoritmo de correlação de imagens); e
- **user_Z:** as altitudes das coordenadas dos cantos da edificação são as mesmas dos pontos selecionados (pontos sementes) pelo operador.

A figura 2 mostra uma edificação extraída pela ferramenta *Sketch* no modo *rooftop*.



- (a) Contorno grosseiro da feição;
(b) Bordas extraídas com precisão após aceitar a

Figura 2 – Visualização de uma edificação extraída pelo módulo *rooftop*.

A ferramenta *Lake* utiliza um algoritmo de crescimento de regiões para extrair feições em áreas com valores de cinza homogêneos e elevações constantes. Este modo requer que sejam tomados dois pontos fora da feição, para definir um retângulo que a envolva (figura 3, pontos 2 e 3), e um ponto dentro da área correspondente (figura 3, ponto 1). A partir do nível de cinza deste ponto coletado, o algoritmo realiza uma busca por grupos de pixels com as mesmas propriedades, caracterizando aqueles com brilho similar, como pertencentes à uma única região. Esta ferramenta opera em três modos:

- ***Lake_high_contrast***: é mais eficiente em feições que estão destacadas do fundo;
- ***Lake_medium_contrast***: trabalha melhor com feições não distintas;
- ***Lake_low_contrast***: fornece bons resultados em feições que se misturam com o fundo.

A figura 3 ilustra os pontos utilizados para iniciar a extração de feições do tipo lago no modo *Lake*.

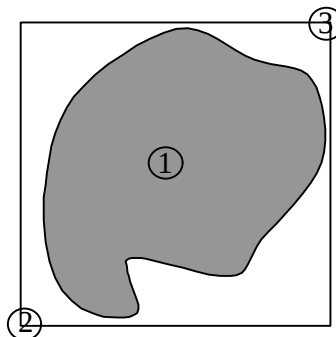


Figura 3 - Estratégia utilizada na ferramenta *Lake*, para crescimento de regiões.

Um outro modo da ferramenta *Sketch* é o *Refine*, utilizado para extrair feições lineares com segmentos retos e curvos, bem como adicionar e refinar pontos sementes. Nesta ferramenta o algoritmo procura pelo pixel de borda mais próximo ao ponto semente, dado pelo operador. Existem vários modos de refinamento:

- **Refine_Default_More_Points**: útil na extração de feições lineares irregulares. Pontos extras são automaticamente adicionados, para que a feição seja delineada com maior precisão. Caso outras bordas estejam próximas à borda da feição, o ponto pode ser atraído para a borda errada;
- **Refine_Same_Number_Points**: útil para traçar feições com lados aproximadamente retos;
- **Refine_Spline**: para extrair feições com curvas suaves. O algoritmo move os pontos próximos às bordas e adiciona pontos para que seja formada uma curva *spline* cúbica suavizada;
- **Refine_Spline_and_Straight**: quando o operador deseja extrair uma feição com segmentos retos conectados a segmentos curvilíneos, podendo ou não formar um polígono fechado;
- **Refine_Arc_And_Straight**: quando uma feição possuir segmentos retos conectados a arcos; e
- **Refine_Road**: utilizado para extrair a linha central de rodovias e feições semelhantes, tomando pontos sementes na linha central da rodovia. O algoritmo usará o primeiro ponto como um *template* do corte transversal da rodovia e, por isto, é importante colocar o primeiro ponto como um ponto bastante típico na rodovia.

A figura 4 mostra uma situação em que se utiliza o modo de refinamento de pontos da ferramenta *Sketch*.

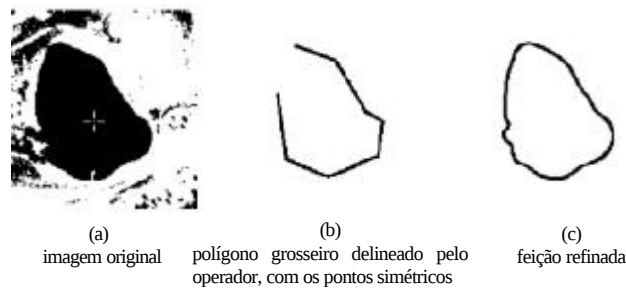


Figura 4 - Visualização do resultado da extração de uma feição com o modo de refinamento de pontos.

4 METODOLOGIA

Com o objetivo de avaliar as ferramentas de extração semi-automática de feições foi analisado um projeto existente no sistema e realizadas todas as etapas, que são descritas a seguir. Os estéreo-pares deste projeto são da cidade de Minneapolis nos Estados Unidos, na escala 1:6000, sendo o tamanho do pixel de 24 μ m. O valor da distância focal da câmara métrica convencional utilizada na tomada das fotografias neste projeto é de 153.13 mm.

4.1.1 Definição de Parâmetros do Projeto

Para a realização de qualquer projeto no sistema, o operador deve definir alguns parâmetros para que sejam atendidas as especificações cartográficas do trabalho, tais como *Datum*, Sistema de Coordenadas, referência vertical e as elevações máxima e mínima da área correspondente.

4.1.2 Importação das Imagens

O certificado de calibração da câmara e os parâmetros de orientação exterior aproximados são dados necessários para a importação das imagens no Socet Set, para se garantir uma orientação adequada. Na importação das imagens, é realizado um processo no qual a imagem original é reamostrada em vários níveis (pirâmide de imagens), melhorando a eficiência do recurso de *zoom* e permitindo a correlação hierárquica.

4.1.3 Orientação Interior

O sistema possui ferramentas automáticas e semi-automáticas para a realização deste procedimento. Para a realização da orientação interior são utilizados parâmetros de orientação interior inseridos no arquivo de calibração. Após a execução da tarefa para cada imagem, é retornado um E.M.Q. (Erro Médio Quadrático), dado em unidades de pixel.

4.1.4 Fototriangulação

Existem ferramentas automáticas e interativas para a realização da fototriangulação do modelo ou bloco. No sistema, a triangulação se inicia pela importação do arquivo dos pontos de apoio. Posteriormente o operador realiza a medição dos pontos de passagem interativamente ou automaticamente. A partir destes pontos o bloco fotogramétrico é ajustado determinando-se as coordenadas de terreno dos pontos de passagem e os parâmetros de orientação exterior das imagens.

5 EXPERIMENTOS

Como já mencionado anteriormente, a ferramenta utilizada para extrair feições nesta pesquisa é a *Sketch*. Esta ferramenta é dividida em três partes: uma primeira parte é utilizada para a edição dos objetos gráficos. Existe pouco interesse no seu estudo, pois são ferramentas simples com a mesma funcionalidade existente em qualquer CAD; a segunda parte manipula os objetos gráficos (deleta elementos, busca e mede feições) e é disponível em qualquer CAD; e uma terceira parte, esta de interesse, que fornece opções de esquadreamento, perpendicularidade, extração semi-automática de regiões de interesse etc.

Como já descrito anteriormente, o modo utilizado para extrair edificações é o *rooftop*. Quando o cumo do telhado consiste de bordas retas, utiliza-se a opção *rooftop_parallel*; quando os lados dos telhados não são paralelos ou perpendiculares é utilizada a opção *rooftop_irregular*; e quando o telhado possui cantos com ângulos retos utiliza-se a opção *rooftop_square*.



(a)

(b)

(a) Pontos coletados antes de aceitar a operação;
(b) Edificação extraída após aceitar a operação.

Figura 5 – Visualização da uma edificação extraída antes e após aceitar a opção *rooftop_parallel*.

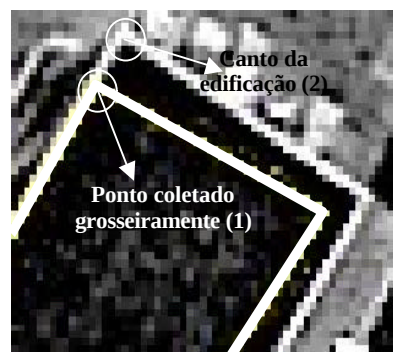


Figura 6 - Representação de um ponto coletado fora do canto da edificação.

Na figura 6, percebe-se que o ponto é coletado aproximadamente (1) pelo operador, sem necessidade da coleta exata do canto da edificação (2). Ao utilizar a ferramenta do módulo *rooftop_parallel*, como os lados da edificação são paralelos, o algoritmo força automaticamente a projeção do objeto gráfico num plano horizontal, para que ocorra o perpendicularismo dos lados adjacentes ou o paralelismo dos lados opostos, e também refina a posição dos cantos da edificação, ajustando os cantos (figura 5b). A definição dos cantos é feita pela intersecção das duas bordas mais próximas ao ponto selecionado aproximadamente, fazendo com que o ponto seja projetado para o canto correto da borda (figura 7).

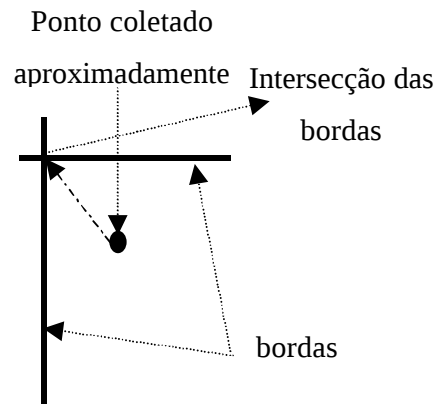
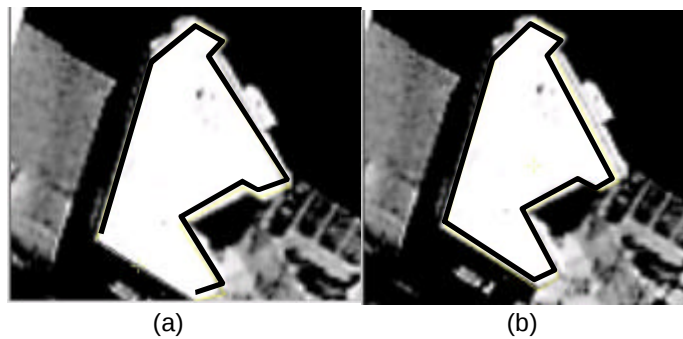


Figura 7 - Esquema da projeção do ponto coletado aproximadamente para o canto da borda.

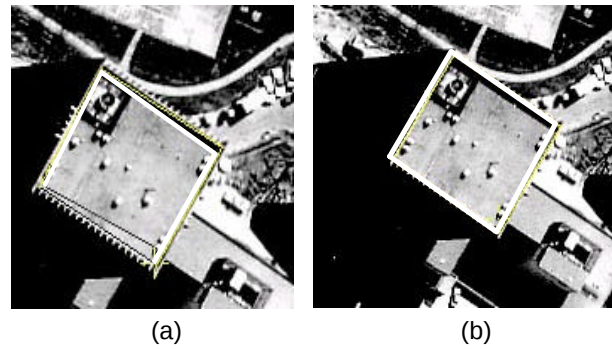
Quando as edificações não possuem lados paralelos ou perpendiculares o operador deve utilizar o modo de extração de edificações *irregular* (figura 8).



(a) pontos coletados antes de aceitar a operação;
(b) edificação extraída após aceitar a operação.

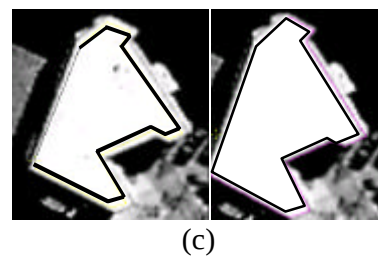
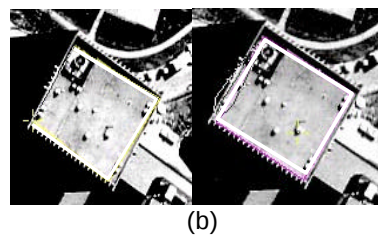
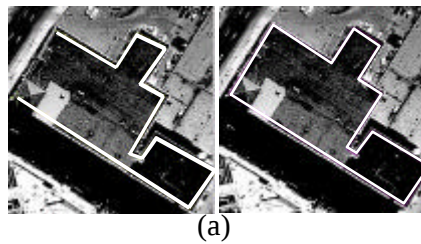
Figura 8 - Visualização da edificação extraída antes e após aceitar a opção *rooftop_irregular*.

O funcionamento do módulo *square* da ferramenta *rooftop* está descrito na seção 3.2.2 e o resultado é mostrado na figura 9(b).



(a) Pontos coletados antes de aceitar a operação;
(b) Edificação extraída após aceitar a operação.

Figura 9 - Visualização da edificação extraída antes e depois de aceitar a opção *rooftop_square*.



(a) Edificações extraídas com o modo *rooftop_parallel*;
(b) Edificações extraídas com o *rooftop_square*;
(c) Edificações extraídas com o *rooftop_irregular*.

Figura 10 - Resultados da extração utilizando o modo *rooftop*, com pontos sementes afastados da borda.

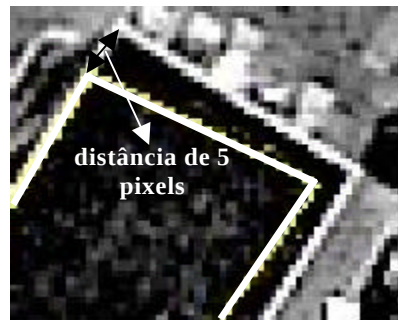


Figura 11 - Zoom visualizando a medida feita afastada da borda.

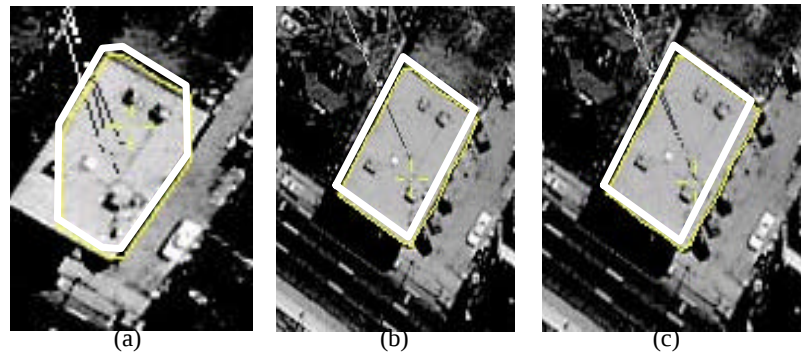
Analisando as figuras 5, 7 e 8, pode-se afirmar que ao selecionar pontos sementes lançados próximos à borda da edificação, o algoritmo funciona eficientemente. Os testes realizados mostraram que ao tomar pontos afastados em mais que 5 pixels da borda, os vetores das bordas extraídas não são posicionados adequadamente, invalidando a eficiência do algoritmo, considerando todos os modos (*parallel*, *square* e *irregular*) de extração de edificações (figuras 10a, 10b e 10c).

Um outro modo de extração da ferramenta *Sketch* é o modo de crescimento de regiões. Para a extração de uma feição com esta ferramenta, o operador deve selecionar 3 pontos sementes. Dois destes pontos são tomados fora da feição, delimitando uma área que envolva a feição, e um ponto dentro da feição, que será o ponto semente para o algoritmo considerar o nível de cinza como atributo deste ponto selecionado (figura 12). A partir disso, são examinados seus vizinhos numa seqüência para decidir se eles possuem brilho similar.



Figura 12 – Módulo da ferramenta *lake* para extração de regiões de interesse.

Ao verificar as imagens 13(a), 13(b) e 13(c), pode-se afirmar que, pelo fato da imagem não ser uma imagem de alto contraste, o algoritmo *high_contrast* não foi eficiente, mas os algoritmos *low_contrast* e *medium_contrast* funcionaram adequadamente (figuras 13(b) e 13(c)). Por isso, na utilização desta ferramenta, o operador deve ter uma análise crítica da qualidade radiométrica da imagem, para a escolha adequada do tipo de algoritmo a ser utilizado.



- (a) Resultado obtido com a utilização da opção *lake_high_contrast*;
(b) Resultado obtido com a utilização da opção *lake_low_contrast*;
(c) Resultado obtido com a utilização da opção *lake_medium_contrast*.

Figura 13 - Visualização dos resultados obtidos com o modo *Lake*.

Quando a feição a ser extraída não possui uma tonalidade balanceada, o algoritmo não funcionará corretamente, pois considera a propriedade de similaridade entre os tons de cinza a partir do ponto semente selecionado (figura 12, ponto 1), não existindo similaridade com os pixels vizinhos.

O módulo *Sketch* possui ainda, um modo de extração semi-automático de rodovias (*Refine_road*). Nesta ferramenta o operador lança pontos sementes no eixo central da rodovia, e o algoritmo estima e suaviza a borda delineada, refinando a extração feita aproximadamente. Como as imagens em escala grande, não possuem a representação de uma rodovia mais generalizada, para a qual o algoritmo possa funcionar adequadamente, foi realizada outra aplicação para esta ferramenta.

No caso, como existem algumas edificações, cujos telhados são delimitados por duas bordas, optou-se por extrair o eixo central que separa essas bordas para testar a eficiência da ferramenta neste aspecto (figura 14). Nesta ferramenta, o algoritmo adiciona pontos sementes entre o ponto semente inicial e o final, selecionados pelo operador, desenhando um segmento a partir do primeiro ponto perpendicular ao segmento, conectando os dois primeiros pontos (figura 14(b)). O algoritmo irá realizar, então, uma busca ao longo da linha perpendicular, para encontrar as bordas da rodovia, obtendo três conjuntos de imagens amostradas ao longo da linha perpendicular (figura 14 (c)): um conjunto representa a borda esquerda da rodovia; outro o centro da rodovia e o outro conjunto, a borda direita. Assim, é encontrada a melhor correlação existente entre a borda esquerda, a borda direita e o eixo central da rodovia, estimando-se a localização média deste eixo. (figura 14(d)).

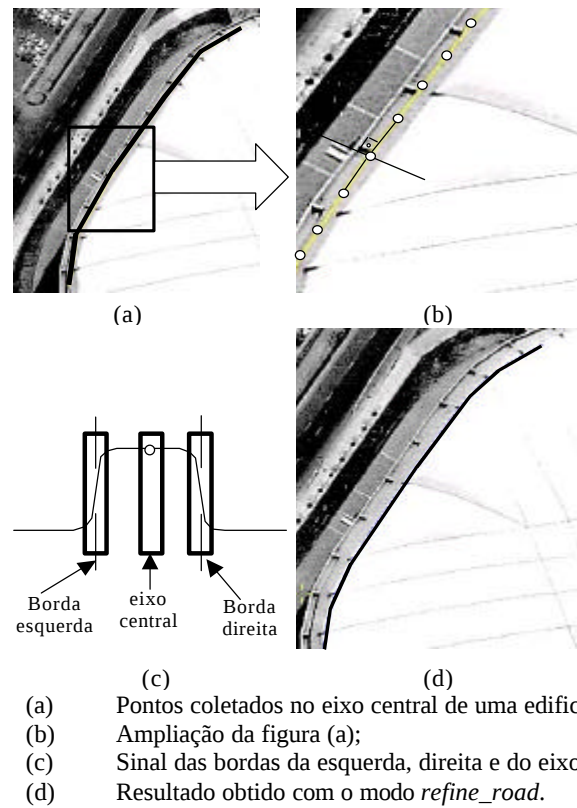


Figura 14 – Visualização do resultado obtido como o modo *refine_road*.

Analisando a figura 14, pode-se dizer que a ferramenta funciona adequadamente nesta situação, pois atinge seu objetivo, que é procurar a borda, a partir de uma extração feita no eixo central da feição, e também por representá-la perfeitamente.

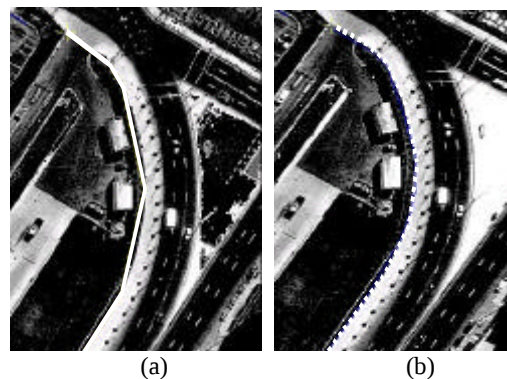


Figura 15 – Visualização da extração utilizando o modo *refine_spline_straight*.

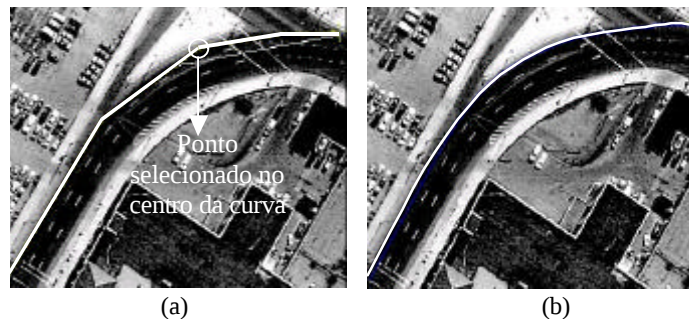
Outro tipo de algoritmo de extração semi-automática de rodovias é o de refinamento de *splines* e linhas retas (*refine_spline_straight*) (figura 15). Nesta ferramenta o operador irá extrair uma feição que possui alguns segmentos retos conectados com segmentos curvos. Para isto o operador deve lançar pontos sementes na borda da rodovia com um alinhamento reto e curvo. O algoritmo divide a feição extraída em subfeições de segmentos adjacentes retos e curvos. Os pontos dos segmentos curvos serão deslocados para a borda, enquanto os pontos do segmento reto, serão transladados e rotacionados na borda, sendo conectados a uma *spline* cúbica, e as subfeições serão juntadas em uma única feição. Posteriormente, o algoritmo suaviza as bordas eliminando pontos redundantes. Existe um valor de tolerância de 5 pixels, que limita a distância entre os pontos sementes e a borda.

Analisando a figura 15b, pode-se afirmar que o algoritmo é eficiente quando o operador lança pontos que modelam aproximadamente a feição (figura 15a). Para testar a tolerância admitida para a tomada dos pontos no modo de extração *refine*, foram realizados dois experimentos, nos quais um dos pontos foi selecionado fora do centro da curva da rodovia (figura 16a), obtendo-se como resultado uma representação incorreta da posição da feição (figura 16b). No segundo experimento o ponto foi selecionado no centro da curva (figura 17a), obtendo-se como resultado uma extração correta (figura 17b).



(a) Imagem do ponto semente tomado fora da curva;
(b) Resultado obtido após aceitar a operação;

Figura 16 - Visualização da extração utilizando a ferramenta *refine_spline*.



(a) Imagem do ponto semente tomado no centro da curva;
(b) Resultado obtido após aceitar a operação;

Figura 17 –Resultados obtidos com a ferramenta *refine* para a extração de feições.

6 CONCLUSÕES

A eficiência das ferramentas para extração semi-automática de feições, disponíveis no aplicativo Socet Set, foram identificadas, testadas e analisadas. De acordo com os testes e as análises realizadas, pode-se dizer que as ferramentas de extração semi-automática de feições que utilizam recursos de P.D.I. funcionam, mas dependem demasiadamente do operador e de sua experiência na seleção dos pontos sementes e manipulação de limiares. Quando as imagens possuem oclusões, ruídos etc, dificilmente os algoritmos serão eficientes. Verificou-se também que é mais produtivo utilizar as ferramentas existentes no sistema, do que as ferramentas geométricas oferecidas pelos CADs. Como exemplo, usando-se uma ferramenta CAD para extrair uma rodovia que possui um segmento reto conectado a um segmento curvo, deverá ser extraído o segmento reto com um tipo de ferramenta geométrica (*line*) e o segmento curvo com outra (*spline*), sendo necessário um comando para mudar de uma ferramenta para outra. Além disto, se os pontos forem coletados grosseiramente, a extração deverá ser refeita. Por outro lado, se o operador utilizar a ferramenta *refine_spline_straight*, por exemplo, os pontos podem ser selecionados aproximadamente, deixando para o algoritmo a tarefa de refinar os pontos que definem a feição a ser extraída.

Este trabalho apresentou aos operadores e usuários do aplicativo a eficiência das ferramentas de extração semi-automática de feições com Processamento Digital de Imagens, existentes no aplicativo Socet Set, mesmo que ainda não sejam exploradas pelas empresas usuárias do aplicativo. Embora sejam ferramentas semi-automáticas, sua utilização é interessante, pois contribuem para minimização do esforço operacional, bem como o tempo de extração e edição dos dados vetoriais.