

ALVARO MURIEL LIMA MACHADO

**EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE CONTORNOS DE EDIFICAÇÕES
UTILIZANDO IMAGEM GERADA POR CÂMARA DIGITAL DE
PEQUENO FORMATO E DADOS LIDAR**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Edson A.Mitishita

Co-Orientador: Prof. Dr. Ayman Habib

CURITIBA

2006

**“EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE CONTORNOS DE
EDIFICAÇÕES UTILIZANDO IMAGEM GERADA POR
CÂMARA DIGITAL
DE PEQUENO FORMATO E DADOS LIDAR”**

POR

ALVARO MURIEL LIMA MACHADO

Tese nº 044 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade
Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

Curitiba, 21 de fevereiro de 2006.



Prof. Dr. Edson Aparecido Mitshita - Orientador e Presidente (UFPR)



Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli – Membro (UNESP)

Prof. Dr. Clésio Luis Tozzi - Membro (UNICAMP)



Prof. Dr. Anselmo Chaves Neto - Membro (UFPR)



Prof. Dr. Flávio Bortolozzi (PUC-PR)



Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno - Membro (UFPR)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família:

Ao meu falecido pai, que talvez por nunca ter tido oportunidade de freqüentar uma universidade, insistia orgulhosamente em me chamar de doutor, desde que me graduei no curso de engenharia.

À minha mãe, excelente e dedicada companheira de seis meses passados no Canadá.

Aos meus filhos, Carolina, Daniel e Mariana, e ao meu neto Leonardo, esperando que este trabalho possa representar para eles um exemplo de perseverança.

À minha esposa Sandra, com profunda gratidão, pelo incentivo e apoio paciente, compartilhando diversas horas de tensão ao longo de toda a jornada.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo suporte financeiro, em forma de bolsa de estudo e estágio de doutorando no exterior (Calgary, Canadá).

À empresa AGRITEC, pelo fornecimento de imagens tomadas por câmara digital de pequeno formato Sony DSC-F717, de sua propriedade; e ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC - UFPR), pela cessão de levantamento efetuado por sistema de varredura LASER (OPTECH / INS GPS APPLANIX), ambos recursos indispensáveis, sem os quais não se poderia executar o presente trabalho.

Aos professores e funcionários do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, e Departamento de Geomática, do Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pelo suporte oferecido em todas as etapas de realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Ayman Habib (*University of Calgary - Department of Geomatics Engineering*) e seu grupo (*Digital Photogrammetry Research Group*) pelo suporte à pesquisa.

Aos companheiros de curso, pelos momentos de aflição, mas principalmente pelos momentos de alegria e descontração que pudemos compartilhar.

Finalmente, de uma maneira muito especial, agradeço ao Prof. Dr. Edson A. Mitishita, orientador, mas antes de tudo um verdadeiro amigo, pelo seu incondicional apoio, pelos seus comentários, pelas suas sugestões e críticas, sempre extremamente valiosos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE QUADROS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	5
1.1.1 Objetivo Geral	5
1.1.2 Objetivos Específicos	5
1.2 JUSTIFICATIVA	6
1.3 CONTRIBUIÇÃO DA TESE	7
2 REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1 FOTOGRAMETRIA	9
2.1.1 Referenciais	10
2.1.1.1 Referenciais Fotogramétricos	10
2.1.1.2 Referenciais no Espaço Objeto	12
2.1.2 Transformações entre Referenciais	13
2.1.2.1 Transformação Afim no Plano	13
2.1.2.2 Transformação Afim Isogonal no Espaço	14
2.1.3 Equações de Colinearidade	15
2.1.4 Refinamento de Coordenadas de Imagem	16
2.1.4.1 Distorção Radial Simétrica	18
2.1.4.2 Distorção Descentrada	19
2.1.4.3 Coeficientes de Afinidade	19
2.2 SISTEMAS LIDAR	20
2.2.1 A Tecnologia LASER	20
2.2.2 Sistema LIDAR Aerotransportado (ALS)	21
2.2.3 Aerofotogrametria e Sistemas LIDAR	24
2.2.4 Parâmetros de Configuração de Perfilamento	26
2.3 EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE EDIFICAÇÕES	28
2.3.1 Aerofotogrametria e Sistemas LIDAR	30
2.3.2 Extração de Feições	32
2.3.3 Alguns Sistemas Totalmente Automáticos	36
2.3.3.1 HAALA, 1996	36
2.3.3.2 HENRICSSON e BALTSAVIAS, 1997	38
2.3.3.3 FISCHER et al., 1998	39
2.3.3.4 BRENNER e HAALA, 1998	39
2.3.3.5 BAILLARD e ZISSERMAN, 1999	41
2.3.4 Alguns Sistemas de Reconstrução Semi-Automáticos	43
2.3.4.1 Modelador CYBERCITY	43
2.3.4.2 inJECT	44
2.3.5 Extração Automática de Edificações na Atualidade	45
2.4 CORES	48
2.4.1 Fundamentos de Cores	48
2.4.2 Fisiologia da Visão	51
2.4.3 Sistemas de Cores	52
2.4.4 CIE	56

2.4.5	Modelo XYZ	59
2.4.6	Modelo RGB	63
2.4.7	Modelo HSV.....	65
2.4.8	Modelos CIELAB e CIELUV	67
2.4.9	Diferença de Cor (? E).....	68
2.4.10	Conversões entre Sistemas de Cor	68
2.4.10.1	Conversão entre os Espaços RGB e XYZ.....	68
2.4.10.2	Conversão do Espaço XYZ para CIELAB e CIELUV	71
2.5	SUAVIZAÇÃO DE POLÍGONOS POR DOUGLAS-PEUCKER.....	72
2.6	ALGORITMO DE DESLOCAMENTO PELA MÉDIA.....	78
2.6.1	Espaço de Atributos.....	78
2.6.2	Conceitos Estatísticos	80
2.6.3	Kernel.....	81
2.6.4	Estimativa Não-Paramétrica da Função Densidade de Probabilidade	83
2.6.5	Algoritmo de Deslocamento pela Média	84
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	88
3.1	RECURSOS UTILIZADOS.....	88
3.1.1	Materiais	88
3.2	METODOLOGIA.....	93
3.2.1	Manuseio da Massa de Dados LASER.....	97
3.2.2	Refinamento das Coordenadas de Imagem	101
3.2.2.1	Câmaras	103
3.2.2.2	Transformação entre Referenciais de Imagem e Fiducial.....	104
3.2.2.3	Correção de Erros Sistemáticos	105
3.2.2.4	Introdução de Erros Sistemáticos	107
3.2.3	Referencial do Espaço-Imagem Isento de Distorções (EIID)	112
3.2.4	Segmentação por Cores (Algoritmo de Deslocamento pela Média).....	115
3.2.5	Perseguição de Contornos por Varredura Radial	120
3.2.6	Refinamento	122
3.2.6.1	Filtro para Padrão VERDE.....	123
3.2.6.2	Filtro Altimétrico	125
3.2.6.3	Filtro Douglas & Peucker	126
3.2.6.4	Fusão de Polígonos	128
3.2.7	Vetorização	129
3.2.8	Monorestituição sem Iterações	131
3.2.9	Aplicativo Desenvolvido	134
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	138
4.1	EXPERIMENTO 1	142
4.2	EXPERIMENTO 2	145
4.3	EXPERIMENTO 3	147
4.4	EXPERIMENTO 4	149
4.5	EXPERIMENTO 5	152
4.6	EXPERIMENTO 6	157
4.7	EXPERIMENTO 7	159
4.8	EXPERIMENTO 8	161
4.9	EXPERIMENTO 9	162
4.10	EXPERIMENTO 10	165
4.11	EXPERIMENTO 11	167
4.12	EXPERIMENTO 12	169

4.13	EXPERIMENTO 13	171
4.14	EXPERIMENTO 14	172
4.15	EXPERIMENTO 15	174
4.16	EXPERIMENTO 16	176
4.17	EXPERIMENTO 17	178
4.18	AVALIAÇÃO DOS FILTROS	179
4.19	ANÁLISE QUANTITATIVA DOS RESULTADOS.....	183
5	CONCLUSÃO	186
	REFERÊNCIAS	190

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - SISTEMAS DE COORDENADAS DE PIXEL, FIDUCIAL E DE IMAGEM .	11
FIGURA 2 - RECONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES (HAALA, 1996).....	37
FIGURA 3 - HENRICSSON E BALTSAVIAS (1997) - ARUBA	38
FIGURA 4 - RECONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES (BRENNER E HAALA, 1998).....	40
FIGURA 5 - RECONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES (BAILLARD E ZISSERMAN, 1999)	42
FIGURA 6 - SENSIBILIDADE DOS CONES DA RETINA EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA.....	51
FIGURA 7 - RESPOSTA LINEAR (a) E NÃO LINEAR (b)	52
FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO DE ESPAÇO DE COR.....	54
FIGURA 9 - PROCESSO ADITIVO DE MISTURA DE CORES	55
FIGURA 10 - PROCESSO SUBTRATIVO DE MISTURA DE CORES.....	55
FIGURA 11 - <i>TINTS</i> , <i>SHADES</i> E <i>TONES</i> OBTIDOS A PARTIR DA COR VERMELHA ..	56
FIGURA 12 - EXPERIMENTAÇÃO DO TRIESTÍMULO	58
FIGURA 13 - DIAGRAMA DE CROMATICIDADE DO CIE.....	60
FIGURA 14 - REPRESENTAÇÃO DE ESCALAS DE COR NO DIAGRAMA DE CROMATICIDADE DO CIE	61
FIGURA 15 - CUBO RGB.....	63
FIGURA 16 - ESPAÇO DE CORES HSV	66
FIGURA 17 - MODELO DE COR CIELAB	67
FIGURA 18 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA DIFERENÇA DE COR.....	68
FIGURA 19 - SIMPLIFICAÇÃO DE POLIGONAIS	73
FIGURA 20 - DOUGLAS-PEUCKER, PASSO 1: SELEÇÃO DO VÉRTICE 15	75
FIGURA 21 - DOUGLAS-PEUCKER, PASSO 2: SELEÇÃO DO VÉRTICE 9	75
FIGURA 22 - DOUGLAS-PEUCKER, PASSO 3: SELEÇÃO DO VÉRTICE 3	76
FIGURA 23 - DOUGLAS-PEUCKER, PASSO 4: ELIMINAÇÃO DO VÉRTICE 2.....	77
FIGURA 24 - DOUGLAS-PEUCKER, FINAL	78
FIGURA 25 - CONVOLUÇÃO	81
FIGURA 26 - FORMATO DE KERNEL	82
FIGURA 27 - TENDÊNCIA DO ALGORITMO DE DESLOCAMENTO PELA MÉDIA ...	85
FIGURA 28 - LOCALIZAÇÃO DAS FAIXAS DE VARREDURA LASER	91
FIGURA 29 - IMAGEM SELECIONADA (DSC04197.JPG)	92
FIGURA 30 - AGRUPAMENTO DE PONTOS	98
FIGURA 31 - ERROS EM PIXELS PARA A CÂMARA DIGITAL SONY DSC-F717.....	111
FIGURA 32 - ERROS EM PIXELS PARA A CÂMARA FOTOGRAFÉTRICA WILD RC- 10.....	111
FIGURA 33 - NOTAÇÃO DE VIZINHANÇA EM RELAÇÃO A UM PONTO P	121
FIGURA 34 - LOCALIZAÇÃO DO PADRÃO VERDE NO ESPAÇO DE CORES CIELUV	123
FIGURA 35 - LOCALIZAÇÃO DO PADRÃO VERDE ADOTADO	124
FIGURA 36 - PONTOS EXTREMOS DE UM POLÍGONO.....	127
FIGURA 37 - IMAGEM REAMOSTRADA ISENTA DE DISTORÇÕES.....	138
FIGURA 38 - IMAGEM REAMOSTRADA, FAIXA 3, E RECORTES 1, 2, 12.....	140
FIGURA 39 - IMAGEM REAMOSTRADA, FAIXA 5, E RECORTES 2, 3, 6, 10, 11, 13, 14, 15.....	140

FIGURA 40 - IMAGEM REAMOSTRADA, FAIXA 8, E RECORTES 4, 5, 7, 8, 9, 14.....	141
FIGURA 41 - RECORTE 01 - FAIXA 3 - SEGMENTAÇÃO.....	143
FIGURA 42 - RECORTE 01 - FAIXA 3 - FILTRO VERDE CIELUV.....	143
FIGURA 43 - RECORTE 01 - FAIXA 3 - FILTRO ALTIMÉTRICO.....	143
FIGURA 44 - RECORTE 01 - FAIXA 3 - DOUGLAS-PEUCKER.....	144
FIGURA 45 - RECORTE 01 - FAIXA 3 - FUSÃO DE SEGMENTOS.....	144
FIGURA 46 - RECORTE 01 - FAIXA 3 - VETORIZAÇÃO.....	144
FIGURA 47 - RECORTE 02 - FAIXA 3 - SEGMENTAÇÃO.....	145
FIGURA 48 - RECORTE 02 - FAIXA 3 - FILTRO VERDE CIELUV.....	146
FIGURA 49 - RECORTE 02 - FAIXA 3 - FILTRO ALTIMÉTRICO.....	146
FIGURA 50 - RECORTE 02 - FAIXA 3 - DOUGLAS-PEUCKER.....	146
FIGURA 51 - RECORTE 02 - FAIXA 3 - FUSÃO DE SEGMENTOS.....	147
FIGURA 52 - RECORTE 02 - FAIXA 3 - VETORIZAÇÃO.....	147
FIGURA 53 - RECORTE 02 - FAIXA 5 - FILTRO ALTIMÉTRICO.....	148
FIGURA 54 - RECORTE 02 - FAIXA 5 - DOUGLAS-PEUCKER.....	148
FIGURA 55 - RECORTE 02 - FAIXA 5 - FUSÃO DE SEGMENTOS.....	148
FIGURA 56 - RECORTE 02 - FAIXA 5 - VETORIZAÇÃO.....	149
FIGURA 57 - RECORTE 03 - FAIXA 5 - SEGMENTAÇÃO.....	149
FIGURA 58 - RECORTE 03 - FAIXA 5 - FILTRO VERDE CIELUV.....	150
FIGURA 59 - RECORTE 03 - FAIXA 5 - FILTRO ALTIMÉTRICO.....	150
FIGURA 60 - RECORTE 03 - FAIXA 5 - DOUGLAS-PEUCKER.....	151
FIGURA 61 - RECORTE 03 - FAIXA 5 - VETORIZAÇÃO.....	151
FIGURA 62 - RECORTE 04 - FAIXA 8 - SEGMENTAÇÃO.....	153
FIGURA 63 - RECORTE 04 - FAIXA 8 - FILTRO VERDE CIELUV.....	153
FIGURA 64 - RECORTE 04 - FAIXA 8 - FILTRO ALTIMÉTRICO.....	154
FIGURA 65 - RECORTE 04 - FAIXA 8 - DOUGLAS-PEUCKER.....	154
FIGURA 66 - RECORTE 04 - FAIXA 8 - FUSÃO DE SEGMENTOS.....	155
FIGURA 67 - RECORTE 04 - FAIXA 8 - VETORIZAÇÃO.....	155
FIGURA 68 - RECORTE 05 - FAIXA 8 - SEGMENTAÇÃO.....	158
FIGURA 69 - RECORTE 05 - FAIXA 8 - VETORIZAÇÃO.....	158
FIGURA 70 - RECORTE 06 - FAIXA 5 - SEGMENTAÇÃO.....	160
FIGURA 71 - RECORTE 06 - FAIXA 5 - VETORIZAÇÃO.....	160
FIGURA 72 - RECORTE 07 - FAIXA 8 - SEGMENTAÇÃO.....	161
FIGURA 73 - RECORTE 07 - FAIXA 8 - VETORIZAÇÃO.....	162
FIGURA 74 - RECORTE 08 - FAIXA 8 - SEGMENTAÇÃO.....	163
FIGURA 75 - RECORTE 08 - FAIXA 8 - DOUGLAS-PEUCKER.....	164
FIGURA 76 - RECORTE 08 - FAIXA 8 - VETORIZAÇÃO.....	164
FIGURA 77 - RECORTE 09 - FAIXA 8 - SEGMENTAÇÃO.....	166
FIGURA 78 - RECORTE 09 - FAIXA 8 - VETORIZAÇÃO.....	166
FIGURA 79 - RECORTE 10 - FAIXA 5 - SEGMENTAÇÃO.....	168
FIGURA 80 - RECORTE 10 - FAIXA 5 - VETORIZAÇÃO.....	169
FIGURA 81 - RECORTE 11 - FAIXA 5 - SEGMENTAÇÃO.....	170
FIGURA 82 - RECORTE 11 - FAIXA 5 - VETORIZAÇÃO.....	170
FIGURA 83 - RECORTE 12 - FAIXA 3 - SEGMENTAÇÃO.....	171
FIGURA 84 - RECORTE 12 - FAIXA 3 - VETORIZAÇÃO.....	172
FIGURA 85 - RECORTE 13 - FAIXA 5 - SEGMENTAÇÃO.....	173
FIGURA 86 - RECORTE 13 - FAIXA 5 - VETORIZAÇÃO.....	173
FIGURA 87 - RECORTE 14 - FAIXA 5 - SEGMENTAÇÃO.....	175
FIGURA 88 - RECORTE 14 - FAIXA 5 - VETORIZAÇÃO.....	175

FIGURA 89 - RECORTE 14 - FAIXA 8 - SEGMENTAÇÃO.....	176
FIGURA 90 - RECORTE 14 - FAIXA 8 - VETORIZAÇÃO	176
FIGURA 91 - RECORTE 14 - FAIXA 5 - PONTOS PRÓXIMOS DE BORDA	177
FIGURA 92 - RECORTE 14 - FAIXA 8 - PONTOS PRÓXIMOS DE BORDA	177
FIGURA 93 - RECORTE 15 - FAIXA 5 - SEGMENTAÇÃO.....	178
FIGURA 94 - RECORTE 15 - FAIXA 5 - VETORIZAÇÃO	178

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS OPTECH ALTM.....	28
QUADRO 2 - ÂNGULO DAS CORES NO ESPAÇO HSV.....	66
QUADRO 3 - PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DE CÂMARA.....	89
QUADRO 4 - INFORMAÇÕES SOBRE FAIXAS DE VARREDURA LASER.....	91
QUADRO 5 - PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR DE IMAGEM	92
QUADRO 6 - QUANTIDADE DE PONTOS DE VARREDURA LASER	93
QUADRO 7 - PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DE CÂMARA.....	104
QUADRO 8 - LUMINOSIDADE CIELUV E PARÂMETROS DE RETAS	124
QUADRO 9 - LÓGICA DE PROCESSAMENTO DE ALTIMETRIA.....	126
QUADRO 10 - DESCRIÇÃO DE SUBIMAGENS PARA EXPERIMENTOS	139
QUADRO 11 - CAPACIDADE DE FILTRAGEM.....	179
QUADRO 12 - EFETIVIDADE DE ACERTOS.....	184

RESUMO

O objetivo geral deste trabalho é o de extrair contornos de edificações automaticamente, a partir da integração de imagem tomada por câmara digital de pequeno porte com dados de varredura LASER. Assume-se o conhecimento da orientação exterior da imagem e orientação interior da câmara. Como espaço comum de trabalho, das informações provenientes da imagem e dos dados LASER, usa-se o espaço-imagem isento de distorções (EIID) relativas aos erros sistemáticos inerentes à câmara digital não fotogramétrica. Com estas diretrizes, reamostram-se, inicialmente, todos os pixels da imagem manuseada, no EIID. Neste procedimento ressalta-se a importância do emprego de métodos iterativos para a introdução dos erros sistemáticos, fazendo-se uso do método iterativo de Newton-Raphson para resolução de equações simultâneas. Pelo lado dos dados LASER, apresenta-se um procedimento para pesquisa rápida de vizinhança de pontos, e projetam-se, para o EIID, todos os pontos da varredura LASER, garantindo uma matriz regular de pontos, em conformidade com a imagem recém-amostrada. Esta imagem, no espaço-imagem isento de distorções, é segmentada segundo suas cores, no espaço de cores CieLuv, via algoritmo de deslocamento pela média (*mean shift*). Esta segmentação agrupa por região as cores semelhantes estatisticamente, diminuindo drasticamente a quantidade total de cores na imagem. Como subproduto da segmentação, obtém-se os traçados dos contornos das regiões segmentadas, via algoritmo de varredura radial. Realiza-se, a seguir, uma filtragem dos segmentos gerados, em concordância com informações de cores (tons de verde de vegetação), altitude média de regiões frente a regiões vizinhas, e grau de simplificação do polígono envolvente (Douglas-Peucker), sempre com objetivo de identificar edificações. A seguir, ajustam-se todos os pontos contidos entre cada dois pontos consecutivos segundo o algoritmo de Douglas-Peucker, obtendo-se diversas retas. Calculando-se as intersecções entre estas retas, consegue-se a vetorização da suposta edificação. Como todo pixel no EIID tem altitude associada, a projeção para o espaço-objeto das coordenadas dos cantos das edificações ocorre diretamente, sem iterações, via equações de colinearidade em sua forma inversa. Diversos experimentos realizados sobre área do Centro Politécnico - UFPR, em Curitiba/PR, são discutidos, com ótimos resultados para edificações isoladas sem árvores pelas imediações.

Palavras-chave: Monorestituição, Erros Sistemáticos, Processamento Digital de Imagens.

ABSTRACT

The main goal of this work is to develop automatic methodology to extract 2D building contours, from a small format digital camera image and laser scanning data. The external image orientation and internal camera orientation parameters are assumed to be known. As a common space to integrate information from both sources it is used the image space without distortion, named EIID space. To remove systematic errors in the original image, the Newton-Raphson iterative method for simultaneous equation is used in a resampling process to EIID space. The unorganized data points from laser scanning are sorted according some structured cells, so that their manipulation can be done in an easy and fast way. All the pixels in the EIID space gain an altitude information, some from laser data, others from interpolation. At this stage all the pixels in the EIID space have color plus altitude information. The RGB color values are transformed to (almost isotropic) CIELUV color space and the image is segmented according to these values, by mean shift algorithm. This segmentation groups the colors, in a statistical way, drastically decreasing the quantity of colors showed in the final image. Now we can get contour lines for all segments, what is done by radial sweep algorithm. The forward steps filter the segments. The first one excludes those that are near green colors (vegetation). The altimetry filter compares the mean altitude of each region with all its neighbors, and these may exclude some segments. Finally Douglas-Peucker polygonal simplification algorithm may exclude more segments. By using all the points localized between each two Douglas-Peucker simplified points we proceed to an adjustment. The next step computes the intersections completing the vectorization. As each pixel has an associated altitude, we can get the object-space coordinates without iterations. Several experiments realized over a Centro Politécnico - UFPR area, in Curitiba/PR, are discussed, with good results for isolated buildings.

Keywords: Monoplotting, Systematic Errors, Digital Image Processing.

1 INTRODUÇÃO

O homem vem se empenhando em conhecer melhor o mundo que o cerca. Com o progresso da ciência e tecnologia novos mecanismos são incorporados nesta busca, dia após dia. No âmbito das Ciências Geodésicas o posicionamento por GPS (*Global Positioning System* - Sistema de Posicionamento Global), varreduras por LIDAR (*Light Detection And Range* - Sistemas de Perfilamento a LASER), câmaras digitais de alta resolução, e Sistemas de Informação Geográfica (GIS), entre outros recursos, municiam a comunidade científica com um arsenal de informações que precisam ser devidamente exploradas.

A possibilidade de armazenar e analisar dados tridimensionais do mundo real, em formato digital, tornou-se fato comum em muitos campos da atividade humana. Nunca antes se pôde obter, visualizar e analisar tantas informações detalhadas sobre o meio ambiente como as que se tem acesso hoje em dia, graças ao aumento da capacidade de manipulação e disseminação dos computadores.

Os sistemas LIDAR, integração de sistemas LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) scanner, GPS e INS (*Inertial Navigation System* - Sistema de Navegação Inercial), emergiram recentemente como uma nova tecnologia de captura de informações sobre superfícies físicas, apresentando inúmeras vantagens sobre o processo fotogramétrico convencional. A automatização de procedimentos, aliada à precisão, acurácia e densidade das coordenadas tridimensionais dos pontos adquiridos, de forma extremamente rápida, torna a varredura pelo sistema LIDAR revolucionária.

Segundo BALTSAVIAS (1999a), o LASER scanner se constituiu em um dos desenvolvimentos tecnológicos mais importantes do final do século passado, tendo sido introduzido na comunidade de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto através das atividades de pesquisa do Instituto de Fotogrametria (Prof. F. Ackermann), da Universidade de Stuttgart, em 1988.

Os sistemas de perfilamento a LASER tem um alto potencial a ser explorado.

É uma nova tecnologia com grande margem para futuros desenvolvimentos especialmente nos componentes do sistema que permitam maior capacidade de varredura, e nos algoritmos de geração de modelos digitais, propiciando avanços na capacidade de identificação e classificação de objetos.

No campo da utilização, muitos estudiosos estão desenvolvendo pesquisas de extração automática de feições usando as características bem marcantes que o perfilamento a LASER proporciona nos modelos de elevação.

Sabe-se que a busca da automatização de procedimentos é constante na pesquisa, tendo em vista que acarreta geralmente diminuição de custos, maior rapidez, e eficiência na obtenção de resultados. Neste sentido, a automatização na geração do Modelo Digital de Superfície (DSM), realizado pelo processo de varredura de uma região pelo sistema LIDAR aerotransportado (ALS), é um dos maiores benefícios que esta tecnologia fornece. Entretanto, a enorme quantidade de informações provenientes do DSM obriga à utilização de rotinas otimizadas para manipulação desta massa de dados.

Em aplicações cartográficas, a extração de feições é fundamental no contexto de aquisição e/ou atualização de informações espaciais relacionadas aos objetos antrópicos (feitos pelo homem, como por exemplo, rodovias, edificações) e feições naturais (como por exemplo, árvores, rios). A automatização, na extração de feições, é altamente desejável, mas esta etapa envolve tarefas complexas de análise de imagens digitais aéreas ou de satélite. No planejamento urbano, onde existe grande demanda de produtos cartográficos, as edificações assumem papel primordial e, por conseguinte, a extração de edificações realizada de forma automática, ou mesmo semi-automática, vem sendo perseguida com afinco.

Infelizmente as informações provenientes do sistema LIDAR carecem de qualidade morfológica. Isto quer dizer que as linhas de quebra das feições existentes em uma região analisada não se encontram explicitamente presentes nos dados. Por conseguinte, os contornos de edificações são mal delineados (ACKERMANN, 1999; AXELSSON, 1999; HAALA et al.,1997; KRAUS e PFEIFER, 1998). Assim, o DSM

gerado pelo sistema LIDAR tende a ser suavizado, e perde informação importante sobre uma feição de terreno (KRAUS e PFEIFER, 1998). Segundo BALTSAVIAS (1999a), medições fotogramétricas ainda representam o melhor método de obtenção de informação de alta qualidade geomorfológica.

HABIB et al. (2004) observa que dados de Fotogrametria e de LIDAR têm características distintas que tornam uma metodologia ou outra preferencial para certas aplicações. Uma desvantagem nas medições fotogramétricas convencionais é contrastada por uma forte vantagem no sistema LIDAR, e vice-versa. O LIDAR fornece dados de altimetria com melhor qualidade do que planimetria, e na Fotogrametria acontece exatamente o contrário. Desta forma, uma integração entre ambos os métodos se torna altamente desejável. HABIB et al. (2004) alerta que esta informação complementar só pode ser amplamente utilizada após uma precisa calibração de ambos os sensores (LASER/GPS/INS e câmara fotográfica), que deve ser realizada de forma separada para cada um.

Outro avanço tecnológico relativamente recente ocorreu na área de equipamentos fotográficos para amadores, através das câmaras digitais não métricas e de pequeno formato. Estas câmaras apresentam custos decrescentes com resoluções crescentes. A qualidade das imagens é incontestável, mesmo das câmaras mais simples. Os parâmetros de orientação interior não são fornecidos pelo fabricante, havendo a necessidade de uma calibração prévia para uso com finalidades fotogramétricas. Na busca de informação fotogramétrica, para complementar as informações provenientes da varredura de uma região pelo sistema LIDAR, as imagens obtidas por uma câmara digital de pequeno formato são altamente convenientes.

O ser humano procura sempre enobrecer o seu trabalho, transferindo para máquinas as rotinas repetitivas e fatigantes. O tema de automatização de procedimentos fotogramétricos vem ao encontro de todos estes objetivos. A elaboração de rotinas fotogramétricas automáticas de extração de contornos de edificações é repleta de dificuldades, não tendo sido resolvida a contento ainda. Neste

caminho, todas as informações existentes e passíveis de utilização por parte de mecanismos automáticos devem ser empregadas, aumentando o grau de independência dos mesmos.

A proposta deste trabalho é a de desenvolver uma metodologia capaz de extrair contornos bidimensionais de edificações, agregando as informações espaciais obtidas pelo processo de varredura a LASER de uma região urbana qualquer, com imagens adquiridas por uma câmara digital de pequeno formato da mesma região. O processo almejado é automático, em toda sua extensão. A região utilizada para testes foi a do campus da Universidade Federal do Paraná, no Centro Politécnico. Os parâmetros de orientação interior da câmara, e exterior da imagem obtida são supostos conhecidos.

Procura-se então, algoritmos que identifiquem as edificações existentes na imagem autonomamente. A seguir os limites desta edificação devem ser pesquisados para se poder traçar os seus contornos. O processo termina com a determinação das coordenadas de terreno de todos os pontos limítrofes de todas edificações existentes na imagem.

Apresenta-se, a seguir, a definição formal dos objetivos desta tese, de forma geral e específica, bem como sua justificativa. A contribuição advinda deste trabalho é detalhada logo adiante.

A seguir, discorre-se sobre os assuntos mais relevantes, necessários para a consecução deste trabalho, fornecendo um embasamento introdutório à metodologia empregada. A revisão de literatura aborda Fotogrametria, sistemas LIDAR, extração automática de edificações, cores, algoritmo de suavização de polígonos por Douglas-Peucker, e algoritmo de deslocamento pela média (*mean-shift*).

De forma resumida, os conceitos fotogramétricos de referenciais, transformação entre referenciais, equações de colinearidade, e refinamento de coordenadas de imagem (tratamento de erros sistemáticos provenientes de distorção) são comentados. Em seguida, caracterizam-se mais adequadamente os sistemas LIDAR. Sob o título de extração automática de edificações faz-se um apanhado geral

sobre o estado da arte.

O item de cores é importante, tendo em vista a segmentação utilizada, e é onde se descreve os sistemas de cores CIE (Comissão Internacional de Iluminação). O algoritmo de suavização de polígonos de Douglas-Peucker, simples, é bastante usado neste trabalho, e por isso descrito pormenorizadamente. Mais adiante, o algoritmo de deslocamento pela média é introduzido, com o objetivo de se efetuar uma segmentação baseada em cores, conforme COMANICIU e MEER (1997).

Apresentando-se a metodologia adotada, relacionam-se inicialmente os recursos necessários. Tendo em vista o material disponível, analisa-se o mesmo sugerindo-se a abordagem descrita detalhadamente adiante. Finalmente faz-se uma análise dos resultados conseguidos, propondo-se recomendações e concluindo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é o de desenvolver e implementar uma metodologia capaz de extrair contornos bidimensionais de edificações, com vistas à automação do processo de detecção de edificações, bem como avaliação da sistemática utilizada. As informações empregadas são oriundas de uma imagem tomada por uma câmara digital Sony DSC-F717 não métrica e de pequeno formato, e de um conjunto de pontos gerados por varredura com sistema LIDAR.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos abrangem os seguintes itens:

- a) Conhecimento do estado da arte, no que se refere à extração de feições a partir de dados não organizados (nuvem de pontos de LIDAR);
- b) Geração de ferramentas de manipulação eficiente dos dados oriundos do

- sistema LIDAR;
- c) Avaliação do comportamento da câmara digital não métrica para os fins propostos;
 - d) Conhecimento do estado da arte, no que se refere à extração de feições a partir de imagens digitais;
 - e) Desenvolvimento de metodologia de extração de contornos de edificações, em imagens digitais coloridas, baseado em segmentação por cores, identificação de feições retas, detecção de cantos e de pontos críticos em poligonais (curvaturas pronunciadas);
 - f) Reconstrução vetorial dos contornos das edificações modeladas pelos processos desenvolvidos;
 - g) Providenciar robustez aos procedimentos desenvolvidos através de alternativas redundantes de aquisição de conhecimento;
 - h) Realização de experimentos com dados reais;
 - i) Avaliação da qualidade da metodologia desenvolvida.

1.2 JUSTIFICATIVA

A grande quantidade de informações provenientes dos sistemas LIDAR orienta as pesquisas mais recentes no sentido de sua utilização, muito embora existam ainda poucas aplicações capazes de manusear modelos 3D complexos, a partir desta massa de dados. A Fotogrametria não pode prescindir deste moderno dispositivo, que tem condições de fornecer, em áreas urbanas, modelos digitais de superfície acurados (HAALA et al., 1997). Estas observações justificam qualquer pesquisa abrangendo sistemas LIDAR, popularizando seu emprego, e implementando algoritmos mais ágeis e orientados para a manipulação desta informação.

Por outro lado, a automatização sempre tem sido buscada. Segundo MCINTOSH e KRUPNIK (2002), métodos fotogramétricos digitais de reconstrução automática de superfícies têm-se difundido bastante devido à alta eficiência

conseguida com baixos custos de produção, especialmente em áreas planas e abertas, com pequena e média escalas de imagem (KRZYSZEK e ACKERMANN, 1995). Entretanto, a maioria dos aplicativos desenvolvidos tem uma fraca performance em áreas com diferenças abruptas de altitude, tais como áreas urbanas (HAALA, 1999).

No presente caso, a proposta de gerar traçados de edificações parte das informações disponibilizadas por uma imagem digital e por uma varredura pelo sistema LIDAR. A natureza complementar destas duas fontes de informações tem sido amplamente reconhecida, e sua combinação tem sido sugerida pelos pesquisadores há vários anos (FRITSCH e KILIAN, 1994; HAALA, 1994). Esta sugestão tem sido reiterada mais recentemente (ACKERMANN, 1999; AXELSSON, 1999; BALTSAVIAS, 1999a; CSATHÓ et al., 1999; FRITSCH, 1999; HAALA, 1999; HAALA e ANDERS, 1997; TOTH e GREJNER-BRZEZINSKA, 1999; VOSELMANN, 1999). A abordagem de utilizar imagens para obtenção de informação precisa sobre bordas tem sido focalizada por diversos pesquisadores (ACKERMANN, 1999; AXELSSON, 1998; CSATHÓ et al., 1999; HAALA e ANDERS, 1997), sendo também a abordagem adotada nesta tese.

1.3 CONTRIBUIÇÃO DA TESE

Este trabalho contribui nos seguintes aspectos:

- a) proposição de estrutura para classificação espacial dos dados fornecidos pela varredura por sistema LIDAR, com mínimo dispêndio de memória e boa eficiência de processamento. Esta estrutura também pode ser empregada com sucesso no processamento da vizinhança n -dimensional em problemas denominados "*multidimensional range searching*";
- b) alerta para refinamento de coordenadas de imagem (tratamento de erros sistemáticos oriundos de distorções) na manipulação de imagens digitais tomadas por câmaras digitais não métricas;
- c) proposição do uso do algoritmo de deslocamento pela média, para

- segmentação de imagens coloridas, pela comunidade fotogramétrica;
- d) proposição de um filtro para a identificação das áreas verdes em uma imagem;
 - e) proposição de alternativa ao processo de monorestituição, sem iterações;
 - f) proposição de um filtro de altitude baseado na altitude média de regiões segmentadas;
 - g) proposição de emprego do algoritmo de simplificação de poligonais de Douglas-Peucker para identificação dos pontos relevantes dos polígonos extraídos em uma imagem, e detecção de segmentos de retas usando-se diferentes limiares;
 - h) proposição de emprego do algoritmo de Douglas-Peucker como coeficiente de formas retilíneas presentes em um polígono, via grau de simplificação de poligonal.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 FOTOGRAMETRIA

A Fotogrametria tem sido definida, tradicionalmente, como o processo de derivar informação métrica sobre um objeto através de observações feitas em fotografias do mesmo objeto (MIKHAIL et al., 2001). Na verdade, a moderna Fotogrametria é um ramo da ciência que, como muitos outros, sofreu um enorme impulso por força das poderosas ferramentas de processamento digital. ANDRADE (2003) apresenta uma definição bastante abrangente e que considera esta expansão, afirmando que Fotogrametria é a ciência e tecnologia de obter informações confiáveis através de processos de registro, interpretação e mensuração de imagens.

A tarefa fundamental da Fotogrametria é o estabelecimento rigoroso da relação geométrica existente entre o objeto e a sua imagem, tal qual no momento da tomada da imagem. Obtido este relacionamento, de forma correta, pode-se então extrair informações sobre o objeto, usando-se para isto tão somente o conjunto de imagens.

A possibilidade de se manusear um conjunto de imagens, em formato digital, abriu muitas possibilidades de interação com outras disciplinas. Uma delas, senão a primeira, é a de processamento de imagens, com ajuda de um computador. Vários procedimentos são aqui empregados: compressão, melhoria de qualidade e restauração, e segmentação e descrição. Este último visa criar uma correspondência entre a imagem e modelos ou primitivas acrescidos de seus atributos.

Uma segunda disciplina relacionada com a Fotogrametria digital é a de reconhecimento de padrões, onde se usa o computador para analisar as imagens com objetivos de extração automática de sinais relevantes. Ferramentas de Inteligência Artificial permitem que o computador realize atividades nas quais, no presente momento, o ser humano tem melhor desempenho, e objetivam a substituição da

participação humana no processo de análise. Quando todas estas técnicas são aplicadas em imagens, fala-se mais frequentemente em análise de imagens (IU - *Image Understanding*) e visão computacional (CV - *Computer Vision*). As metodologias de IU/CV vêm sendo incorporadas em sistemas fotogramétricos de modo crescente, sob a forma de ferramentas automáticas que diminuem as tarefas exaustivas de operação humana, melhoram a confiabilidade e aumentam a eficiência.

2.1.1 Referenciais

Para estimar a relação geométrica, entre a imagem e o mundo real, é necessário conhecer/estabelecer referenciais adequados. Os referenciais são adotados para descrever as posições dos objetos. Por exemplo, quando é necessário identificar uma determinada posição na superfície da Terra são usados os Sistemas de Referência Terrestres ou Geodésicos.

Os referenciais utilizados em Fotogrametria podem ser bidimensionais ou tridimensionais. Um sistema de coordenadas cartesianas, no espaço n -dimensional, é caracterizado por um conjunto de n retas, perpendiculares entre si, e denominadas de eixos coordenados.

Dois sistemas primários de coordenadas são considerados em Fotogrametria: sistema de coordenadas do espaço imagem, e sistema de coordenadas do espaço objeto.

2.1.1.1 Referenciais Fotogramétricos

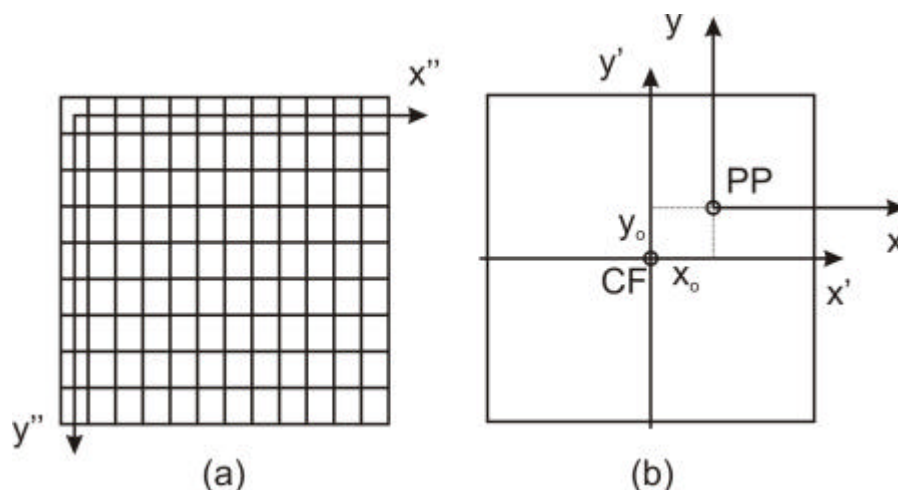
O eixo óptico de uma câmera passa pelo centro de perspectiva (CP), mais precisamente no ponto nodal anterior do sistema de lentes, e intercepta o plano da imagem em um ponto denominado ponto principal (PP). A distância do centro de perspectiva ao plano da imagem, medido ao longo do eixo óptico é chamada de distância principal. Para câmeras aéreas e outras câmeras de foco fixo, a distância principal é igual à distância focal (MIKHAIL et al., 2001).

Marcas fiduciais no plano da imagem fornecem posições de referência fixas e são visíveis na imagem. A intersecção das linhas que unem marcas fiduciais opostas define um ponto denominado centro fiducial (CF). Geralmente este ponto fica bem próximo do ponto principal, mas raramente coincide.

No espaço imagem costuma-se empregar os seguintes referenciais:

- a) Sistema de coordenadas de pixel (x'' , y'') (*pixel coordinate system*) ou sistema de coordenadas de máquina, ilustrado na Figura 1a. Tipicamente empregado em imagens digitais, tem sua origem localizada no canto superior esquerdo da imagem. Definido como um sistema de coordenadas cartesiano bidimensional levógiro: o eixo das abcissas coincide com a primeira linha da imagem, e o eixo das ordenadas coincide com a primeira coluna. As observações são mensuradas em pixels (colunas, linhas);

FIGURA 1 - SISTEMAS DE COORDENADAS DE PIXEL, FIDUCIAL E DE IMAGEM



- b) Sistema de coordenadas fiduciais (x' , y') (*fiducial coordinate system*), ilustrado na Figura 1b. Com a origem localizada no centro fiducial, é definido como um sistema de coordenadas cartesiano bidimensional dextrógiro: o eixo das abcissas coincide com a linha que conecta duas marcas fiduciais opostas, mais alinhada com a direção do vôo (direção considerada positiva); a escala é fornecida pelas localizações das marcas

fiduciais, informadas no certificado de calibração da câmera.

- c) Sistema de coordenadas fotogramétricas (x, y) (image coordinate system), ilustrado na Figura 1b. Sistema de coordenadas cartesiano tridimensional dextrógiro: a origem coincide com o centro de perspectiva (ponto nodal anterior); os eixos das abscissas e ordenadas são paralelos aos seus homônimos no sistema fiducial e orientados da mesma forma; o terceiro eixo é perpendicular ao plano da imagem.

2.1.1.2 Referenciais no Espaço Objeto

Espaço objeto é a região tridimensional de estudo, coberta pela fotografia ou imagem. Os sistemas de coordenadas (sistemas de referência geodésicos) mais comumente empregados para localizar pontos ou feições, neste espaço, apresentam três formas: cartesianos, geodésicos ou geodésicos elipsoidais e de projeção.

- a) o sistema geodésico cartesiano (dextrógiro) tem o eixo X coincidente ao plano equatorial, positivo na direção de longitude 0° ; eixo Y coincidente ao plano equatorial, positivo na direção de longitude 90° ; eixo Z é paralelo ao eixo de rotação da Terra e positivo na direção norte. A origem pode ser o centro de massa da Terra (sistema geocêntrico, por exemplo WGS84), usualmente utilizado no posicionamento de satélites, ou qualquer outro local mais conveniente para o trabalho fotogramétrico (sistema topocêntrico).
- b) o sistema geodésico elipsoidal, assim denominado devido à adoção de um elipsóide como superfície esférica de referência (datum do sistema geodésico), apresenta coordenadas denominadas de latitude geodésica, longitude geodésica e altitude geométrica.
- c) as coordenadas referidas a um determinado Sistema de Referência Geodésico podem ser representadas no plano através das componentes Norte e Leste, sendo o tipo de coordenadas normalmente encontrado em

cartas. Para se representar as feições de uma superfície curva em plana são necessárias formulações matemáticas chamadas de Projeções. Diferentes projeções podem ser empregadas na confecção de cartas, sendo que a projeção mais utilizada no Brasil é a Universal Transversa de Mercator (UTM).

O geodesta, engenheiro ou cartógrafo pode preferir trabalhar com coordenadas geodésicas elipsoidais, ou coordenadas referidas a um sistema de projeção de carta, mas de qualquer forma, estes sistemas de coordenadas têm que ser transformados no cartesiano para fins fotogramétricos.

2.1.2 Transformações entre Referenciais

Conforme visto, em Ciências Geodésicas são muitos os referenciais utilizados. A boa escolha de um referencial pode simplificar muito a resolução de um problema qualquer. Surge daí a necessidade de se transformar as coordenadas entre referenciais. Uma grande parte da Fotogrametria faz uso destas transformações. São vistas, a seguir, algumas transformações utilizadas neste trabalho.

2.1.2.1 Transformação Afim no Plano

As transformações afins são transformações lineares que preservam a colinearidade e o paralelismo. A sua forma geral no plano é:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_A + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad (01)$$

o que significa que as coordenadas no sistema B são obtidas a partir das coordenadas no sistema A, após rotação e fator de escala (matriz 2 x 2) e translação (vetor 2 x 1). Para que a transformação inversa seja definida é necessário que a matriz de rotação e de fator de escala seja tal que:

$$\det \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix} \neq 0 \quad (02)$$

Se ambos os referenciais utilizados (A e B) forem cartesianos, isto é, os seus eixos forem perpendiculares entre si, recai-se na transformação afim ortogonal, com preservação adicional de forma e comprimento:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} C_x \cos \mathbf{a} & C_y \operatorname{sen} \mathbf{a} \\ -C_x \operatorname{sen} \mathbf{a} & C_y \cos \mathbf{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_A + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad (03)$$

onde C_x e C_y são os fatores de escala segundo os eixos X e Y, respectivamente, e \mathbf{a} é o ângulo formado entre os sistemas de coordenadas A e B.

Seja o caso particular em que A é o sistema de coordenadas de pixel, e B é o sistema de coordenadas fiduciais, em uma imagem digital tomada por câmara digital de pequeno formato. Como não existem marcas fiduciais, usa-se o centro geométrico da imagem como o centro fiducial. Ambos os sistemas são perpendiculares entre si, isto é $\mathbf{a} = 0$. A transformação de coordenadas entre o sistema de coordenadas de pixel (A) e o sistema de coordenadas fiduciais (B) é dada por:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} P_x & 0 \\ 0 & -P_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_A + \begin{bmatrix} -\frac{(N_c - 1)P_x}{2} \\ \frac{(N_l - 1)P_y}{2} \end{bmatrix} \quad (04)$$

onde P_x e P_y são os tamanhos dos pixels, segundo os eixos X e Y; e N_c e N_l indicam a quantidade total de colunas e linhas (pixels), respectivamente.

2.1.2.2 Transformação Afim Isogonal no Espaço

A transformação isogonal no espaço é um caso particular da transformação afim geral no espaço, com preservação de forma (a colinearidade e o paralelismo já são preservados pela transformação afim). Também é conhecida por outras denominações: Helmert, similaridade, Euclidean, e conforme. Esta transformação

emprega sete parâmetros: um para fator de escala uniforme (I), três para rotação ortogonal (matriz ortogonal R), e três para translação entre as origens dos sistemas (x_0, y_0, z_0) .

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_B = \mathbf{I}R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_A + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (05)$$

Devido ao fato de ser ortogonal, a matriz R apresenta características tais como:

$$R^T(\mathbf{q}) = R(-\mathbf{q}) = R^{-1}(\mathbf{q}) \quad (06)$$

$$\sum_{i=1}^3 (r_{ji})^2 = \sum_{i=1}^3 (r_{ij})^2 = 1 \quad \forall j = 1,2,3 \quad (07)$$

$$\sum_{i=1}^3 r_{ji}r_{ki} = \sum_{i=1}^3 r_{ij}r_{ik} = 1 \quad \forall j, k = 1,2,3 \quad (08)$$

2.1.3 Equações de Colinearidade

A característica geométrica fundamental para o imageamento é que o centro de perspectiva, o ponto sensibilizado no espaço imagem, e o correspondente ponto no espaço objeto recaiam todos sobre uma mesma linha reta.

As equações de colinearidade traduzem este relacionamento matemático (geometria projetiva) de coordenadas fotogramétricas de pontos no espaço imagem com coordenadas de pontos no espaço objeto (MERCHANT, 1979; MITISHITA, 1997; SCHENK, 1999; MIKHAIL et al., 2001; ANDRADE, 2003):

$$\begin{aligned} x &= -c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ y &= -c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (09)$$

onde c é a constante da câmara; m_{ij} são elementos da matriz ortogonal de rotação M ; X, Y, Z são coordenadas de um ponto no espaço objeto; x, y são coordenadas do mesmo ponto no espaço imagem (fotocoordenadas); X_0, Y_0, Z_0 são coordenadas do centro perspectivo.

A matriz M é o produto de três matrizes de rotação:

$$M = R_z(\mathbf{k}).R_y(\mathbf{j}).R_x(\mathbf{w}) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

sendo que:

$$\begin{aligned} m_{11} &= \cos \mathbf{j} . \cos \mathbf{k} \\ m_{12} &= \cos \mathbf{w} . \sin \mathbf{k} + \sin \mathbf{w} . \sin \mathbf{j} . \cos \mathbf{k} \\ m_{13} &= \sin \mathbf{w} . \sin \mathbf{k} - \cos \mathbf{w} . \sin \mathbf{j} . \cos \mathbf{k} \\ m_{21} &= -\cos \mathbf{j} . \sin \mathbf{k} \\ m_{22} &= \cos \mathbf{w} . \cos \mathbf{k} - \sin \mathbf{w} . \sin \mathbf{j} . \sin \mathbf{k} \\ m_{23} &= \sin \mathbf{w} . \cos \mathbf{k} + \cos \mathbf{w} . \sin \mathbf{j} . \sin \mathbf{k} \\ m_{31} &= \sin \mathbf{j} \\ m_{32} &= -\sin \mathbf{w} . \cos \mathbf{j} \\ m_{33} &= \cos \mathbf{w} . \cos \mathbf{j} \end{aligned} \quad (11)$$

Pode-se também, de forma inversa, relacionar as coordenadas no espaço objeto com as coordenadas no espaço imagem:

$$\begin{aligned} X &= X_0 + (Z - Z_0) \frac{m_{11}x + m_{21}y - m_{31}c}{m_{13}x + m_{23}y - m_{33}c} \\ Y &= Y_0 + (Z - Z_0) \frac{m_{12}x + m_{22}y - m_{32}c}{m_{13}x + m_{23}y - m_{33}c} \end{aligned} \quad (12)$$

2.1.4 Refinamento de Coordenadas de Imagem

Vários problemas afetam a aquisição de imagens: aberrações geométricas, aberração cromática, distribuição de luz no plano focal, arrastamento da imagem, deformação do filme, curvatura da Terra, efeitos atmosféricos, etc.

Aberração é um defeito de uma imagem óptica causado pela incapacidade de um sistema de lentes de formar uma imagem perfeita. As aberrações geométricas são devidas ao formato das lentes que compõem o sistema de lentes da câmara. Seidel definiu cinco aberrações causadas pelo processo de fabricação das lentes, também conhecidas como aberrações monocromáticas: aberração de esfericidade, coma, astigmatismo, curvatura de campo e distorção. As quatro primeiras aberrações prejudicam a nitidez da imagem (círculo de confusão), enquanto que as distorções prejudicam a geometria (posição) dos objetos na imagem.

Há dois tipos de distorções: radial simétrica e descentrada. A distorção radial simétrica é devida à refração sofrida por um raio de luz ao atravessar uma lente e afeta regularmente os pontos da imagem, a partir do ponto principal de simetria. A distorção descentrada é causada pelo não-alinhamento dos eixos ópticos dos componentes da objetiva de uma câmara. Ambas são modeladas por equações matemáticas, derivadas do comportamento físico, cujos coeficientes são obtidos através do certificado de calibração da câmara.

A aberração cromática advém do fato da luz se decompor em diversos comprimentos de onda ao passar por um sistema de lentes, de modo semelhante a um prisma.

Outro problema que afeta a aquisição de imagens, a distribuição de luz no plano focal, tem como principal conseqüência o escurecimento dos cantos da imagem. Hoje em dia, através de filtros especiais, tal efeito é quase que completamente eliminado.

O movimento da plataforma (sensor em aeronave), durante o tempo de exposição, pode provocar o efeito de arrastamento da imagem, que se caracteriza por uma perda de nitidez na imagem final. O arrastamento pode ser corrigido através do uso de mecanismos de compensação de movimento (*Forward Motion Compensation*), que movem o filme durante a exposição, mantendo-o na mesma posição relativa ao terreno. As melhores câmaras hoje em dia possuem sistemas desse tipo.

A deformação do filme é causada por diversas causas tais como temperatura,

umidade, tensão, envelhecimento. Conhecer as causas do trabalho dos filmes é importante, até certo ponto, para se poder minimizá-las. São diversos os modelos matemáticos para representar a deformação do filme. A adoção de um modelo particular depende da quantidade e da distribuição do controle (marcas fiduciais) provido na câmara (ANDRADE, 2003).

Os efeitos atmosféricos variam de dia para dia. Alguns casos clássicos são: dia ensolarado, umidade, névoa atmosférica, variação do índice de refração nas camadas atmosféricas, perturbações causadas pelo deslocamento da aeronave. ANDRADE (1977) elaborou um modelo matemático para este fenômeno.

2.1.4.1 Distorção Radial Simétrica

Segundo ANDRADE (2003), a distorção radial simétrica pode ser encarada como sendo a parcela não desejável da refração sofrida por um raio de luz ao atravessar uma lente ou sistema de lentes. CONRADY (1919) desenvolveu um modelo matemático para corrigir as observações fotogramétricas da distorção radial simétrica. As componentes da distorção radial simétrica (\mathbf{d}_{rx} e \mathbf{d}_{ry}) são então calculadas a partir dos coeficientes da distorção radial simétrica fornecidos pelo certificado de calibração da câmara (k_1, k_2, k_3) e das coordenadas do ponto principal no sistema de coordenadas fiduciais (x_0 e y_0):

$$\begin{aligned}\mathbf{d}_{rx} &= (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)(x - x_0) \\ \mathbf{d}_{ry} &= (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)(y - y_0)\end{aligned}\tag{13}$$

onde:

$$r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2\tag{14}$$

As coordenadas corrigidas são, então, calculadas:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{\text{corrigido}} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{\text{observado}} - \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{rx} \\ \mathbf{d}_{ry} \end{bmatrix}\tag{15}$$

2.1.4.2 Distorção Descentrada

A distorção descentrada origina-se da impossibilidade do fabricante em alinhar perfeitamente os eixos ópticos das lentes que compõem uma objetiva, ocasionando deslocamentos da imagem. CONRADY (1919) demonstrou que a distorção descentrada é composta pelas distorções tangencial e radial assimétrica.

Na década de 1960, numa série de trabalhos publicados, BROWN (1964, 1965, 1966) adaptou o trabalho de CONRADY (1919) para aplicações fotogramétricas (ANDRADE, 2003), sendo este modelo denominado, então, de Conrady e Brown (MITISHITA, 1997).

As componentes de distorção descentrada (\mathbf{d}_{dx} e \mathbf{d}_{dy}) são calculadas por:

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_{dx} &= P_1[r^2 + 2(x - x_0)^2] + 2P_2(x - x_0)(y - y_0) \\ \mathbf{d}_{dy} &= 2P_1(x - x_0)(y - y_0) + P_2[r^2 + 2(y - y_0)^2] \end{aligned} \quad (16)$$

onde r é calculado conforme equação (14); P_1 e P_2 são os coeficientes da distorção descentrada (fornecidos pelo certificado de calibração da câmara); x_0 e y_0 são as coordenadas do ponto principal no sistema de coordenadas fiduciais.

As coordenadas corrigidas são, então, calculadas:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{\text{corrigido}} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{\text{observado}} - \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{dx} \\ \mathbf{d}_{dy} \end{bmatrix} \quad (17)$$

2.1.4.3 Coeficientes de Afinidade

Os parâmetros de afinidade modelam a possibilidade de não ortogonalidade e diferença de escala entre os eixos x e y do sistema de coordenadas de imagem. Segundo GALO (1993), e REISS (2002), este efeito ocorre em câmaras digitais quando o pixel possui dimensões diferentes em X e Y , ou seja, não é perfeitamente quadrado; e/ou o sensor CCD não é perfeitamente perpendicular ao eixo óptico.

A formulação matemática empregada por MONIWA (1977) calcula a correção da distorção de afinidade (\mathbf{d}_{ax} e \mathbf{d}_{ay}), sendo A, B parâmetros de afinidade; x ,

abscissa de um ponto qualquer referido ao sistema fiducial; x_0 e y_0 são as coordenadas do ponto principal no sistema de coordenadas fiduciais:

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_{ax} &= A(x - x_0) \\ \mathbf{d}_{ay} &= B(x - x_0) \end{aligned} \quad (18)$$

As coordenadas corrigidas são, então, calculadas:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{\text{corrigido}} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{\text{observado}} - \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{ax} \\ \mathbf{d}_{ay} \end{bmatrix} \quad (19)$$

2.2 SISTEMAS LIDAR

2.2.1 A Tecnologia LASER

A idéia originária do LASER emergiu por volta de 1905, quando Albert Einstein sugeriu as emissões de luz estimuladas. Fontes de luz como velas, substâncias fluorescentes, e lâmpadas, emitem quantidades de energia, chamadas fótons, quando seus átomos são excitados pela energia. Einstein sugeriu que estes átomos poderiam ser estimulados artificialmente para emitir fótons. Esta emissão estimulada de luz iria produzir uma fonte de luz altamente concentrada, brilhante, e poderosa, que poderia ser utilizada em diversas tarefas.

Embora estes princípios fossem conhecidos, isto não contribuiu para a construção do LASER senão muito tempo depois, porque a tecnologia para alcançar os objetivos ainda não existia. Charles Townes obteve sucesso em 1954, quando construiu o que ele denominou de MASER (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ou amplificação de microondas pela emissão estimulada de radiação). O MASER estimulava os fótons na frequência das microondas, transformando o MASER numa fonte amplificadora de microondas.

Logo após a invenção do MASER, muitos cientistas começaram a se interessar pela idéia de construir um MASER óptico, que breve receberia o nome de

LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ou amplificação da luz pela emissão estimulada de radiação). Todos sabiam que três ingredientes eram essenciais para construir o LASER: um material fluorescente que deveria emitir luz quando estimulado pela radiação de uma fonte energia externa, dois espelhos opostos nas laterais do material fluorescente, capazes de aprisionar o feixe de luz amplificado, e uma fonte de energia externa.

Theodore Maiman, físico norte-americano, foi o primeiro a montar com sucesso um LASER óptico, a base de rubi, em 1960. Maiman publicou seu experimento de sucesso, mas sua importância não foi reconhecida imediatamente. Lentamente outros cientistas começaram a construir seus próprios LASERs e rapidamente se descobriu que outros materiais, além do rubi, poderiam ser utilizados como emissor. E então, mais e mais experimentos da era dos LASERs nasceram.

O que torna a luz do LASER tão especial é a sua coerência (sincronicidade de fases). A contribuição de cada átomo é "coerente" com a luz que atravessa o material. Com tais características de coerência, alta intensidade, e precisão direcional, entre outras, o LASER tem sido utilizado em inúmeras aplicações que não seriam possíveis com luz comum. Isto propiciou o surgimento da gravação e reprodução de CDs e DVDs, da fibra óptica, do código de barras e até de mísseis teleguiados. Na Medicina, o LASER se consagrou como um instrumento ideal para cirurgias delicadas, permitindo cortes mais precisos, com a consequente redução de sangramentos e do tempo de recuperação do paciente.

2.2.2 Sistema LIDAR Aerotransportado (ALS)

O LASER também tem sido empregado na medição de distâncias, quer operado manualmente ou automaticamente, no solo (terrestre) ou em aeronaves. Nos últimos dez anos, o interesse em sistemas LIDAR aerotransportados (*Airborne LASER Scanning - ALS*) tem crescido enormemente, podendo-se dizer que esta tecnologia está passando agora para a sua maturidade, devendo apresentar grandes e importantes

evoluções.

A maioria dos sistemas ALS disponíveis comercialmente utilizam o mesmo princípio: uma aeronave sobrevoa uma região e o equipamento LASER (*LASER Range Finder*) efetua uma varredura no chão em direção perpendicular à direção do voo, determinando a distância ao terreno; esta distância é calculada como uma função do tempo exigido pelo raio LASER para ir e voltar do equipamento até o terreno, na velocidade da luz.

Um sistema integrado com GPS-INS (*Global Positioning System - Inertial Navigation System*) provê a posição e a atitude do veículo aéreo a qualquer tempo, de forma que é possível determinar a posição espacial dos pontos que refletem o raio LASER. O sistema GPS é utilizado em modo cinemático pós-processado, requerendo um segundo receptor que deve ser colocado como estação-mestre, em um ponto de coordenadas conhecidas. Estações permanentes também podem ser aproveitadas se forem próximas da região levantada. Usualmente os sistemas de varredura LASER também são equipados com uma ou mais câmaras que provêm uma documentação visual das regiões varridas. Esta documentação visual pode ser muito importante na etapa de processamento dos dados obtidos.

O veículo aéreo tanto pode ser um avião como um helicóptero. No primeiro caso a produtividade é privilegiada, enquanto que no segundo caso pode-se obter um detalhamento maior da região, pois helicópteros podem voar mais baixo e em velocidades menores do que aviões. Os dispositivos para um helicóptero são normalmente colocados em uma única caixa especial fixada embaixo do mesmo.

A frequência do raio LASER se situa na faixa de 500 a 1500nm, com valores típicos de 1040 a 1060nm. Estas frequências não são absorvidas pelo terreno, mas sim refletidas. Elas também são refletidas pelas vegetações e pelas nuvens, de forma que não se pode operar com nuvens se interpondo entre a aeronave e o terreno. Entretanto os sistemas de varredura a LASER apresentam mais condições operacionais do que os instrumentais fotogramétricos: eles não sofrem com a falta de iluminação ou com sombras. Como seus sensores são ativos, é possível utilizá-los durante qualquer parte

do dia e em qualquer estação. Por esta razão os sistemas LIDAR têm sido usados para avaliações rápidas de danos causados por desastres naturais tais como terremotos, furacões, inundações, e para planejamento efetivo de emergências. Deve-se observar que a água é um poderoso absorvente de raios LASER nas frequências usuais, com reflexo de sinal fraco (ângulo de varredura não maior que 10°).

Na concepção do sistema, a luz do LASER foi preferida por causa de sua baixa divergência, tornando seu percurso similar à concepção geométrica da linha reta, mesmo quando o diâmetro de seu cone visual (*footprint*) esteja entre 0,30 m e 1,50 m. Como consequência, múltiplas reflexões são permitidas quando, por exemplo, o raio atinge uma árvore e uma parte do mesmo é refletida pelas folhas e outra parte é refletida pelo chão, chegando depois à aeronave. Múltiplas reflexões constituem uma poderosa ferramenta, e fornecem elementos para a determinação da altura da vegetação existente em uma região.

Define-se taxa de penetração à razão entre a quantidade de pulsos refletidos pelo solo e a quantidade total de pulsos emitidos. ACKERMANN (1996) demonstrou que, se a vegetação não for muito densa, de 20% a 50% dos raios LASER atingem o solo. Pela mesma razão, a varredura a LASER pode ser empregada para detectar cabos suspensos, tais como linhas de transmissão: os fios são finos, mas graças à grande quantidade de raios emitidos e ao seu tamanho não desprezível, a probabilidade de encontro com o fio é notavelmente alta.

As múltiplas reflexões de um raio chegam ao receptor em tempos diferentes, de forma que elas podem ser discriminadas. Alguns receptores são capazes de detectar até sete diferentes ecos, enquanto outros podem registrar apenas o primeiro e o último pulsos juntos, e outros ainda podem detectar ou o primeiro (modo de primeiro pulso) ou o último (modo de último pulso) exclusivamente, dependendo do modo operacional selecionado. Uma boa escolha do modo de gravação permite atingir bons e efetivos resultados: se o objetivo for o levantamento de linhas de transmissão ou topos de árvores, o modo de primeiro pulso se torna necessário; se o objetivo for a determinação da altitude de um terreno recoberto de vegetação, então o modo de

último pulso será a melhor escolha, de modo que o modelo digital de superfície gerado pela varredura a LASER contenha a maior quantidade possível de pontos refletidos pelo solo.

Deve-se salientar que não basta selecionar o modo correto de gravação para a geração do modelo digital de terreno de uma área que contenha vegetação, mas também é necessário filtrar os dados durante a etapa de pós-processamento, de forma que os ecos das vegetações sejam suprimidos, mantendo apenas os pontos refletidos pelo terreno. Isto não é uma tarefa trivial, e muitas soluções foram apresentadas (KRAUS e PFEIFER, 1998). A idéia básica é que os pontos do solo representam uma parte significativa do conjunto de dados, e apresentam, na mesma área, uma menor altitude do que os pontos refletidos pelas vegetações.

O primeiro produto da varredura LASER de uma determinada região é um conjunto de pontos irregularmente distribuídos, constituindo um modelo digital de superfície (DSM) da região percorrida. A densidade de pontos obtidos atinge vários pontos por metro quadrado, e depende principalmente da altitude de vôo. Tais pontos podem ser usados diretamente ou podem ser filtrados e interpolados de forma a criar uma rede regular de pontos.

2.2.3 Aerofotogrametria e Sistemas LIDAR

Comparando-se os sistemas de varredura a LASER com as técnicas fotogramétricas pode-se dizer que os pulsos de LASER são menos afetados por obstruções em seu caminho. Os sistemas a LASER apresentam semi-ângulos de abertura entre 7° a 25° , enquanto câmaras fotogramétricas apresentam normalmente semi-ângulos de 37° ou mais. Uma diferença tão grande no ângulo de abertura implica conseqüências negativas, já que uma fotografia métrica engloba uma faixa maior do que a levantada pela varredura a LASER. Destarte, para se efetuar a varredura de uma área global usa-se de recobrir a mesma através de vários sobrevôos. Cada sobrevôo dá origem a uma faixa de captura contínua. As varreduras são em formato de zig-zag

transversal ao vôo (sistemas Optech).

A varredura LASER é uma técnica monoscópica, de modo que um único pulso LASER atingindo o solo já é suficiente para que se obtenha a altitude naquele ponto, enquanto que pela Fotogrametria torna-se necessário que o mesmo ponto seja claramente visível em duas fotografias, pelo menos, para se determinar a altitude do solo, e isto é probabilisticamente muito difícil em terrenos recobertos de árvores. Os sistemas de varredura a LASER operam igualmente muito bem sobre superfícies homogêneas como desertos, o que usualmente traz dificuldades durante as medições fotogramétricas, pela falta de pontos identificáveis.

Durante o vôo, as medições efetuadas pelos diferentes dispositivos: GPS, INS, transmissor e receptor de pulsos LASER, e câmaras, são registradas independentemente, sendo que cada medida é associada com um tempo comum derivado do GPS. Estes registros de tempo permitem que todas as medidas sejam sincronizadas posteriormente, no processamento dos dados obtidos.

Depois do vôo, os sistemas GPS e INS são combinados para fornecer a posição e a atitude da aeronave em cada tempo. A seguir, determina-se o ângulo que todo pulso emitido formava com a aeronave no momento de sua emissão, e isto, juntamente com a posição e a atitude da aeronave no tempo considerado, permite a reconstrução da linha percorrida por um pulso LASER específico no espaço. Finalmente, o comprimento do caminho descrito pelo raio é utilizado para a determinação das coordenadas do ponto refletor (ou pontos refletores, no caso de múltiplos ecos) no sistema WGS84. Atingindo-se este estágio, duas conversões são usualmente aplicadas, do referencial WGS84 para algum outro referencial nacional ou regional, e das altitudes elipsoidais para altitudes ortométricas. Estas transformações não são estritamente relacionadas com a varredura a LASER, mas sim mais apropriadamente com o sistema GPS, e suas soluções são bem conhecidas. Para a primeira conversão aplica-se uma transformação espacial de sete parâmetros (três deslocamentos, três rotações, e um fator de escala). A segunda conversão exige o conhecimento da ondulação geoidal.

As análises de precisão envolvem muitos parâmetros: as características dos equipamentos utilizados, a altitude de vôo, tipo de terreno e declividade e sistema inercial de navegação (INS) empregado. Em qualquer caso pode ser dito que o desvio padrão de cada componente das coordenadas de um ponto varia entre 10 cm e 50 cm, sendo que a componente altimétrica é a mais precisa. Como exemplo, pode-se citar o sistema Optech ALTM3100, com precisão planimétrica igual a 1/2000 da altura utilizada no levantamento (um sigma), e precisão vertical igual ou menor a 15cm para levantamentos até 1,2km de altura (um sigma).

Um aspecto importante no processamento de dados de uma varredura a LASER é que ele é majoritariamente automático, e isto torna esta técnica interessante também sob o aspecto de comparação econômica com a Fotogrametria, mesmo que as faixas de captura de dados sejam estreitas. Apesar deste avanço, a Fotogrametria continua fornecendo a técnica mais potente e completa para o conhecimento global de uma região. Os sistemas de varredura a LASER preenchem um espaço complementar muito importante.

2.2.4 Parâmetros de Configuração de Perfilamento

Tomando-se como exemplo o sistema ALTM 2050, da empresa canadense Optech, tem-se que alguns parâmetros podem ser configurados de forma a se obter uma característica de perfilamento adequada aos interesses do trabalho. Tais parâmetros são: frequência de emissão de pulso LASER ou taxa de amostragem (f), frequência de varredura (r), e ângulo de varredura (q). Em combinação com a altura de vôo em relação ao solo (h), a velocidade da aeronave (v), e a distância entre linhas de vôo, estes parâmetros determinam a densidade e a distribuição da amostragem do solo a ser pesquisado.

A largura total da faixa varrida (L) depende do ângulo de varredura e da altura de vôo, segundo a relação

$$L = 2 * h * tg q \quad (21)$$

sendo que o fator 2 aparece na equação porque q representa na realidade um semi-ângulo.

Durante um período de varredura (inverso da frequência de varredura r) amostram-se dois perfis de terreno (duas linhas de varredura), concluindo-se que o tempo para se varrer um perfil considerado é dado por $1/(2*r)$. Como consequência, tem-se que a quantidade de pontos por perfil ou linha de varredura (P) pode ser dada por

$$P = \frac{f}{2*r} \quad (22)$$

Continuando, tem-se que a distância entre pontos pertencentes a um perfil considerado (L/P), em situação hipotética em que o LASER scanner estivesse em repouso, seria dado por

$$\frac{L}{P} = \frac{4*h*r*tgq}{f} \quad (23)$$

Como o sistema ALTM é aerotransportado, deve-se considerar a resultante de distância entre a situação hipotética anterior e a distância percorrida pela aeronave ($d = v*t = v/f$). Como resultado tem-se que a distância real entre pontos em um perfil considerado (d) é

$$d = \frac{\sqrt{v^2 + (4*h*r*tgq)^2}}{f} \quad (24)$$

A distância máxima entre dois perfis consecutivos ocorre em suas extremidades, com $d_{max} = v/r$.

Usando-se a maior altura de vôo (2000m) e o maior ângulo de varredura (20°) permissíveis, no sistema Optech ALTM 2050, obtém-se 1455m como sendo a maior largura de faixa configurável. Por outro lado, usando-se um ângulo de varredura igual a 0° produz-se uma varredura longitudinal extremamente densa (714 pontos por metro, assumindo-se velocidade da aeronave igual a 70m/s = 252km/h) ao longo da linha de vôo.

Pode-se obter varreduras transversais muito densas utilizando-se frequência

de varredura igual a 1Hz (mínima dependente de modelo). Aumentando-se esta frequência, a distância entre perfis vizinhos é reduzida, enquanto que a distância entre pontos amostrados em uma linha de varredura é aumentada.

Os sistemas de varredura a LASER continuam sendo desenvolvidos, podendo-se ver no Quadro 1 uma comparação entre as características de alguns dos mais recentes equipamentos produzidos pela Optech Inc, incluindo o sistema ALTM 2050.

QUADRO 1 - CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS OPTECH ALTM

Características\SISTEMAS	ALTM 2050	ALTM 1225	ALTM 1020
Ano do modelo	2003	2000	1993 e 1997
Taxa de amostragem (f)	Até 50KHz	Até 25KHz	Até 5KHz
Frequência de varredura (r)	Até 35Hz	Até 35Hz	Até 35Hz
Ângulo de varredura (q)	0 - $\pm 20^\circ$	0 - $\pm 20^\circ$	0 - $\pm 20^\circ$
Altura de operação	210 - 2000m	300 - 2000m	330 - 1000m
Modo (pulso)	Primeiro e/ou último	Primeiro e/ou último	Primeiro ou último
Intensidade	Sim	Sim	Não
Vídeo	Sim	Sim	Sim
Câmara digital	4k x 4k pixels	Não	Não

2.3 EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE EDIFICAÇÕES

A extração automática de objetos, a partir de varreduras realizadas por sistemas LASER e imagens tem sido um tópico de intensas pesquisas durante décadas (GRÜN et al., 1995, GRÜN et al., 1997, BALTSAVIAS et al., 2001). O grande interesse da comunidade científica foi motivado pela necessidade óbvia de automatizar ou facilitar os processos manuais de aquisição de dados. Recentemente, temas como realidade aumentada e navegação pessoal têm enfatizado ainda mais a urgente necessidade de sistemas de extração eficiente de feições antrópicas. Tais temas têm sido discutidos ativamente pela comunidade científica, tornando-se claro que qualidade e facilidade de uso são chaves essenciais para o sucesso.

É evidente que o esforço realizado nas etapas de levantamento e atualização de dados espaciais é bastante alto. Com a expectativa crescente de mais informações, por parte dos usuários, esta situação se torna mais problemática. Verifica-se, hoje, que projetos de ampliação de sistemas geográficos de informação abrangendo a terceira

dimensão, como, por exemplo, modelos tridimensionais de cidades, não podem ser realizados de forma econômica. A razão para isto é que a informação tridimensional não só é de obtenção mais difícil (mais cara), como também sua taxa de mudança é maior do que aquela relativa aos dados bidimensionais.

Pode-se identificar algumas das principais dificuldades, existentes na prática de aquisição de informação espacial, como sendo:

- a) o grau de automação existente nos sistemas de aquisição de dados é muito baixo e, se não bastasse isto, os resultados de pesquisas não são incorporados prontamente aos sistemas em produção. Os casos em que uma empresa realiza um levantamento fotogramétrico de uma grande área urbana, e emprega digitalização manual de todos os pontos (vários pontos por edificação), não constituem novidades. Isto representa um esforço enorme e, adicionalmente, qualquer atualização do banco de dados gerado exigirá quase a metade do custo inicial de aquisição;
- b) existe uma carência de sistemas automatizados que combinem geoinformação proveniente de diferentes fontes. Tomando-se mapas digitais de rodovias, como exemplo, a produção de sistemas geográficos com informações consistentes é bastante facilitada quando todo o aspecto de sua geração encontra-se sob controle da mesma empresa. Infelizmente esta não é a tendência. Diversas fontes de dados devem ser combinadas a fim de produzir o produto final, e sistemas tridimensionais de navegação devem ter a capacidade de integrar malhas rodoviárias bidimensionais com modelos tridimensionais de terreno e de superfície das edificações. Dificilmente um único produtor de mapa será capaz de levantar dados para atualizar todos estes conjuntos de dados. Desta forma procedimentos automáticos de alto grau são necessários para resolver este problema eficientemente.

Torna-se claro, então, que a automatização de procedimentos para levantamento de dados, automatização de procedimentos de atualização, e

combinações de diferentes dados de diversas fontes são problemas atuais que estão interrelacionados. O progresso nestes tópicos é crucial para o desenvolvimento de sistemas geográficos de informação.

2.3.1 Aerofotogrametria e Sistemas LIDAR

A Aerofotogrametria foi e ainda é uma das formas preferenciais de aquisição de dados tridimensionais da superfície terrestre. Sendo bem fundamentada e fornecendo resultados bastante precisos, tem como grande desvantagem o fato de que a automação dos seus processos de levantamento de dados depende da compreensão automática de imagens - problema de difícil solução. Muito progresso tem acontecido desde a década de 1980, especialmente no campo de correlação de imagens para geração de Modelos Digitais de Terreno (ACKERMANN e KRZYSZEK, 1991). Entretanto, estes métodos não são adequados para a obtenção da superfície em áreas urbanas, onde geralmente muitas bordas com desnível estão presentes, muito embora algum progresso também tenha acontecido neste campo (PAPARODITIS et al., 2001). Ainda se depende fortemente da qualidade da imagem e do contraste existente entre duas regiões adjacentes na imagem.

Com o desenvolvimento dos equipamentos ALS, na década de 90, o georeferenciamento direto se tornou viável com precisão adequada. Hoje em dia, a varredura por sistema LIDAR aerotransportado se tornou uma tecnologia robusta, sendo oferecida por diversas empresas que vendem sistemas e/ou serviços (BALTSAVIAS, 1999b). Levantamentos de grandes áreas tornaram-se viáveis, como por exemplo o perfilamento de toda a Holanda, ou do estado alemão de Baden-Württemberg, ambas áreas maiores que 30000 km².

Quando o primeiro levantamento por sistema LIDAR foi efetuado, especulou-se que a aerofotogrametria tornar-se-ia obsoleta em algumas atividades. Os perfilamentos por sistema a LASER provaram ser bastante efetivos para a geração de modelos digitais de superfície, mas tornou-se claro, também, que as duas tecnologias

são complementares:

- a) a Aerofotogrametria digital permite medições de pontos singulares e de estruturas, geralmente definidas por um operador humano, com bastante precisão. Isto se dá porque as bordas de um objeto qualquer, visível na imagem, podem ser delineadas precisamente. Seu maior problema reside no baixo grau de automatização, apesar dos enormes esforços de pesquisa até o momento;
- b) os perfilamentos por sistema a LASER provêm nuvens densas de pontos tridimensionais diretamente medidos. A densidade de pontos e o grau de preservação dos desníveis de bordas tornam a integração de processos automatizados – tal como segmentação por faixas de altitudes – relativamente simples. A principal desvantagem do sistema LIDAR aerotransportado é que o raio LASER simplesmente amostra a superfície da terra segundo algum padrão fixo: ele não é capaz de ser apontado diretamente para algum objeto em particular, nem tampouco captura linhas de quebra. Como consequência desta forma de trabalho tem-se que estes dados são bastante adequados para a determinação de superfícies planares, mas não das bordas de tais superfícies (imprecisão).

Segue-se que o melhor compromisso existente é o de conjugar aerofotogrametria com perfilamentos por sistema a LASER com fins de obtenção de automatização, robustez, e precisão. Segundo ACKERMANN (1999):

“A combinação sistemática de levantamentos digitais por sistemas a LASER com dados de imagem constituirão uma fusão efetiva na Fotogrametria, sob pontos de vista metodológicos e tecnológicos. O estado presente de competição se transformará em alto nível de integração e cooperação mútua, resultando em sistemas tremendamente versáteis com imenso potencial de aplicação. (...) Seria uma revolução total na Fotogrametria se dados de imagem pudessem ser combinados diretamente com dados espaciais de posição.”

É por esta razão que as empresas de produção dos equipamentos LIDAR

estão integrando câmaras digitais em seus sistemas, enquanto por outro lado os fornecedores de serviços aerofotogramétricos estão incluindo sistemas LIDAR em suas linhas de produção.

Apesar dos progressos havidos com sistemas LIDAR e aquisição de imagens digitais, o processamento automático dos dados resultantes encontra-se num estágio bem rudimentar. Por exemplo, os dados oriundos dos sistemas de perfilamento a LASER têm sido muito usados para produzir Modelos Digitais de Terreno (DTM), que podem ser obtidos a partir da nuvem de pontos originais (medidos) através de algoritmos de interpolação – que não são muito diferentes dos módulos fotogramétricos de DTM que têm sido usados há mais de três décadas. Somente em áreas especializadas, tais como geração de Modelos Digitais de Terreno em áreas alagadas, ou levantamentos de linhas de transmissão, existem alternativas novas de automatização de extração de feições utilizando propriedades específicas dos conjuntos de dados oriundos dos levantamentos efetuados com sistemas LIDAR.

2.3.2 Extração de Feições

A extração de objetos produzidos pelo homem diz respeito à questão de reconhecimento de objetos (compreensão automática de imagens). Como tal, torna-se parte integrante de uma área de pesquisa muito extensa (GRIMSON, 1990; JAIN e FLYNN, 1993; FAUGERAS, 1994) – uma discussão aprofundada deste tema encontra-se fora dos objetivos deste trabalho.

MAYER (1999) e SHUFELT (1999) pesquisaram sobre o estado da arte das técnicas de extração automática de edificações. Ambos concluíram que um sistema totalmente automático ainda estava longe de ser desenvolvido. Por outro lado, as abordagens semi-automáticas vêm se tornando importantes (SAHAR e KRUPNIK, 1999).

VOSSelman e SUVEG (2001) analisaram a fusão de imagens e dados de varredura LASER com mapas bidimensionais de contornos de edificações, e

concluíram que, geralmente, tais elementos são insuficientes para a elaboração de um sistema de reconstrução de edificações totalmente automático.

Segundo BRUNN (1998) a extração automática de edificações compreende duas fases: a primeira, denominada de detecção de edificações, abrange os métodos para detectar as regiões de interesse onde existem edificações potenciais, e o segundo, denominado de reconstrução das edificações, consiste na determinação dos parâmetros geométricos das edificações encontradas na região de interesse. Estas fases nem sempre podem ser identificadas claramente porque a primeira fase pode fazer uso, em maior ou menor grau, do conhecimento de modelos geométricos implícitos, executando, desta forma, algumas tarefas pertinentes à segunda fase.

BRENNER (1999) altera apenas a nomenclatura, concordando com duas fases nem sempre fáceis de serem distinguidas:

- a) estruturação dos dados de entrada: Esta fase compreende a extração das feições ou estruturas relevantes, tais como linhas retas em imagens digitais, descontinuidades de superfície e/ou regiões co-planares no DSM, bem como a aplicação de certas regras de agrupamento (pesquisa de retas paralelas ou ortogonais);
- b) reconstrução geométrica: As estruturas extraídas na fase anterior devem ser combinadas de forma a gerarem um modelo de edificação consistente.

Em todos os estágios do processo de extração de edificações, o conhecimento sobre as edificações tem que ser usado, isto é, o computador tem que utilizar elementos básicos de identificação sobre o que é uma edificação. Assim, um banco de dados contendo o conhecimento inerente a um modelo de edificação tem que estar disponível. Este conhecimento pode ser adotado implicitamente, aplicando certas regras na extração das edificações, a partir dos dados originais, e agrupando as feições extraídas, em diversos estágios de agregação, ou explicitamente através do fornecimento de um banco de dados com modelos explícitos de edificações (conjunto de primitivas de edificações).

Existem diversos sistemas propostos por pesquisadores para a extração de

objetos produzidos pelo homem. Eles podem ser classificados segundo as fontes de dados empregadas, o modelo utilizado para o objeto (representação adotada), e o tipo de operação pretendida: semi-automático ou totalmente automático.

Diversas fontes de dados podem ser usadas para o propósito de extração de edificações. As mais importantes compreendem:

- a) imagens aéreas: Oferecem o potencial de alta precisão, mas devido a problemas radiométricos, e problemas devidos a oclusões, a automação dos processos de extração de edificações torna-se muito difícil, especialmente em áreas com alta densidade de edificações;
- b) Modelos Digitais de Superfície (DSM): Tais modelos podem ser derivados indiretamente através de técnicas de comparação de imagens aéreas ou imagens de RADAR, com sobreposição, ou diretamente de dados obtidos em varreduras por sistemas LASER. Este último sistema apresenta explicitamente densas nuvens tridimensionais de pontos, com menos oclusões, devido aos pequenos ângulos de abertura e, aparentemente, oferece maior facilidade na separação das feições objetivadas do que as imagens aéreas. Entretanto, dados de varredura de alta densidade por sistemas LASER ainda são caros;
- c) GIS (sistemas geográficos de informação) bidimensionais ou dados de mapas: Estes dados fornecem informação extremamente precisa para a detecção de edificações, e auxiliam na fase de reconstrução. Apresentam a desvantagem de não conterem informação para a reconstrução tridimensional, e edificações não existentes na base de dados não podem ser extraídas.

Quanto aos modelos utilizados para os objetos a serem extraídos, tem-se preocupações com a representação do conhecimento, e com a representação interna adotada. Neste último caso, dois tipos de modelagem são comumente empregados (ENGLERT, 1998; BRENNER, 1999; MULLER, 1998):

- a) representação por contorno das edificações: As edificações são

representadas pelo seu contorno, juntamente com suas interseções e vizinhanças (MÄNTYLÄ, 1988; KOEHL, 1997);

- b) Geometria Sólida Construtiva (CSG - *Constructive Solid Geometry*): A CSG é uma técnica para a modelagem de sólidos, que define sólidos complexos pela composição de sólidos simples (primitivas). As edificações são representadas por um conjunto de primitivas, sendo cada uma delas descrita por um conjunto de parâmetros envolvendo características tridimensionais dos objetos, tais como posição, orientação, comprimento, largura, altura, etc. (MÄNTYLÄ, 1988).

Quanto à representação do conhecimento necessário para a extração das edificações, existem três possibilidades para este propósito:

- a) modelos parametrizados ou específicos: Compreende primitivas básicas tais como edificações com cobertura tipo meia-água, duas águas, etc. A topologia destas primitivas é fornecida por um banco de dados englobando todos os tipos de primitivas disponíveis. Somente os parâmetros geométricos devem ser ajustados;
- b) modelos genéricos: Estes modelos não definem explicitamente o formato da edificação, mas oferecem a possibilidade de obtenção da mesma através de uma formulação consistente. Dependendo do nível de detalhe que pode ser descrito pelos modelos genéricos, diversos exemplos podem ser encontrados (BRENNER, 1999):
- modelo prismático: Uma edificação prismática é caracterizada por dois planos horizontais (cobertura e terreno) e um conjunto de n planos verticais (paredes);
 - modelo poliédrico: Um modelo bastante genérico que pode ser usado para representar todo tipo de edificação ladeada por paredes verticais planas. Usualmente este tipo de modelo adota a representação por contorno das edificações.
- c) combinações de primitivas simples com o intuito de modelar edificações

mais complexas (ENGLERT, 1998). O conceito de combinar primitivas através de operadores lógicos (booleanos) corresponde ao modelamento de edificações por CSG.

2.3.3 Alguns Sistemas Totalmente Automáticos

Alguns sistemas totalmente automáticos de extração de edificações são descritos resumidamente a seguir, apresentando-se apenas uma pequena seleção. O leitor interessado deve consultar *Ascona Proceedings* (GRÜN et al., 1995, GRÜN et al., 1997, BALTSAVIAS et al., 2001) que fornecem um excelente panorama.

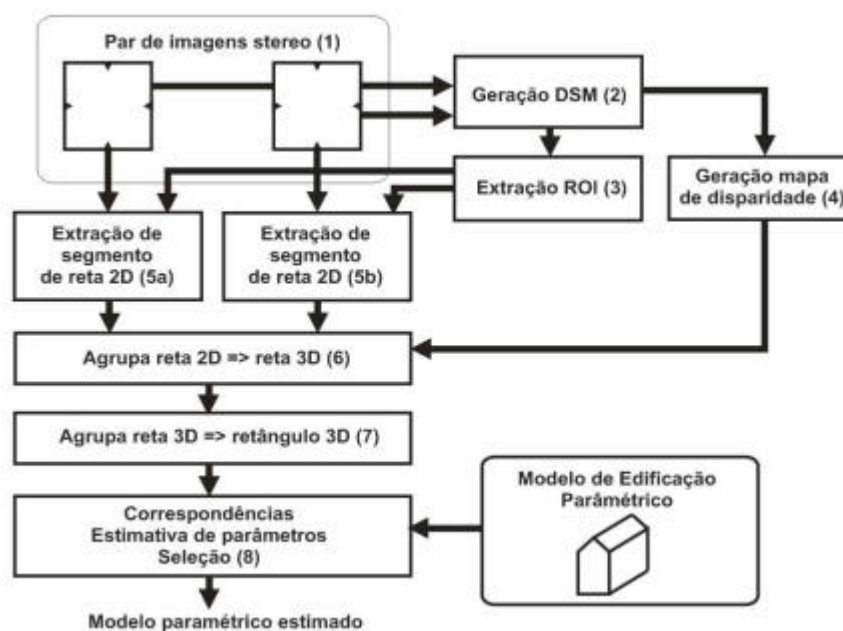
2.3.3.1 HAALA, 1996

Em sua tese de doutorado HAALA (1996) propôs um método (ver Figura 2) para extração de edificações a partir de um par de imagens com sobreposição (1). O Modelo Digital de Superfície (DSM) é gerado utilizando-se correspondência convencional de imagens (2). Extraí-se, a seguir, regiões de interesse (3), denominadas ROI, usando-se abordagem morfológica. Determina-se, desta forma, as regiões com possível presença de edificações. O DSM também é empregado para a geração de um mapa de disparidades (4) entre as imagens da esquerda e da direita, componentes do par original. Em cada imagem extraí-se separadamente segmentos de retas (5a, 5b), pesquisando-se as áreas delimitadas anteriormente (ROI).

A seguir, usando-se o mapa de disparidade, os segmentos de retas bidimensionais de cada imagem são agrupados constituindo segmentos de retas tridimensionais (6), e uma primeira verificação de consistência ou filtragem pode ser executada. Os segmentos de retas tridimensionais filtrados são, então, agrupados no espaço objeto pesquisando-se a formação de retângulos (7) conjuntamente com uma segunda filtragem das primitivas. Utilizando-se a disposição dos retângulos no espaço objeto, parâmetros aproximados para as primitivas de edificação existentes podem ser determinados. Estes parâmetros são ajustados de forma a minimizar a distância entre

os segmentos de retas tridimensionais e os segmentos de reta componentes do modelo adotado. Finalmente, estimativas de erro e variâncias do tom de cinza das imagens são empregados no processo de seleção da melhor adaptação de modelo, dentre o conjunto disponível (8).

FIGURA 2 - RECONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES (HAALA, 1996)



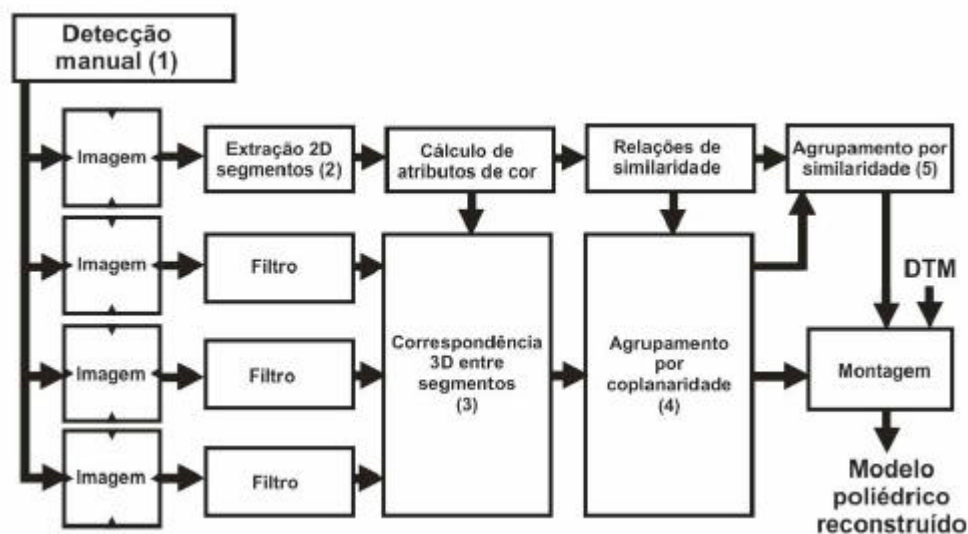
FONTE: ADAPTADO DE BRENNER (2003)

Esta metodologia tem como característica a filtragem passo a passo das primitivas, as quais, eventualmente, levam à reconstrução de uma edificação. O objetivo é atingido através de (a) uso de informação tridimensional na forma de DSM e mapa de disparidades; (b) agregação de primitivas de alto nível, como, por exemplo, agrupando segmentos de retas, gerando segmentos maiores, retas paralelas, ou retângulos, (c) transformação do espaço-imagem bidimensional para o espaço-objeto tridimensional, envolvendo o uso de limiares significativos, como ângulos, áreas, etc, e (d) ajustamento de parâmetros para achar a solução e estudo de resíduos para sua avaliação. As limitações desta abordagem são: a dependência de um DSM de boa qualidade, sua utilidade somente em áreas suburbanas, e a concentração em um tipo único de primitiva.

2.3.3.2 HENRICSSON e BALTSAVIAS, 1997

A metodologia apresentada por HENRICSSON e BALTSAVIAS (1997), denominada ARUBA, também utiliza imagens aéreas para a extração das edificações (ver Figura 3). O processo de reconstrução inicializa com uma região fornecida pelo operador (1). A seguir, de forma similar à abordagem de HAALA (1996), segmentos de reta são extraídos (2), agregados a segmentos tridimensionais (3), e utilizados em um esquema de teste de hipóteses de planos de cobertura das edificações (4). Um agrupamento por similaridade (5), proposto por HENRICSSON (1996), é empregado para encontrar os planos mais evidentes e consistentes. Finalmente as paredes laterais são construídas usando o DTM.

FIGURA 3 - HENRICSSON E BALTSAVIAS (1997) - ARUBA



FONTE: ADAPTADO DE BRENNER (2003)

Uma característica importante desta abordagem é o uso da informação de cor. Os atributos de cor são calculados tanto para o lado esquerdo quanto para o lado direito dos contornos recém extraídos. Esta informação é usada durante o processo de comparação de imagens, agrupamento por coplanaridade e agrupamento por similaridade. O sistema ARUBA não é capaz de manusear as imagens em áreas de alta densidade urbana. Os autores discutem duas possibilidades para extensão do sistema: uso mais rígido de modelos de objetos e integração mais forte de um operador no

processo de reconstrução de edificações.

2.3.3.3 FISCHER et al., 1998

Este trabalho (FISCHER et al, 1998) foi o resultado de um extenso projeto de pesquisa. Baseia-se no conceito de modelos hierárquicos. Em cada camada, existem quatro representações: o modelo do objeto tridimensional e uma instância sua, bem como a projeção bidimensional do modelo do objeto também com a sua instância. Desta forma, obtém-se em todas as camadas uma forte integração entre as estruturas bidimensionais e tridimensionais. Observe-se que, de forma similar aos trabalhos anteriores (HAALA, 1996) e (HENRICSSON e BALTSAVIAS, 1997), os modelos tridimensionais encontram-se presentes. A integração realizada em cada camada envolve não só a projeção da geometria, mas também a propagação das limitações ou restrições e controles de qualidade. Por exemplo, o paralelismo nas estruturas tridimensionais é propagado, para a imagem bidimensional, como um paralelismo tolerante aos erros existentes nos parâmetros da transformação.

Definiu-se as seguintes camadas como níveis hierárquicos no espaço objeto (BRAUN et al., 1995): cena, objeto, parte de objeto, feição agregada, feição, voxel. No espaço imagem, respectivamente, tem-se: imagem, aspecto, parte do aspecto, feição agregada, feição, pixel.

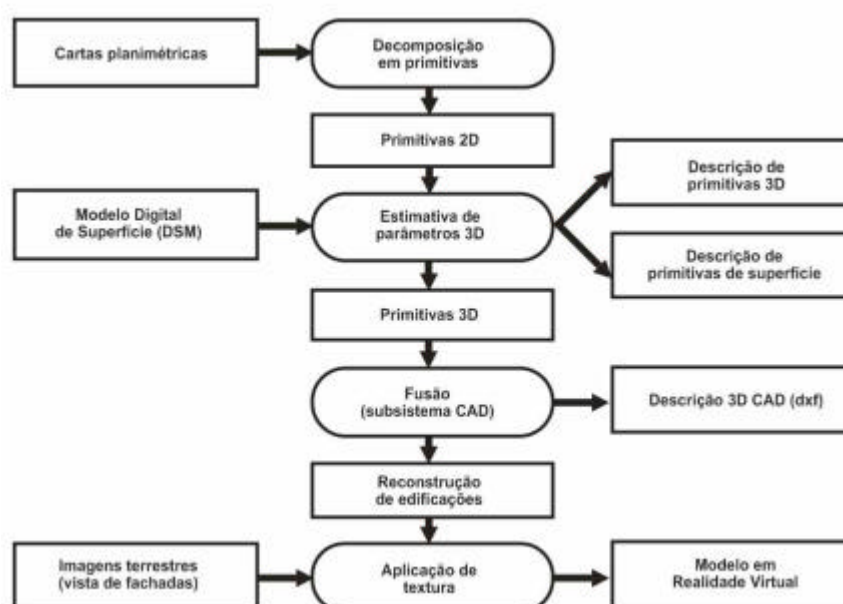
2.3.3.4 BRENNER e HAALA, 1998

Em contraste com os sistemas mencionados anteriormente, esta metodologia utiliza modelos digitais de superfície (DSM), e cartas planimétricas, como fontes de dados para o processo de reconstrução automática ou semi-automática (BRENNER e HAALA, 1998).

A Figura 4 apresenta o fluxo do algoritmo de reconstrução. As fontes de dados se encontram à esquerda, os resultados à direita. Dois ícones centrais, referentes a decomposição em primitivas e estimativa de parâmetros 3D, marcam os locais onde

dados derivados automaticamente podem ser modificados ou melhorados. O processamento inicia pela decomposição de polígonos, provenientes das cartas planimétricas, em primitivas bidimensionais (retângulos) automaticamente. Cada primitiva bidimensional origina, de forma correspondente, uma primitiva tridimensional. Localização, orientação, e tamanho das primitivas 2D aplicam-se igualmente às primitivas 3D.

FIGURA 4 - RECONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES (BRENNER E HAALA, 1998)



FONTE: ADAPTADO DE BRENNER (2003)

Restam para serem determinados os parâmetros do telhado (tipo: meia-água, duas águas, plano horizontal, etc), altura da edificação, e inclinação das coberturas. Baseando-se em segmentação, certos tipos de telhados são eliminados de antemão. Por exemplo, a primitiva de telhado plano horizontal não será levada em consideração como uma reconstrução possível se a área total, ou um percentual de pixels planos horizontais, estiverem abaixo de um determinado limiar. Um ajustamento por mínimos quadrados calcula, então, o melhor conjunto de primitivas para o DSM dado. Quando diversos modelos são viáveis, aquele com o menor resíduo é selecionado.

Depois deste passo, as primitivas reconstruídas separadamente são agrupadas, formando sólidos 3D que se encaixam. A saída do processo pode ser na forma de uma lista de descrições de sólidos ou uma lista de faces planares. Algumas vezes deseja-se achar um determinado descritor de edificação (estrutura básica sem fusão de blocos). Como problema padrão CSG, um núcleo CAD (*Computer Aided Design* = Projeto Assistido por Computadores) é utilizado para executar as operações necessárias. Finalmente, o descritor de edificação é encontrado, e pode ser exportado e convertido para diferentes formatos de aplicativos CAD.

A vantagem desta abordagem reside na extração de informação simbólica de alto nível das cartas bidimensionais, provendo confiabilidade ao processo de reconstrução. Também, como a informação bidimensional é usada como ponto de partida, as conexões entre o banco de dados original e o final 3D (aumentado) são estabelecidas facilmente. Por outro lado, o método não reconstrói edificações para as quais não existe evidência nas cartas planimétricas originais, ou existe grande diferença entre o contorno da edificação imageada e a representada nas cartas.

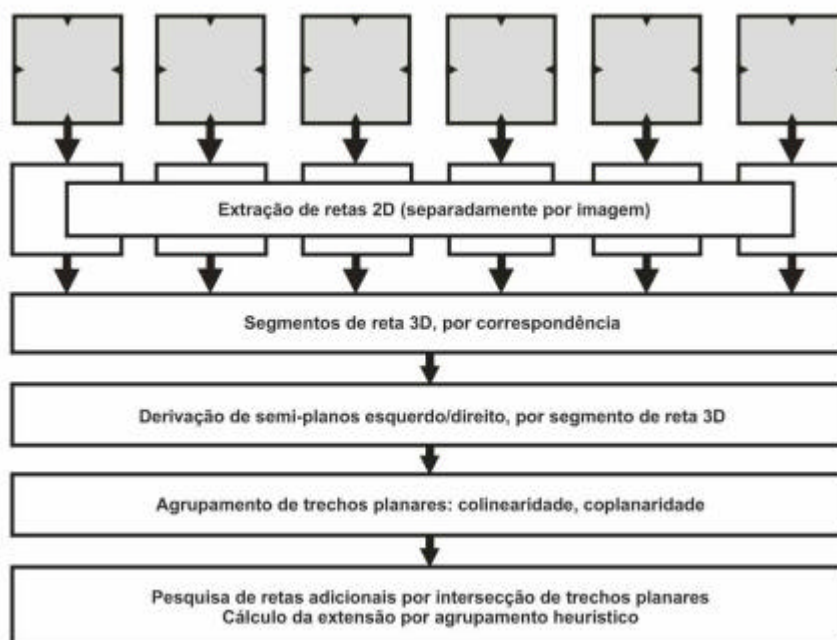
2.3.3.5 BAILLARD e ZISSERMAN, 1999

Consiste numa abordagem de reconstrução por modelos poliédricos baseada nas intersecções entre os diferentes planos encontrados na cobertura das edificações (BAILLARD e ZISSERMAN, 1999). A idéia principal é a de obter os semi-planos à direita e esquerda da aresta do ângulo diedro. A vantagem, em comparação com outras abordagens, é o uso de informação local (nas vizinhanças da aresta do ângulo diedro). Seis aerofotos com sobreposição são utilizadas (*multiview*).

O algoritmo (ver Figura 5) primeiramente extrai segmentos de retas em cada uma das imagens. Usando agrupamento de linhas (BAILLARD et al., 1999), baseando-se em geometria e radiometria das seis imagens, geram-se segmentos de retas tridimensionais. A seguir, os semi-planos, da esquerda e direita de cada segmento de reta, são calculados. Como os semi-planos são injuncionados pelo segmento de reta

3D (aresta de ângulo diedro), pertencente aos mesmos, resta somente a determinação da inclinação. Isto é realizado através da pesquisa exaustiva de todos os ângulos desde -90 graus até +90 graus, calculando-se uma medida heurística de correspondência. Esta medida baseia-se em uma correlação ponderada entre as imagens, onde a transformação geométrica é fornecida pela equação do plano e as orientações exteriores. Todas as imagens são utilizadas. Não se levando em consideração outros fatores eventuais, o ângulo com o maior escore é selecionado.

FIGURA 5 - RECONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES (BAILLARD E ZISSERMAN, 1999)



FONTE: ADAPTADO DE BRENNER (2003)

Seguindo-se este procedimento, segmentos de reta e semi-planos são agrupados com base em colinearidade e coplanaridade, em processo que reduz a quantidade total de planos utilizados. Retas adicionais são introduzidas pela intersecção dos planos existentes, e a extensão de cada região é obtida a partir de agrupamentos heurísticos. Cada superfície é, então, verificada por uma medida de similaridade calculada sobre todas as imagens.

2.3.4 Alguns Sistemas de Reconstrução Semi-Automáticos

2.3.4.1 Modelador CYBERCITY

Seguindo a estratégia semi-automática de "TOBAGO" (GRÜN e DAN, 1997), o Modelador "CyberCity" foi proposto em 1998 (GRÜN e WANG, 1998), sendo oferecido comercialmente. Este modelador baseia-se em medições manuais de pontos correspondentes em imagens. Utiliza dois passos básicos.

No primeiro passo, uma nuvem de pontos, ditos fracos estruturalmente, são obtidos por observações estéreo manuais. Todos os pontos são localizados na cobertura das edificações, incluindo projeções salientes no telhado. A nuvem de pontos é estruturada de duas formas: primeiro, os pontos são observados segundo uma certa ordem, e segundo, os pontos são identificados por determinados códigos que guiarão o segundo passo, automático. Isto pode ser obtido pelo posicionamento dos pontos em camadas predeterminadas, uma funcionalidade geralmente disponível em aplicativos CAD ou fotogramétricos.

O segundo passo envolve um processamento totalmente automático que utiliza uma abordagem de relaxação para identificar a topologia do telhado. Após, usando as correspondências conhecidas entre planos e pontos, corrige-se as posições dos pontos usando ajustamento pelos mínimos quadrados. O resultado deve ser conferido, pois em alguns casos o relaxamento pode concluir por uma topologia incorreta. Entretanto, (GRÜN e WANG, 1998) apresentam taxas de sucesso da ordem de 95% para este passo de estruturação automática.

Comparando-se com um processo inteiramente manual, o modelador "CyberCity" somente automatiza o passo de identificação de topologia. As observações de pontos não são agilizadas. Como o modelamento é baseado somente em pontos e superfícies planares, a estratégia permite a reconstrução de superfícies poliédricas genéricas de telhado, ao contrário de métodos que usam um conjunto limitado de primitivas de edificações.

2.3.4.2 inJECT

Este sistema foi desenvolvido na Universidade de Bonn ao longo de um grande período. Ele evoluiu a partir das primeiras abordagens, denominadas "Hase", "Hase+", e "ObEx" (GÜLCH et al., 1999; GÜLCH et al., 1998). Atualmente tem sido apresentado comercialmente sob o nome de "inJECT". As edificações são modeladas usando uma quantidade limitada de primitivas paramétricas. Estas primitivas tem como objetivo modelar a cobertura das edificações, definindo blocos sólidos parametrizáveis. A seleção da primitiva apropriada é realizada manualmente pelo operador. Após, a estrutura básica do modelo é sobreposta em duas imagens e o operador pode adaptar os parâmetros de forma tal que haja concordância.

Existe um modo dirigido onde o operador é convidado a observar determinados pontos. Por exemplo, para uma edificação com telhado em forma de duas águas, o operador deve medir apenas dois pontos, nas extremidades da aresta do ângulo diedro, em uma imagem. Depois disto, o sistema tenta localizar os pontos correspondentes na outra imagem, bem como os demais parâmetros automaticamente.

Depois da etapa automática, o operador pode avaliar o resultado e pode corrigir via observações manuais, se necessário. GÜLCH et al. (1999) informa que os métodos automáticos apresentam uma taxa de sucesso da ordem de 50-90%. Edificações mais complexas são subdivididas pelo operador em partes menores e são modeladas independentemente. Estas partes são fundidas posteriormente, para a obtenção da edificação final, por aplicativos CAD externos.

O uso desta geometria sólida construtiva (CSG) permite reduzir consideravelmente a quantidade de observações exigidas por parte do operador. O processo de correspondência automática, junto com procedimentos de limitação aos movimentos de operação (*snapping*), restringem ainda mais as observações necessárias. Por outro lado, assim como qualquer sistema que adote CSG como princípio modelador, tem-se que algumas edificações mais complexas não conseguem ser modeladas, ou apresentam grandes dificuldades, por causa da utilização do

conjunto fixo de primitivas disponíveis.

2.3.5 Extração Automática de Edificações na Atualidade

Hoje, depois de aproximadamente duas décadas de pesquisa no tópico de extração automática de edificações, ainda não se dispõe de nenhum sistema totalmente automático, e existe um sentimento geral crescente de que ainda vai ter que se esperar por outro período igual (FÖRSTNER, 1999). Neste meio tempo, existem alguns sistemas semi-automáticos sendo vendidos como produtos, os quais integram automatização em determinadas etapas. Estes sistemas são importantes não só porque nos dão idéia do que esperar, em melhoria de rendimento na execução de procedimentos semi-automáticos, mas também porque apresentam procedimentos protótipos que podem ser enriquecidos ao longo do tempo, aumentando a quantidade de tarefas automáticas (grau de automatização). É interessante observar, entretanto, os princípios gerais que norteiam as pesquisas na atualidade:

- a) modelamento. Utiliza modelos poliédricos genéricos, construídos a partir de vértices, linhas ou planos observados. Neste caso, a dificuldade é saber como adicionar restrições, tais como retangularidade, paralelismo, duas coberturas de edificações com mesma inclinação, quatro superfícies de telhado incidindo em um mesmo ponto, etc. Alternativamente, pode ser usado o modelamento CSG, que impõe estas restrições automaticamente, como parte das definições das primitivas geométricas. Geralmente, CSG também é mais natural no trato com o operador humano, muito embora edificações que não se enquadram nas primitivas fiquem difíceis de serem manipuladas. Neste caso, prefere-se subdividir a edificação em blocos menores enquadrados nas primitivas empregadas.
- b) princípios básicos de reconstrução. Existem algumas idéias básicas que evoluíram, tornando os sistemas de reconstrução melhores que seus predecessores:

-) exploração de informação existente nos atributos, ou segmentação polimórfica. Por exemplo, quando da extração de linhas, extrai-se também, se possível, regiões à esquerda e à direita das mesmas. O emprego de características das cores destas regiões, para a avaliação das linhas, também deve ser considerado, bem como correlação das regiões para a recuperação de planos no espaço.
-) uso de correspondência com o espaço-objeto. Por exemplo, verificando-se se os segmentos de reta extraídos a partir de múltiplas imagens (espaço bidimensional) são correspondentes, paralelos, formam retângulos, etc checando as propriedades dos respectivos segmentos no espaço-objeto (tridimensional).
-) modelos de reconstrução hierárquicos/multicamadas podem ajudar no processo de reconstrução.
-) utilização de restrições geométricas sempre que possível. Estas restrições podem ser derivadas da geometria do local, como linhas epipolares, mínima e máxima altitudes conhecidas, bem como restrições relativas ao modelo como paralelismo, retangularidade, limitações para ângulos, etc.
-) extração de continuidade/descontinuidade conforme os dados disponíveis. Por exemplo, com imagens é frequentemente mais simples extrair segmentos de linhas (descontinuidades), enquanto que com DSM's é frequentemente mais fácil extrair regiões homogêneas (continuidades), tais como superfícies planares.

O processo de reconstrução de edificações pode ser dividido nas diferentes fases de detecção, reconhecimento, reconstrução geométrica e derivação adicional de atributos, quando possível.

Constituem problemas que devem ser contornados:

- a) incerteza. A representação da incerteza é um dos problemas mais difíceis de se tratar. Pode-se representar a incerteza de entidades geométricas

como pontos, linhas, planos e objetos derivados através da construção destas entidades. Mas quão certo é o resultado de uma segmentação, especialmente quando diferentes fontes de informações são combinadas? Como se deve tratar o caso em que uma pequena diferença (contínua) na geometria conduz a uma topologia completamente diferente (diferença discreta)? Embora não existam respostas fáceis, sempre é bom pensar em qual mecanismo (ponderação simples, lógica fuzzy, etc.) deve ser usado para combinar diferentes informações.

- b) consistência topológica. A representação de polígonos em duas dimensões ainda é um problema difícil, e isto se torna pior no caso de três dimensões. Modelos poliédricos de edificações não devem conter superfícies duplas, nem buracos (descontinuidades de superfície), nem quaisquer polígonos com formas finas e alongadas. Isto não é sempre obtido, visto que os modelos são usualmente construídos a partir de medições realizadas, e não em um processo idealizado de construção como é o caso de um ambiente CAD. Pequenos erros nas medições (e claro, arredondamentos) frequentemente causam tais incoerências.
- c) generalização. Nem sempre este problema é comentado, e algumas vezes as pessoas nem se preocupam com ele. Por exemplo, dada uma rede triangular irregular (TIN) densa de pontos tridimensionais da cobertura de uma edificação, a "melhor reconstrução poliédrica" do telhado é a própria TIN (porque é a superfície com a menor distância aos dados TIN originais, mais apropriadamente zero). Entretanto, o que se procura é um modelo mais simples, não muito distante dos dados originais, mas ignorando partes não importantes tais como chaminés. Em outras palavras, procura-se um equilíbrio entre simplicidade de descrição e diferença com os dados originais. Quando se usa CSG, o nível de generalização é implicitamente definido pelas primitivas empregadas. Desta forma, quando uma metodologia constrói uma cobertura de

edificação a partir de uma segmentação genérica de superfícies planares, o nível de generalização pretendido deve ser consubstanciado através de outras observações.

Resumindo-se, pode-se dizer que o processo de reconstrução de edificações completamente automático, a partir de dados de varredura LASER e imagens, não foi resolvido ainda. Por outro lado, existe uma demanda crescente de informações georeferenciadas (tridimensionais), tais como, modelos super-detalhados, exigindo a captura de fachadas usando equipamentos de varredura terrestre LASER e Fotogrametria de curta distância.

2.4 CORES

A metodologia desenvolvida neste trabalho emprega segmentação da imagem segundo suas cores no espaço CIELUV, conferindo importância ao embasamento que se segue.

2.4.1 Fundamentos de Cores

As cores são resultantes da interação entre a fonte de luz, o objeto e o sistema visual humano, denominado como observador. De acordo com FRASER et al. (2005), a cor é uma sensação experimentada pelo observador frente aos comprimentos de onda da luz produzida pela fonte de luz e modificada pelo objeto.

Embora o processo seguido pelo cérebro humano na percepção de cores seja um fenômeno físico-psicológico que ainda não é completamente compreendido, a natureza física das cores pode ser expressa numa base formal suportada por resultados experimentais e teóricos.

A luz branca do sol é composta de radiações de diferentes comprimentos de onda, cada um correspondendo a uma cor particular. Segundo GRANDIS (1986), Isaac Newton foi o primeiro a demonstrar este fato experimentalmente em 1676, posicionando um prisma de vidro no caminho do feixe de luz do sol e projetando seus

raios refratados pelo prisma numa tela. Foi possível observar uma série de cores diferentes e identificar sete delas organizadas da mesma maneira que se vê o fenômeno do arco-íris. De acordo com a definição das regras de refração pela Lei de *Snell*, o comprimento de onda curto resulta no maior desvio (ângulo de incidência versus ângulo de refração) e o comprimento de onda longo resulta no menor desvio. Através desta regra foi derivada e fixada a organização das sete cores, na ordem de maior para menor desvio, nomeadas violeta, índigo, azul, verde, amarelo, laranja e vermelho.

Pode-se então dizer que as fontes luminosas brancas possuem todos os comprimentos de onda. Em consequência, uma fonte luminosa colorida tem um comprimento de onda dominante. Quando os comprimentos de onda da fonte de luz atingem um objeto, a superfície do objeto absorve alguns comprimentos de onda do espectro e reflete os não absorvidos, que são percebidos pelo sistema visual humano como a cor do objeto (*X-RITE: The Color Guide and Glossary*).

A caracterização da luz é essencial para a ciência das cores. Se a luz for acromática (sem cores), seu único atributo será sua intensidade, ou quantidade. A luz acromática é aquela que se vê num aparelho de televisão branco e preto, e o termo nível de cinza refere-se a uma medida escalar de intensidade que varia do preto aos tons de cinza, e finalmente ao branco.

A luz cromática abarca o espectro de energia eletromagnética desde aproximadamente 400nm até 700nm. Três valores básicos são usados para descrever as características de uma fonte de luz cromática: radiância, luminância e brilho. Radiância é a quantidade total de energia que flui de uma fonte de luz, sendo usualmente medida em watt (W). Luminância, medida em lúmen (lm), dá uma medida da quantidade de energia que um observador percebe de uma fonte de luz. Por exemplo, a luz emitida de uma fonte operando no infravermelho distante poderia ter energia significativa (radiância), mas um observador dificilmente a perceberia; sua luminância seria quase zero. Finalmente, o brilho é um descritor subjetivo, que é praticamente impossível de ser medido. Ele incorpora a noção acromática de intensidade, indicando a quantidade de luz, sendo um dos fatores chave na descrição

da sensação de cores.

De acordo com FRASER (2005), a diferença entre brilho e luminosidade, para a maioria das aplicações, pode ser desconsiderada, pois ambos fazem referência à percepção humana (não-linear) da intensidade. Por definição, luminosidade é o brilho relativo, ou seja, luminosidade é o brilho de um determinado objeto tendo o branco absoluto com referência. A luminosidade varia de escuro a claro tendo como limites definidos o preto e o branco, respectivamente; enquanto o brilho varia de escuro (turvo) a claro. É importante distinguí-los, pois pode-se medir a luminosidade e associar um valor numérico a ela, enquanto que o brilho é uma sensação subjetiva na mente do ser humano.

As características normalmente usadas para distinguir uma cor da outra são brilho, matiz e saturação. Como já indicado, o brilho incorpora a noção cromática de intensidade. Matiz é um atributo associado como comprimento de onda dominante em uma mistura de ondas de luz. Assim, quando se chama um objeto de vermelho, laranja, ou amarelo, está-se especificando o seu matiz. A saturação refere-se à pureza relativa ou quantidade de luz branca misturada com um matiz. As cores do espectro puro são completamente saturadas. Cores tais como cor-de-rosa (vermelho e branco) e lilás (violeta e branco) são menos saturadas, com o grau de saturação sendo inversamente proporcional à quantidade de luz branca adicionada.

O matiz e a saturação, quando tomados juntamente, são chamados cromaticidade, e, portanto, uma cor pode ser caracterizada pelo seu brilho e cromaticidade.

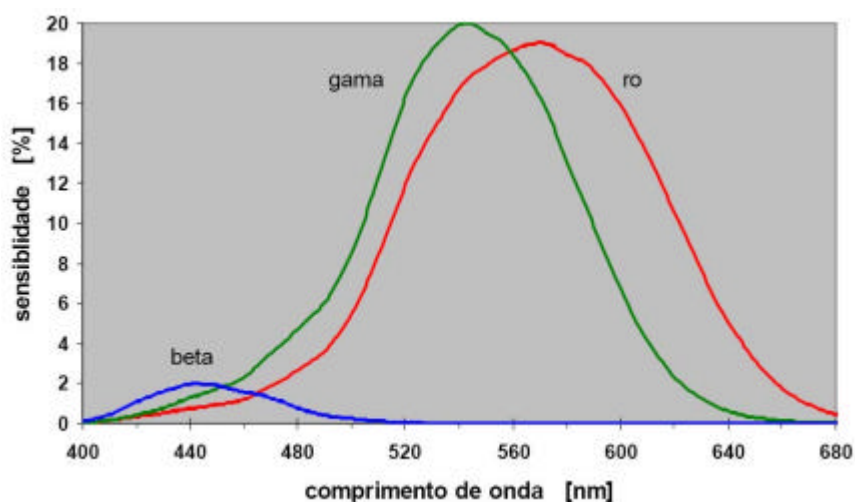
Se duas fontes luminosas de cores diferentes são projetadas sobre uma superfície verifica-se que, na área de intersecção, ocorre a formação de uma nova cor. Comprova-se assim, que a visão humana não consegue distinguir componentes, mas somente a cor resultante, de forma diferente do ouvido que consegue distinguir dois instrumentos diferentes tocados simultaneamente.

2.4.2 Fisiologia da Visão

Aprofundando-se na compreensão da visão humana, verifica-se que os raios luminosos que incidem na córnea são refratados, incidindo, a seguir, sobre a lente, que tem por objetivo projetá-los na retina. Na retina encontram-se dois tipos de fotoreceptores: os cones e os bastonetes, que convertem a intensidade e a cor da luz recebida em impulsos nervosos. Estes impulsos são enviados ao cérebro, através do nervo óptico, e então tem-se a percepção de uma imagem.

Os fotoreceptores do olho humano apresentam características totalmente diferentes. Existem na verdade três tipos de cones que respondem a espectros de cores distintos (zonas vermelha, verde e azul), sendo que o último (zona azul) possui uma eficiência de percepção bem inferior aos dois primeiros tipos de cones (ver Figura 6). De qualquer forma, percebe-se que o sistema visual humano distingue as cores pelo processo da tricromacia.

FIGURA 6 - SENSIBILIDADE DOS CONES DA RETINA EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA



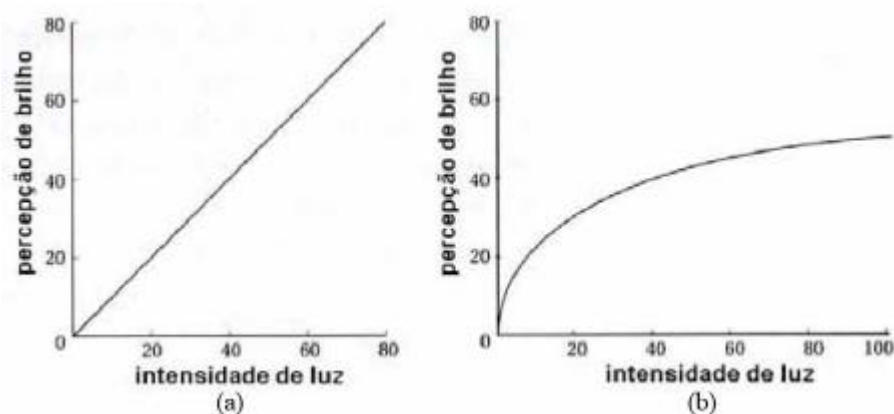
FONTE: ADAPTADO DE BUMBACA E SMITH (1987)

Segundo TASI (2004), cada olho possui aproximadamente 120 milhões de bastonetes e 6 milhões de cones. Os bastonetes se concentram mais ao redor da retina e não são sensíveis a diferenças de cores, mas registram informações monocromáticas do claro ao escuro. Eles são muito úteis para detectar movimento e para visualização

com baixo nível de luminosidade.

O sistema visual humano possui a característica de ser não-linear. Isto significa que a intensidade de brilho percebida pelo cérebro, isto é, a sensação que o ser humano percebe, não é proporcional à intensidade de luz recebida (maior ou menor quantidade de fótons que atinge os olhos). Quando se duplica a intensidade, não se percebe o dobro de brilho da luz (ver Figuras 7a e 7b). Quando a intensidade de luz é baixa, os bastonetes estão em plena atividade, gerando uma resposta de brilho para o cérebro maior do que a intensidade recebida. Quando a intensidade é maior, os cones é que estão em atividade, pois estes são mais sensíveis à luz e às cores, e enviam uma resposta de brilho ao cérebro menor do que a intensidade de luz recebida.

FIGURA 7 - RESPOSTA LINEAR (a) E NÃO LINEAR (b)



FONTE: FRASER, 2005

A natureza não-linear da resposta à luz pelo ser humano influencia de várias maneiras suas percepções, mas a mais importante é que vários equipamentos utilizados para medir a luz trabalham com resposta linear. Para relacionar tais instrumentos com a percepção humana é necessário traduzir as informações do campo linear para o não-linear.

2.4.3 Sistemas de Cores

Um sistema de cores é um modelo que procura explicar as propriedades ou o

comportamento das cores num contexto particular. Não existe um sistema que explique todos os aspectos relacionados à cor. Por isso, são utilizados sistemas diferentes para ajudar a descrever as diferentes características da cor que são percebidas pelo ser humano. Existem vários sistemas de cores, sendo que serão apresentados apenas alguns dos principais: CIE-XYZ, RGB, HSV, CIELAB e CIELUV.

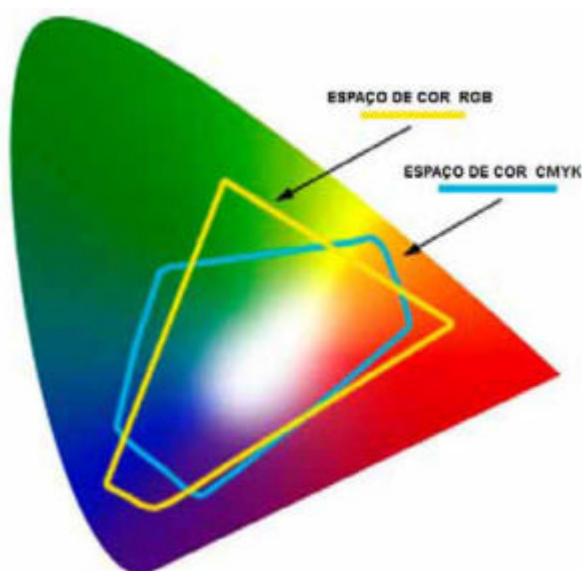
As cores primárias são as duas ou três cores que um sistema utiliza para produzir outras cores. As cores podem ser produzidas a partir de uma combinação das primárias, ou então, da composição de duas combinações. O universo de cores que podem ser reproduzidas por um sistema é chamado de espaço de cores (*color space* ou *color gamut*). Alternativamente, um espaço de cores pode ser definido como uma representação visual de um modelo de cores, como o cubo definido pelas componentes do modelo RGB, ou o cone definido pelo modelo HSV. Não existe um conjunto finito de cores primárias que produza todas as cores visíveis, mas sabe-se que uma grande parte delas pode ser produzida a partir de três primárias.

Todo equipamento relacionado à geração de cor trabalha com uma determinada especificação de espaço de cor. Por exemplo, um dispositivo que produz as cores em RGB consegue gerar as cores dentro de um determinado espaço de cor e outro dispositivo que produz as cores em CMYK consegue produzir as cores dentro de outro espaço de cor, conforme Figura 8. No caso dos monitores (modelo de cor RGB), cada um tem seu próprio espaço de cor, mesmo quando sejam produzidos pelo mesmo fabricante, mesmo modelo e mesmo lote de fabricação: para cada exemplar, o espaço de cor será individual.

O estudo da utilização de três fontes de luz espectral para a geração de cores é chamado de colorimetria, e tem como um de seus objetivos determinar espaços de cores perceptualmente uniformes. Um espaço de cores (ou sistema de cores) perceptualmente uniforme é aquele no qual as distâncias são proporcionais à habilidade das pessoas de perceber mudanças na cor. Por exemplo, a escala de cinzas do espaço deve transmitir uma transição suave entre o preto e o branco. A definição de

um espaço de cores uniforme é feita através de medições empíricas obtidas sob condições experimentais rigidamente controladas - as condições do ambiente e outros parâmetros importantes devem ser mantidos constantes, como o tamanho das amostras de cores, o espaçamento entre as amostras, a luminância e cromaticidade do fundo e da luz ambiente. Apesar dessa limitação, os espaços perceptuais de cores fornecem ferramentas adequadas para a solução de problemas como a compressão de imagens (para decidir o nível de codificação da informação de cor) e pseudo-coloração (para mapear as cores da imagem em um conjunto com espaçamento perceptual máximo).

FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO DE ESPAÇO DE COR



FONTE: ADOBE, *COLOR MODELS*

Os sistemas de cores podem ser aditivos ou subtrativos. Nos modelos aditivos (por exemplo, RGB e XYZ), as intensidades das cores primárias são adicionadas para produzir outras cores. A Figura 9 ilustra a demonstração do funcionamento desses modelos através da sobreposição de círculos coloridos. Pode-se pensar que o branco é a mistura das intensidades máximas das três cores primárias aditivas (vermelha, verde e azul). Os matizes intermediários (amarelo, turquesa e magenta) são obtidos através da combinação das intensidades máximas de duas cores.

Nos modelos subtrativos (por exemplo, o CMY), as cores são geradas

subtraindo-se o comprimento da onda dominante da luz branca. Segue-se daí que a cor resultante corresponde à luz que é refletida. A Figura 10 ilustra a demonstração do funcionamento desses modelos através da sobreposição de círculos coloridos. Neste caso, pode-se pensar que o preto é a combinação das três cores subtrativas (turquesa, magenta e amarela). A quantidade de preto numa cor é indicada pela diferença entre o branco e a intensidade máxima das três cores primárias aditivas. E, da mesma forma, a quantidade de branco numa cor é indicada pela diferença entre o preto e a intensidade mínima das três cores primárias aditivas.

FIGURA 9 - PROCESSO ADITIVO DE MISTURA DE CORES

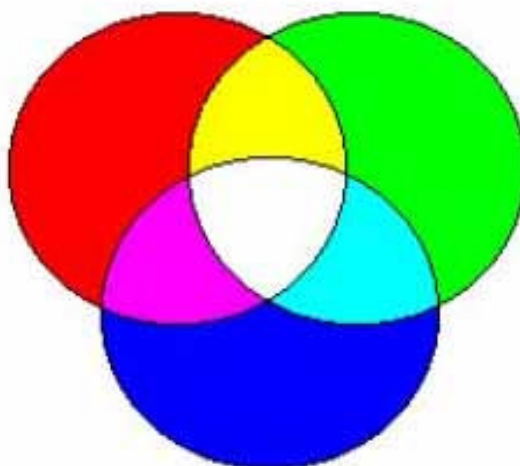
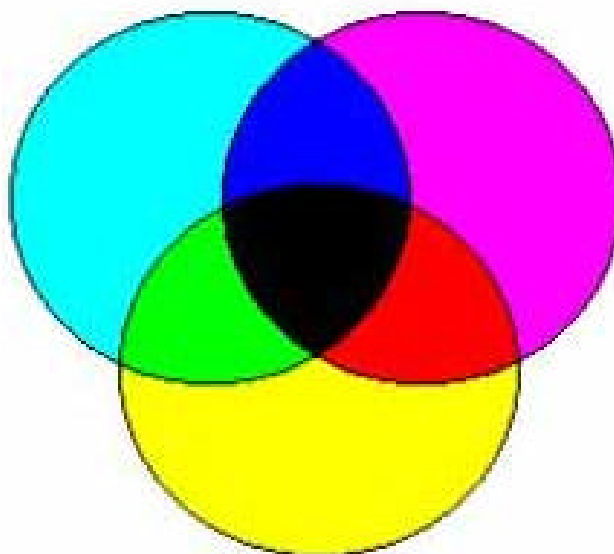
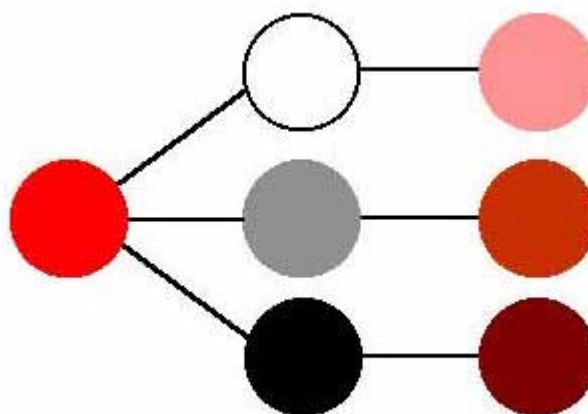


FIGURA 10 - PROCESSO SUBTRATIVO DE MISTURA DE CORES



As cores puras e saturadas não representam toda a classe de cores possíveis, existem ainda os *tints*, *shades* e *tones* que correspondem, respectivamente, às cores obtidas através da adição de branco, preto e cinza às cores saturadas, causando uma alteração no efeito da cor. A Figura 11 ilustra os *tints*, *shades* e *tones* obtidos a partir da cor vermelha.

FIGURA 11 - *TINTS*, *SHADES* E *TONES* OBTIDOS A PARTIR DA COR VERMELHA



A adição de branco clareia uma cor e cria um *tint* (por exemplo, adicionando branco ao vermelho para obter a cor rosa). A adição de preto escurece uma cor e cria um *shade* (por exemplo, adicionando preto ao vermelho para obter um castanho-avermelhado). Além disso, a adição de cinza reduz o brilho de uma cor e cria um *tone*. Uma composição monocromática é formada inteiramente de *tints*, *shades* e *tones* da mesma cor.

2.4.4 CIE

A CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*, ou *International Commission on Illumination*, ou ainda Comissão Internacional de Iluminação) foi fundada em 1913, por um grupo internacional de pesquisadores autônomos, com objetivo de promover um fórum para a troca de idéias e informações, e para padronizarem todos os termos relativos à iluminação. Como parte da sua missão, a CIE tem um comitê técnico para estudar o sistema visual e as cores, resultando numa

diretriz para a colorimetria, desde a primeira padronização em 1931, em Cambridge, na Inglaterra.

Os cientistas da cor usam fontes de luz teóricas para determinar a cromaticidade ou a cor pura da luz, como também a fonte real de luz, segundo ADOBE (*Color Models*). Este modelo de fonte de luz é chamado de radiação de corpo negro, onde os físicos desenvolveram uma fórmula que determina a distribuição espectral da potência da fonte de luz baseada na sua temperatura. O termo “fonte de luz” é usado na teoria da cor para identificar a fonte física da luz, sendo que, no estudo de modelos teóricos, o termo adotado é “iluminante”.

O modelo de cor CIE foi desenvolvido para ser completamente independente de qualquer dispositivo ou outro meio de emissão ou reprodução e está baseado na percepção das cores pelo sistema visual humano. Os elementos-chave do modelo CIE são as definições padrão de iluminantes e as especificações para o observador padrão.

Iluminantes padrões são fontes de luz com definições espectrais determinadas, sendo as principais:

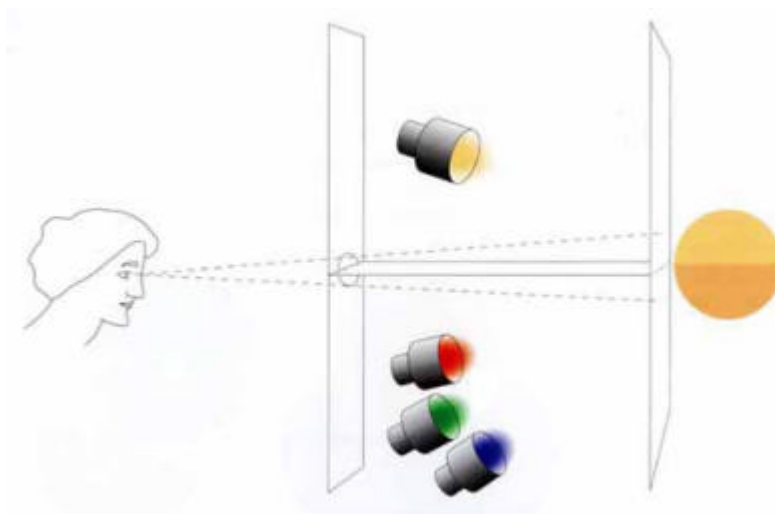
- a) iluminante A: representa uma lâmpada de filamento de tungstênio, com a temperatura de cor de 2854° K;
- b) iluminante B: representa um dia de sol, com temperatura de cor de 4874° K;
- c) iluminante C: representa um dia de sol pela manhã, com temperatura de cor de 6774° K, e tem sido substituído pelo iluminante D;
- d) iluminante D: é uma série de iluminantes que representam a luz do dia de vários modos. Os mais adotados são o D50 e o D65 com temperaturas de cor de 5000° K e 6504° K, respectivamente.

No que se refere ao observador padrão, a CIE possui duas especificações (ADOBE, *Color Models*): a especificação original de 1931, e uma outra especificação revisada de 1964. Em ambas, o observador padrão é composto de um pequeno grupo de indivíduos (entre 15 e 20) com o sistema visual normal. A diferença significativa entre os observadores padrões de 1931 e 1964 era o campo de visão usado para

visualização. O observador de 1931 utilizou 2° (dois graus) de campo de visão, que foi considerado mais tarde inadequado em alguns casos, por não ser suficiente para atingir a visão periférica do observador, pois com este ângulo atinge-se apenas a fóvea (centro da retina). A especificação de 1964 aumentou o campo de visão do observador para 10° (dez graus), possibilitando que a reflexão do objeto visualizado pela sensibilidade da retina fosse ampliada.

O observador realiza a experimentação do tri-estímulo visualizando, com o ângulo de visão definido e com uma separação no meio do furo, duas cores, uma produzida por fonte de luz de cor conhecida, e outra pela adição sobreposta das três cores primárias aditivas. Ajustando as intensidades das três luzes, conforme Figura 12, objetiva-se igualar a percepção de cor em ambas as projeções.

FIGURA 12 - EXPERIMENTAÇÃO DO TRIESTÍMULO



FONTE: FRASER, 2005, P.19

Na prática colorimétrica, o principal objetivo é obter resultados válidos para um grupo de observação tricromática normal. Para essa finalidade, as propriedades de igualdade de cores de um observador tricromático ideal são definidas especificando-se três funções independentes de comprimento de onda que são identificadas como "funções de comparação de cores ideais para o observador". Os valores dessas funções ideais de observação, como funções de comprimento de onda, são fixados de forma

que os resultados de determinadas equações representem a comparação de cores de um observador normal ou da média de um grupo de observadores (WYSZECKI, 1982). Elas foram obtidas indiretamente em experimentos de comparação de cores feitos por uma série de observadores (PRATT, 1991).

2.4.5 Modelo XYZ

O sistema XYZ de cores primárias da CIE é um sistema aditivo que descreve as cores através de três cores primárias virtuais (não tem realização física) X, Y e Z. Esse sistema foi criado devido à inexistência de um conjunto finito de cores primárias que produza todas as cores visíveis possíveis. Nesse sistema, as cores C_λ podem ser expressas pela seguinte equação:

$$C_\lambda = xX + yY + zZ \quad (25)$$

em que x , y e z especificam as quantidades das primárias padrões necessárias para descrever uma cor espectral. A normalização dessa quantidade em relação à luminância ($x + y + z$) possibilita a caracterização de qualquer cor. As cores desse sistema podem ser expressas como combinações das quantidades normalizadas abaixo:

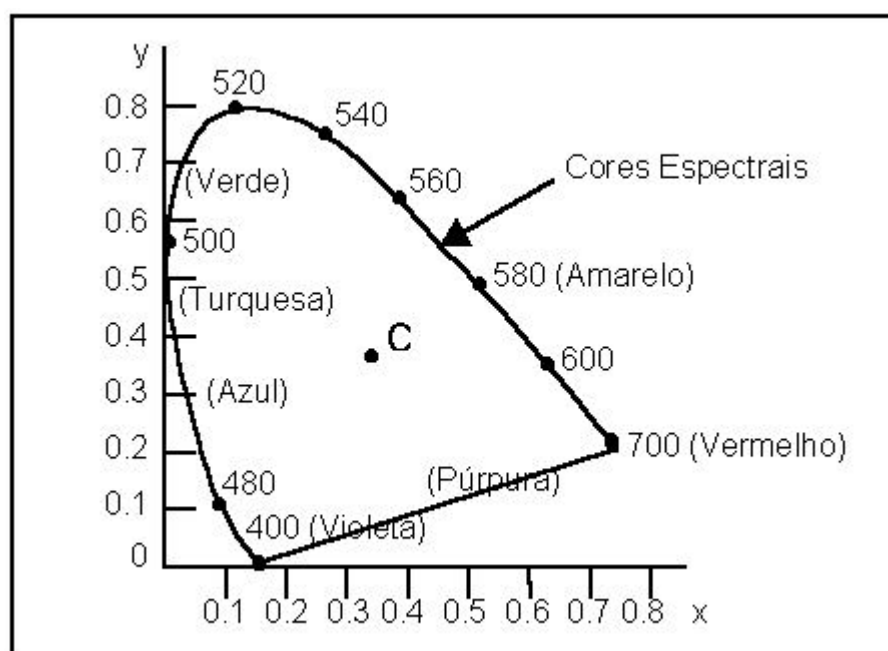
$$x_N = \frac{x}{x + y + z}; \quad y_N = \frac{y}{x + y + z}; \quad z_N = \frac{z}{x + y + z} \quad (26)$$

com $x_N + y_N + z_N = 1$. Assim, qualquer cor pode ser definida apenas pelas quantidades de x_N e y_N que, por dependerem apenas do matiz e da saturação, são chamadas de coordenadas de cromaticidade. A descrição completa de uma cor é dada pelas coordenadas de cromaticidade e pelo valor de um dos três estímulos originais, normalmente do y , que contém a informação de luminância. Essa descrição possibilita a obtenção das quantidades de x e z com as equações abaixo:

$$x = \frac{x_N}{y_N} y, \text{ e } z = \frac{z_N}{y_N} y, \text{ onde } z_N = 1 - x_N - y_N \quad (27)$$

O sistema XYZ é formado por cores imaginárias que são definidas matematicamente. Nesse sistema, as combinações de valores negativos (possibilidade existente no sistema RGB) e outros problemas relacionados à seleção de um conjunto de primárias reais são eliminados. As coordenadas de cromaticidade x_N e y_N permitem representar todas as cores num gráfico bidimensional. O traçado dos valores normalizados de x e y para as cores no espectro visível resulta na curva ilustrada na Figura 13.

FIGURA 13 - DIAGRAMA DE CROMATICIDADE DO CIE



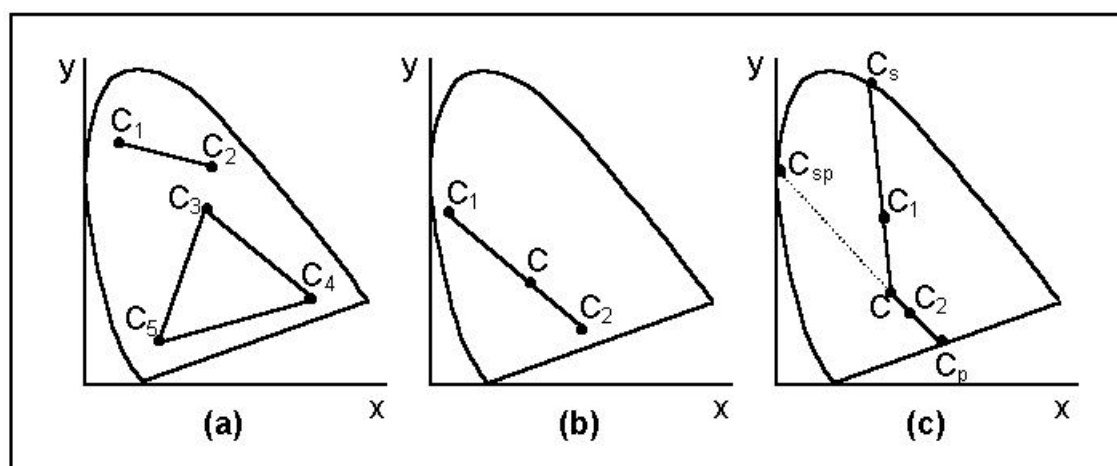
Os pontos que representam as cores puras no espectro eletromagnético são rotulados de acordo com os seus comprimentos de onda e estão localizados ao longo da curva que vai da extremidade correspondente à cor vermelha até a extremidade correspondente à cor violeta. A linha reta que une os pontos espectrais vermelho e violeta é chamada linha púrpura, e não faz parte do espectro. Os pontos internos correspondem a todas as combinações possíveis de cores visíveis, e o ponto C corresponde à posição da luz branca.

Devido à normalização, o diagrama de cromaticidade não representa os valores de luminância. Por isso, as cores com luminâncias diferentes e cromaticidades

iguais são mapeadas no mesmo ponto. Através desse diagrama, é possível determinar e comparar os espaços de cores dos diferentes conjuntos de primárias, identificar as cores complementares (duas cores que, somadas, produzem a cor branca), determinar o comprimento de onda dominante e a saturação de uma cor.

Os espaços de cor são representados no diagrama, ilustrado na Figura 14a, através de linhas retas ou de polígonos. Todas as cores ao longo da linha que une os pontos C_1 e C_2 na Figura 14a podem ser obtidas através da mistura de quantidades apropriadas das cores correspondentes a esses pontos. A escala de cores para três pontos (por exemplo, C_3 , C_4 e C_5 na Figura 14a) é representada por um triângulo cujos vértices são definidos pelas cores correspondentes às três posições e inclui cores contidas no interior e nas margens fronteiriças desse triângulo.

FIGURA 14 - REPRESENTAÇÃO DE ESCALAS DE COR NO DIAGRAMA DE CROMATICIDADE DO CIE



Observando o diagrama é possível perceber que nenhum conjunto formado por três primárias pode gerar todas as cores, pois nenhum triângulo contido no diagrama abrange todas as cores possíveis. As cores complementares são identificadas por dois pontos localizados em lados opostos do ponto C e conectados por uma linha reta. Por exemplo, misturando quantidades apropriadas de duas cores C_1 e C_2 (Figura 14b), obtém-se a luz branca.

A determinação do comprimento de onda dominante de uma cor pode ser feita interpretando-se a escala de cores entre duas primárias. O comprimento de onda

dominante da cor C_1 , representada na Figura 14c, é determinado traçando-se uma linha reta que parte do ponto C passando pelo ponto C_1 e intersectando a curva espectral no ponto C_s . A cor C_1 , corresponde então, à combinação da luz branca com a cor espectral C_s , pois C_s é o comprimento de onda dominante de C_1 . O comprimento de onda dominante das cores que estão entre o ponto C e a linha púrpura é determinado de outra forma. Traça-se uma linha a partir do ponto C (Figura 14c) passando pelo ponto C_2 e intersectando a linha púrpura no ponto C_p . Como esse ponto não pertence ao espectro visível, o ponto C_2 é referenciado como sendo uma cor não espectral e o seu comprimento de onda dominante é obtido através do prolongamento da reta até que ela intercepte a curva espectral, no ponto C_{sp} . As cores não espectrais estão entre púrpura e magenta, e são geradas através da subtração do comprimento da onda dominante (como, por exemplo, o C_{sp}) da luz branca.

A pureza de uma cor (por exemplo, de C_1 na Figura 14c) é determinada através da distância relativa do ponto C_1 , que corresponde à linha reta que vai do ponto C até o ponto C_s . Pode-se calcular a pureza do ponto C_1 através da relação d_{c1}/d_{cs} , onde d_{c1} representa a distância entre C e C_1 e d_{cs} representa a distância entre C e C_s . A cor C_1 é cerca de 33% pura porque está situada a aproximadamente um terço da distância total entre C e C_s .

Com tais características, depreende-se facilmente que o modelo CIE-XYZ apresenta como grande vantagem a precisão com que se pode especificar um estímulo de cor. Isso faz com que seja uma excelente escolha como referência para medidas de cores em aplicações industriais. Outra vantagem está relacionada ao fato de que todas as suas coordenadas são positivas.

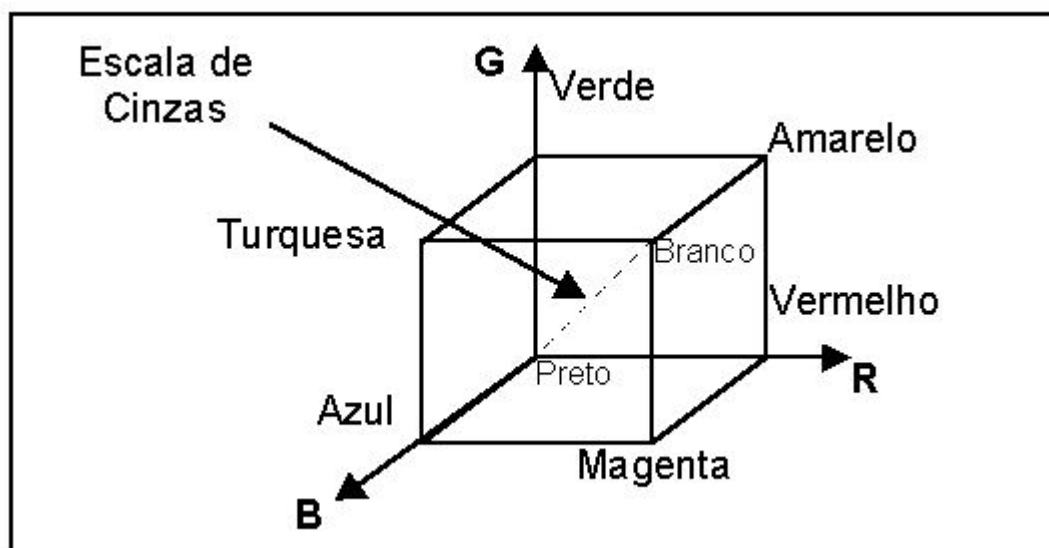
As desvantagens do modelo são:

- a) não é uma boa opção para especificações perceptuais de cor, porque as primitivas de referência X, Y e Z correspondem a fontes luminosas imaginárias, que por sua vez, são difíceis de serem visualizadas;
- b) o espaço de cor XYZ é um espaço não uniforme, provocando distorções indesejáveis.

2.4.6 Modelo RGB

O sistema RGB de cores primárias também é aditivo e está baseado na teoria dos três estímulos (*Tristimulus Color Theory*) proposta por Young-Helmholtz. Segundo essa teoria, o olho humano percebe a cor através da estimulação dos três pigmentos visuais presentes nos cones da retina, apresentando picos de sensibilidade aproximada nos comprimentos de onda referentes às cores vermelho, verde e azul. Esse sistema pode ser representado graficamente através do cubo unitário definido sobre os eixos R , G e B , como ilustrado na Figura 15.

FIGURA 15 - CUBO RGB



A origem representa a cor preta, o vértice de coordenadas $(1,1,1)$ representa a cor branca, os vértices que estão sobre os eixos representam as cores primárias e os demais vértices representam o complemento de cada cor primária. Cada ponto no interior do cubo corresponde a uma cor que pode ser representada pela tripla (R,G,B) , com os valores R , G e B variando de 0 a 1. Os tons de cinza são representados ao longo da diagonal principal do cubo, que vai da origem (ponto correspondente a cor preta) até o vértice que corresponde à cor branca (WEEKS, 1996). Cada tom ao longo dessa diagonal é formado por contribuições iguais de cada primária. Logo, um tom de cinza médio entre o branco e o preto é representado por $(0,5;0,5;0,5)$. As cores C_λ

desse sistema podem ser expressas na forma:

$$C_I = rR + gG + bB \quad (28)$$

A resposta do olho aos estímulos espectrais não é linear e, por isso, algumas cores não podem ser reproduzidas pela sobreposição das três primárias. Isso significa que algumas cores existentes na natureza não podem ser mostradas nesse sistema.

O modelo RGB está intimamente associado às superfícies emissoras de luz. É por esta razão que este modelo é utilizado quase que universalmente pelos equipamentos que manipulam a emissão de luz, tais como os monitores e os televisores a cores. Os filmes fotográficos e cinematográficos, e as gravações em vídeo baseiam-se também no modelo RGB.

O modelo é omissivo quanto ao que é uma cor primária pura, ou seja, não define qual o comprimento de onda a que corresponde cada uma das três cores primárias. Esta omissão tem consequências na reprodução da cor. Com efeito, verificam-se variações sensíveis de monitor para monitor e, no caso dos televisores, a publicidade menciona muitas vezes a expressão “cores mais naturais”.

Tradicionalmente, as implementações do modelo RGB nos sistemas gráficos empregam valores inteiros entre 0 e 255 para exprimir o valor da intensidade de cada componente, em vez de valores reais normalizados entre 0 e 1. Esta idiosincrasia teve origem no fato do processamento de valores inteiros ser muito mais rápido do que o processamento de valores reais, desde os primeiros sistemas gráficos, além de que a notação com inteiros ser mais simples de escrever e apreender do que a notação com valores reais fracionários. A discretização, em 256 valores de intensidade, é mais do que suficiente para o olho humano, pois este consegue distinguir entre um mínimo de 16 intensidades na zona do azul, e um máximo de 23 intensidades na zona do amarelo (LOPES, 2003).

Resumindo-se, as vantagens deste modelo são a grande simplicidade geométrica, suporte a um controle direto sobre o dispositivo (computação mínima) e facilidade de implementação. As desvantagens são:

- a) dependência de dispositivo, isto é, as coordenadas RGB não são transferíveis, em geral, ou seja, os mesmos valores de coordenadas não reproduzem exatamente a mesma cor;
- b) não é recomendado para dispositivos não aditivos (por exemplo, uma impressora que usa o modelo subtrativo CMYK). Neste caso, o modelo RGB assume que as primárias subtrativas são complementos das primárias aditivas, o que leva à suposição de que as tintas também são aditivas, o que não é verdade;
- c) não é perceptualmente uniforme, o que significa que uma variação de uma unidade da coordenada corresponde a diferentes variações perceptuais da cor, dependendo da região do cubo;
- d) não se baseia em estímulos visuais, mas sim em sinais dos dispositivos (voltagens), o que faz com que não seja facilmente relacionado com a aparência da cor;
- e) não é um modelo intuitivo, não sendo de uso fácil para tarefas perceptuais.

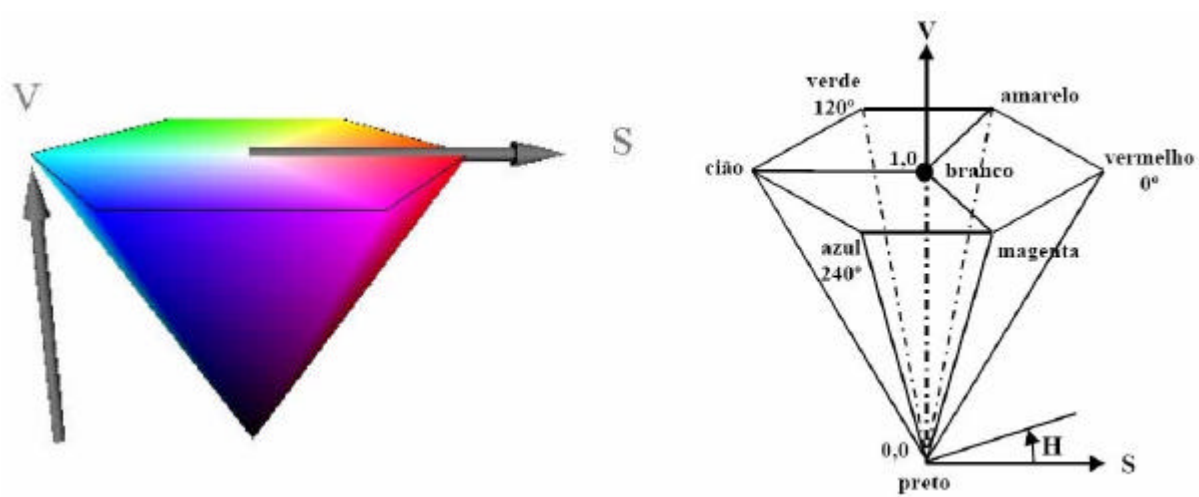
2.4.7 Modelo HSV

O modelo de cor HSV é mais intuitivo que os modelos RGB e XYZ, aproximando-se muito do modelo utilizado em artes visuais, que emprega os conceitos qualitativos de matiz (*Hue*), saturação (*Saturation*) e tonalidade (*Value*).

A representação do espaço de cor do modelo HSV pode ser facilmente compreendida a partir do cubo do modelo RGB. Colocando-se o ponto de vista sobre a linha contendo a diagonal principal do cubo RGB (tons de cinza) e orientando a visão na direção da origem deste espaço, o cubo RGB apresentará uma seção diagonal onde, intercaladas, se encontram as cores primárias aditivas e as cores primárias subtrativas. A cor branca ocupará o centro. A seguir, projetam-se tanto as cores primárias aditivas e subtrativas, como a cor branca, sobre um mesmo plano, à distância de uma unidade

da origem. Finalmente, amplia-se o polígono obtido, de forma que a distância entre o ponto representativo de qualquer cor primária e o ponto central correspondente à cor branca seja também unitária. Obter-se-á, então, uma pirâmide hexagonal contendo todas as cores do espaço HSV, tal como a Figura 16 apresenta.

FIGURA 16 - ESPAÇO DE CORES HSV



As cores primárias ocupam, no espaço HSV, os vértices do hexágono, e encontram-se dispostas segundo um ângulo correspondente, de acordo com o Quadro 2.

QUADRO 2 - ÂNGULO DAS CORES NO ESPAÇO HSV

COR	ÂNGULO
Vermelho	0
Amarelo	60
Verde	120
Ciã	180
Azul	240
Magenta	300

A saturação de uma cor corresponde à quantidade de cor branca que a cor apresenta. Uma saturação igual a um significa que a cor é pura (está na periferia), enquanto que uma saturação igual a zero significa que a cor é totalmente branca e, neste caso, o valor do parâmetro H é irrelevante.

O parâmetro V (valor) corresponde à intensidade da cor e varia entre zero (intensidade nula, ou seja, cor negra, onde os valores de H e S são irrelevantes) e um (intensidade máxima). Naturalmente, os tons cinzentos encontram-se localizados sobre

o eixo da pirâmide em que $0 \leq V \leq 1$ e $S = 0$, sendo o valor de H indiferente.

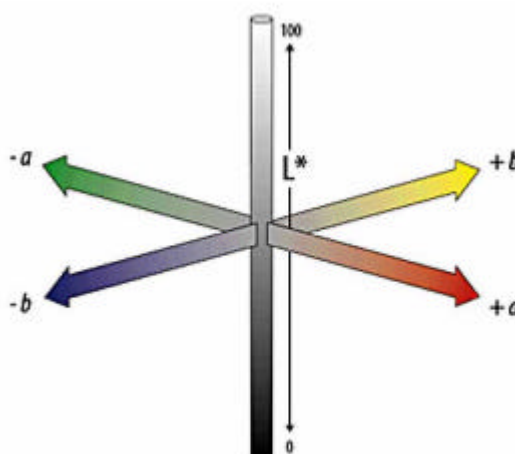
2.4.8 Modelos CIELAB e CIELUV

Tratam-se de modelos de cor definidos pela CIE, em 1976, na tentativa de aumentar a uniformidade das cores percebidas pelo sistema visual humano (FRASER, 2005). Foram criados para proporcionar cores consistentes, independentemente de dispositivo. Também são conhecidos pelas siglas $L^*a^*b^*$ e $L^*u^*v^*$, formas opcionais de representação. L indica o valor da luminosidade corrigida para uma escala perceptualmente linear, variando de branco a preto, e sendo igualmente definido em ambos os sistemas. A , B ou U , V são as componentes de cromaticidade da cor.

Segundo (VELLOSO, 2004), o modelo CIELUV representa as cores aditivas, de forma semelhante ao modelo RGB, e o CIELAB representa as cores subtrativas, onde a luz é absorvida por colorantes tais como tintas e pigmentos.

No modelo CIELAB, o valor de a^* pode variar de verde a vermelho e o valor de b^* pode variar de azul a amarelo, analogamente à percepção das cores pelo cérebro. A Figura 17 representa o espaço de cor nesta concepção gráfica. O CIELAB não é perfeito: apresenta diferenças exageradas nas cores amarelas, e subestima os azuis.

FIGURA 17 - MODELO DE COR CIELAB



FONTE: ADOBE, COLOR MODELS:

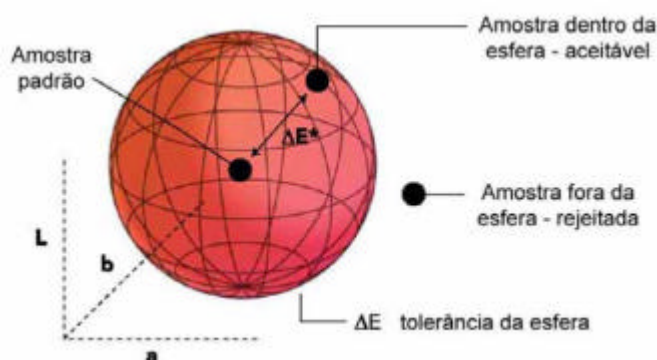
Estes modelos de cores são ditos uniformes, pelo fato de serem

perceptualmente uniformes (aproximadamente), isto é, a mudança de uma unidade, em qualquer componente destes modelos, é percebida por um observador padrão como sendo as menores mudanças perceptíveis, em escala cromática uniforme (UCS - *Uniform Chromaticity Scale*).

2.4.9 Diferença de Cor (ΔE)

Segundo (X-RITE: *The Color Guide and Glossary*), a diferença de cor (ΔE) é uma maneira fácil de registrar a diferença entre duas amostras. Tendo o valor numérico de duas cores em $L^* a^* b^*$, é realizada a colocação delas como sendo pontos no modelo de cor uniforme (CIELAB) e registrada a distância entre elas. O procedimento ocorre da seguinte maneira: é criada uma esfera teórica com tolerância (equivalente ao raio da esfera) definida que representa a diferença aceitável entre a amostra padrão e a amostra medida. A amostra que fica dentro da esfera é considerada como aceitável e a que fica fora é rejeitada, conforme Figura 18.

FIGURA 18 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA DIFERENÇA DE COR



FONTE: X-RITE: *THE COLOR GUIDE AND GLOSSARY*, P. 38

2.4.10 Conversões entre Sistemas de Cor

2.4.10.1 Conversão entre os Espaços RGB e XYZ

O fabricante deve informar as especificações das coordenadas de

cromaticidade (x, y) dos fósforos (responsáveis pelas cores vermelho, verde, azul e branco) do monitor. Como exemplo, tem-se:

	Vermelho (R)	Verde (G)	Azul (B)	Branco(W)
x	$x_R = 0,64$	$x_G = 0,30$	$x_B = 0,15$	$x_W = 0,3127$
y	$y_R = 0,33$	$y_G = 0,60$	$y_B = 0,06$	$y_W = 0,3290$

Determina-se, a seguir, $z = 1 - x - y$. Seguindo-se o exemplo, tem-se:

	Vermelho (R)	Verde (G)	Azul (B)	Branco(W)
z	$z_R = 0,03$	$z_G = 0,10$	$z_B = 0,79$	$z_W = 0,3583$

As coordenadas X, Y, Z são obtidas de:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{bmatrix} R + \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} G + \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} B = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (29)$$

O problema agora consiste em determinar os valores dos coeficientes introduzidos acima. Sejam:

$$\begin{aligned} x_R &= \frac{X_R}{X_R + Y_R + Z_R} \\ x_G &= \frac{X_G}{X_G + Y_G + Z_G} \\ x_B &= \frac{X_B}{X_B + Y_B + Z_B} \end{aligned} \quad (30)$$

Fazendo-se:

$$\begin{aligned} C_R &= X_R + Y_R + Z_R \\ C_G &= X_G + Y_G + Z_G \\ C_B &= X_B + Y_B + Z_B \end{aligned} \quad (31)$$

Tem-se:

$$\begin{aligned}
X_R &= x_R C_R \\
X_G &= x_G C_G \\
X_B &= x_B C_B
\end{aligned} \tag{32}$$

Da mesma forma, tem-se:

$$\begin{aligned}
Y_R &= y_R C_R & Z_R &= z_R C_R \\
Y_G &= y_G C_G & e \quad Z_G &= z_G C_G \\
Y_B &= y_B C_B & Z_B &= z_B C_B
\end{aligned} \tag{33}$$

Substituindo-se (32) e (33), na equação (29), obtém-se:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R C_R & x_G C_G & x_B C_B \\ y_R C_R & y_G C_G & y_B C_B \\ z_R C_R & z_G C_G & z_B C_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \tag{34}$$

Para se determinar as componentes C_R , C_G e C_B usa-se o fato de que a cor branca (X_W, Y_W, Z_W, C_W) é dada por $R = G = B = 1$.

$$\begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R C_R & x_G C_G & x_B C_B \\ y_R C_R & y_G C_G & y_B C_B \\ z_R C_R & z_G C_G & z_B C_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \\ z_R & z_G & z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_R \\ C_G \\ C_B \end{bmatrix} \tag{35}$$

De forma equivalente às equações (32) e (33), usando-se as coordenadas de cromaticidade fornecidas, e supondo-se que a luminosidade do branco apresenta a informação de luminância $Y_W = 1,00$, tem-se:

$$Y_W = y_W C_W = 1.00 \quad \rightarrow \quad C_W = \frac{Y_W}{y_W} = \frac{1.0}{0,3290} = 3,0395 \tag{36}$$

Substituindo-se, a seguir, o valor encontrado de C_W nas demais equações relativas à luz branca, juntamente com as coordenadas de cromaticidade informadas:

$$X_W = x_W C_W = 0,3127 * 3,0395 = 0,9422 \tag{37}$$

$$Z_W = z_W C_W = 0,3582 * 3,0395 = 1,0888 \tag{38}$$

e a equação (35), após substituição dos valores encontrados nas equações (37) e (38), mais substituição das coordenadas de cromaticidade informadas, relativas ao fósforo, se transforma em:

$$\begin{bmatrix} 0,9422 \\ 1,0000 \\ 1,0888 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,64 & 0,30 & 0,15 \\ 0,33 & 0,60 & 0,06 \\ 0,03 & 0,10 & 0,79 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_R \\ C_G \\ C_B \end{bmatrix} \quad (39)$$

Resolvendo-se o sistema de equações (39) acima, encontra-se o resultado:

$$\begin{bmatrix} C_R \\ C_G \\ C_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,644 \\ 1,192 \\ 1,203 \end{bmatrix} \quad (40)$$

e, finalmente, a equação (34) se transforma em:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,4122 & 0,3576 & 0,1805 \\ 0,2125 & 0,7152 & 0,0722 \\ 0,0193 & 0,1192 & 0,9504 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (41)$$

A transformação inversa, neste caso, fica sendo:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,240 & -1,537 & -0,499 \\ -0,969 & 1,876 & 0,042 \\ 0,056 & -0,200 & 1,057 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (42)$$

2.4.10.2 Conversão do Espaço XYZ para CIELAB e CIELUV

Dados (X, Y, Z) componentes da cor no espaço CIE-XYZ, e (X_w, Y_w, Z_w) componentes da cor branca de referência, calcula-se:

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4 * X}{X + 15 * Y + 3 * Z} & u_w &= \frac{4 * X_w}{X_w + 15 * Y_w + 3 * Z_w} \\ v' &= \frac{9 * Y}{X + 15 * Y + 3 * Z} & v_w &= \frac{9 * Y_w}{X_w + 15 * Y_w + 3 * Z_w} \end{aligned} \quad \text{e} \quad (43)$$

Nesse ínterim já se pode calcular a componente de luminosidade dos modelos CIELAB e CIELUV.

$$L^* = 116 * \left(\frac{Y}{Y_w} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 \quad \text{se} \quad \frac{Y}{Y_w} > 0,008856 \quad (44)$$

ou

$$L^* = 903,3 * \left(\frac{Y}{Y_w} \right) \quad \text{se} \quad \frac{Y}{Y_w} \leq 0,008856 \quad (45)$$

A seguir, as demais componentes podem ser calculadas. No espaço CIELAB:

$$a^* = 500 * \left[\left(\frac{X}{X_w} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_w} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

$$b^* = 200 * \left[\left(\frac{Y}{Y_w} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_w} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (46)$$

e, no espaço CIELUV:

$$u^* = 13 * L^* * (u' - u_w)$$

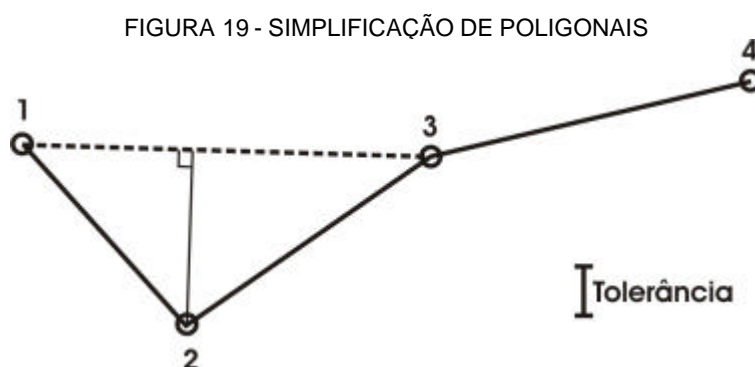
$$v^* = 13 * L^* * (v' - v_w) \quad (47)$$

2.5 SUAVIZAÇÃO DE POLÍGONOS POR DOUGLAS-PEUCKER

Muitas entidades do mundo real podem ser representadas como poligonais em sua transposição para um modelo. Essas entidades são freqüentes: DAVIS (1997) comenta que objetos lineares correspondem a cerca de 80% do volume de dados vetoriais em um banco de dados geográfico. Poligonais são usadas para representar feições tais como rios, estradas, ruas, linhas de transmissão e adutoras. Os nomes dados pelos GIS comerciais a essas entidades, no entanto, variam muito: linha (polyline), *line string*, arco, l-cell, poligonal, cadeia (*chain*), e outros. A complexidade das representações lineares pode variar, indo de simples segmentos de reta (dois pares de coordenadas), como um trecho de tubulação de esgoto, até poligonais contendo milhares de pares de coordenadas, como um rio ou uma curva de nível.

Os algoritmos que trabalham com poligonais são muito importantes para os GIS, uma vez que diversas operações básicas, freqüentemente repetidas, são baseadas

neles. Muitas vezes é necessário simplificar a representação de poligonais, buscando (1) evitar o desperdício de memória, (2) melhorar o desempenho dos sistemas, ou (3) melhorar a legibilidade da informação. O objetivo geral dessa classe de algoritmos é determinar, dentre os vértices que definem uma poligonal, quais são os mais importantes para a preservação de sua forma geométrica, e quais podem ser dispensados. Em geral, é estabelecido um parâmetro de tolerância, que corresponde à distância máxima que um vértice descartável da poligonal pode estar em relação ao segmento que une o vértice anterior e o posterior a um determinado vértice. Por exemplo, na Figura 19 o vértice 2 deve ser mantido, pois se encontra a uma distância superior à tolerável em relação ao segmento 1-3. Já o vértice 3 poderá ser descartado, pois se encontra aproximadamente alinhado com os vértices 2-4.



O problema de simplificação de linhas é particularmente importante em Cartografia e GIS, e é estudado intensivamente desde os anos 60, quando ocorreram as primeiras experiências com o uso de instrumentos de transcrição de mapas para o computador, como a mesa digitalizadora. No processo de digitalização de linhas com esses instrumentos freqüentemente são introduzidos vértices em excesso, vértices que, se descartados não provocariam uma alteração visual perceptível na poligonal. Assim, um primeiro objetivo para algoritmos de simplificação de poligonais é “limpar” a poligonal de pontos claramente desnecessários, do ponto de vista de sua visualização, mantendo a qualidade de sua aparência gráfica. Como consequência, o espaço necessário para o armazenamento da poligonal diminui, bem como o tempo de acesso

para sua recuperação e apresentação. Outro objetivo é o de gerar uma nova versão da linha, uma versão mais adequada para a representação do mesmo fenômeno geográfico em outra escala, menor que a escala original de digitalização. Neste caso, está sendo obtida uma generalização da linha.

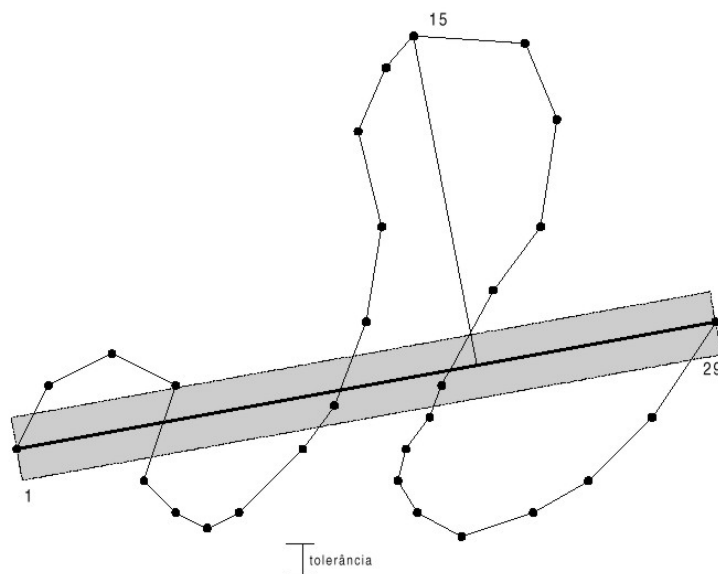
Existem diversos algoritmos para a simplificação de poligonais. DAVIS (1997) faz uma boa análise comparativa de vários destes algoritmos. O mais conhecido e adotado pelos GIS comerciais é o Douglas-Peucker. Foi proposto em 1973, e é até hoje reconhecidamente o melhor em termos de preservação das características da poligonal original, especialmente se utilizado com tolerâncias pequenas. Curiosamente, o algoritmo foi proposto quase que simultaneamente por RAMER (1972), e por DUDA e HART (1973), embora visando aplicações diferentes. O algoritmo DOUGLAS-PEUCKER (1973) permanece sendo o mais citado na literatura de geoprocessamento, uma vez que foi originalmente publicado em um periódico da área de Cartografia.

O algoritmo é recursivo, e a cada passo processa o intervalo de pontos contido entre um vértice inicial (chamado de âncora) e um vértice final (denominado flutuante). É estabelecido um corredor de largura igual ao dobro da tolerância, formando duas faixas paralelas ao segmento, entre o âncora e o flutuante. A seguir, são calculadas as distâncias de todos os pontos intermediários ao segmento básico, ou seja, contidos entre o âncora e o flutuante. Caso nenhuma das distâncias calculadas ultrapasse a tolerância, ou seja, nenhum vértice fique fora do corredor, então todos os vértices intermediários são descartados. Caso alguma distância seja maior que a tolerância, o vértice mais distante é preservado, e o algoritmo é reiniciado em duas partes: entre o âncora e o vértice mais distante (novo flutuante), e entre o vértice mais distante (novo âncora) e o flutuante. De acordo com este processo, os pontos tidos como críticos para a geometria da linha, a cada passo, são mantidos, enquanto os demais são descartados.

As Figuras 20 a 24 ilustram melhor o comportamento do algoritmo Douglas-Peucker. Inicialmente, são calculadas as distâncias dos vértices 2 a 28 até a reta

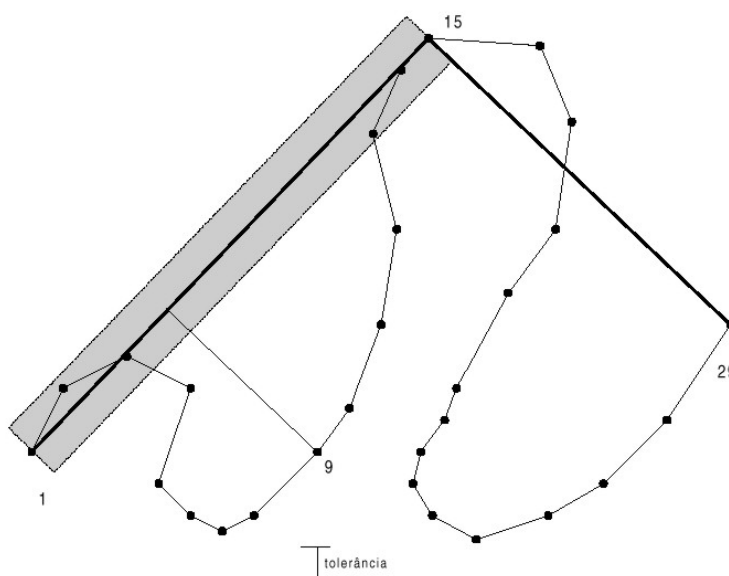
definida pelos vértices 1 e 29. O vértice mais distante, nesta primeira iteração, é o 15, a uma distância muito superior à tolerância (Figura 20). Assim, o vértice 15 é selecionado, e o procedimento é chamado recursivamente duas vezes, entre os vértices 1 e 15, e entre os vértices 15 e 29.

FIGURA 20 - DOUGLAS-PEUCKER, PASSO 1: SELEÇÃO DO VÉRTICE 15



FONTE: DAVIS, 2000

FIGURA 21 - DOUGLAS-PEUCKER, PASSO 2: SELEÇÃO DO VÉRTICE 9

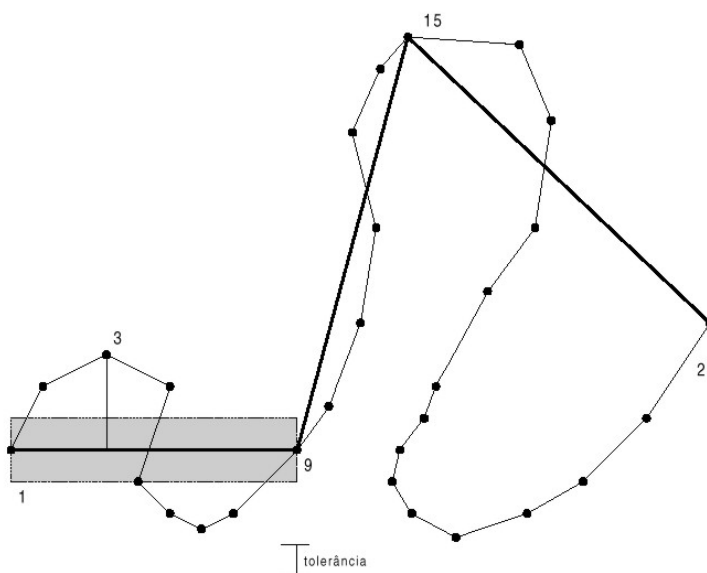


FONTE: DAVIS, 2000

Continuando pela primeira chamada recursiva (1 a 15), o vértice mais distante da reta, entre 1 e 15, é o 9, também a uma distância superior à tolerância, e, portanto, é selecionado (Figura 21).

Duas novas chamadas recursivas são feitas, e agora estão empilhados os intervalos 1-9, 9-15 e 15-29, esperando para serem analisados. No intervalo 1-9 temos também que preservar o vértice 3, e, portanto, ficamos na pilha com os intervalos 1-3, 3-9, 9-15 e 15-29 (Figura 22). Analisando agora o intervalo 1-3, verificamos que o vértice 2 pode ser dispensado (Figura 23). Ao final, são preservados os vértices 1, 3, 4, 6, 9, 15, 16, 17, 22, 24, 27 e 29, ou seja, 41% do número original de vértices (Figura 24).

FIGURA 22 - DOUGLAS-PEUCKER, PASSO 3: SELEÇÃO DO VÉRTICE 3

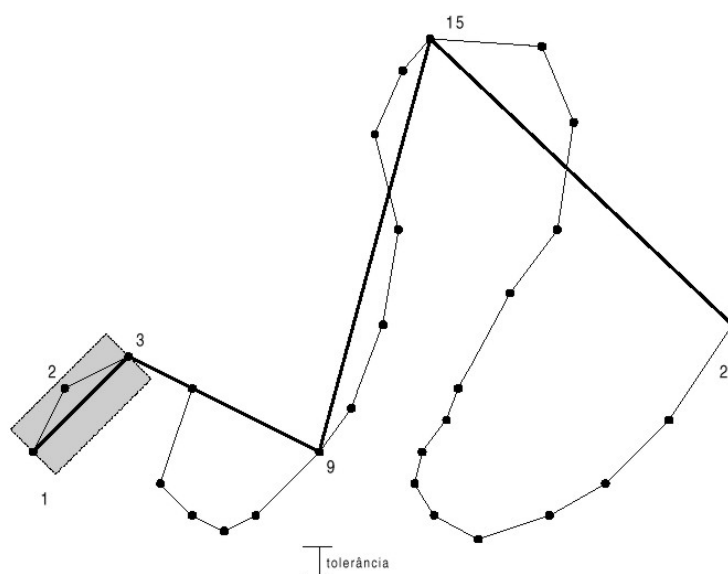


FONTE: DAVIS, 2000

Embora de implementação simples e relativamente eficiente, o uso universal do algoritmo Douglas-Peucker é comprometido pelo seu comportamento em situações de generalização mais radical, ou seja, com tolerâncias maiores. Conforme a situação, o algoritmo pode ser levado a escolher vértices que terminam por deixar a linha com uma aparência pouco natural, com tendência a apresentar picos, com ângulos agudos e mudanças bruscas de direção. Alguns autores atribuem este fato à escolha de um valor único para a tolerância, indicando que é mais razoável ter variações neste valor de

acordo com a morfologia da linha, mas até o momento nenhuma variação proposta provou resolver integralmente o problema. Em situações de generalização radical, existe também a possibilidade de que o algoritmo Douglas-Peucker produza modificações na topologia da linha (como por exemplo, auto-interseções), ou modificações na sua situação com relação a linhas vizinhas (como interseções entre curvas de nível simplificadas). Trata-se de um comportamento francamente indesejável, que precisa ser verificado em implementações mais robustas do algoritmo, com o uso de rotinas específicas.

FIGURA 23 - DOUGLAS-PEUCKER, PASSO 4: ELIMINAÇÃO DO VÉRTICE 2



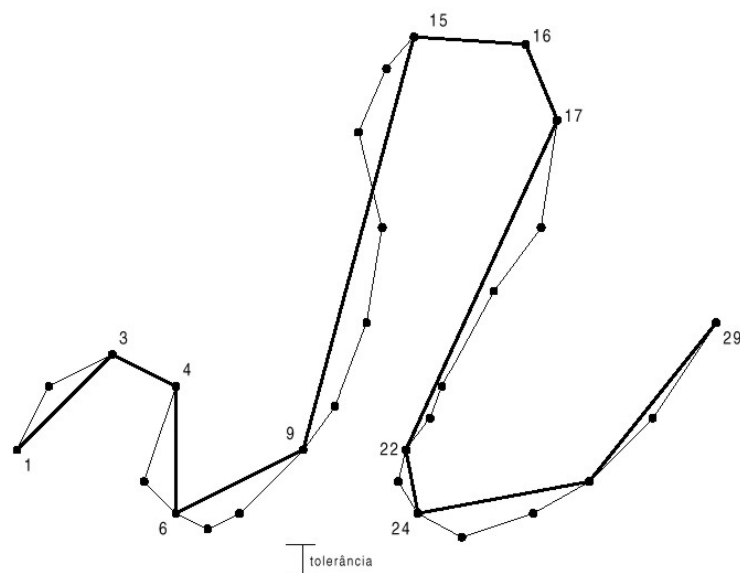
FONTE: DAVIS, 2000

Outro problema amplamente reportado na literatura diz respeito à variação que se pode obter no resultado final quando se varia a linha âncora-flutuante inicial. É o caso da aplicação do algoritmo Douglas-Peucker a poligonais fechadas: dependendo do ponto de partida, ou da estratégia de particionamento da poligonal fechada em duas ou mais poligonais abertas, um resultado diferente será obtido.

O resultado deste algoritmo é aclamado pela literatura como sendo o que mais respeita as características das linhas cartográficas. Assim, este algoritmo veio a ser a principal escolha dos desenvolvedores de programas comerciais na implementação de funções de simplificação de linhas para processamento pós-

digitalização, ou seja, para limpeza de vértices desnecessários.

FIGURA 24 - DOUGLAS-PEUCKER, FINAL



FONTE: DAVIS

2.6 ALGORITMO DE DESLOCAMENTO PELA MÉDIA

2.6.1 Espaço de Atributos

A análise espacial de atributos é um procedimento muito importante na resolução de tarefas relacionadas à visão computacional (compreensão automática de imagens). Dada uma imagem, as informações sobre um determinado objeto são extraídas a partir de sua vizinhança e mapeadas em um espaço segundo os atributos escolhidos. Objetos significativos na imagem correspondem, então, a regiões com alta densidade neste espaço.

Assim, a análise espacial de atributos pode ser entendida como o procedimento de recuperar os centros das regiões com alta densidade, isto é, as características dos objetos significativos na imagem. Técnicas baseadas em histogramas, e transformada de Hough (HOUGH, 1962), são exemplos desta abordagem. O espaço, onde as características dos objetos são mapeados, é

genericamente denominado de espaço de atributos (*feature space*).

Para se atingir o objetivo da análise espacial de atributos deve-se reduzir os dados até que se obtenha umas poucas características significativas. Este procedimento pode receber diversos nomes, conforme seu enfoque, tais como análise de agrupamentos (*cluster analysis*), classificação não supervisionada, reconhecimento de padrões.

Quando existem muitos objetos diferentes, as características dimensionais do espaço de atributos podem se tornar inapropriadas devido ao agrupamento de atributos diferentes, mas próximos entre si segundo a métrica considerada, em uma única cela, como se fossem iguais. A realização de um espaço de atributos discretizado ocorre através de acumuladores. Sempre que o tamanho das celas dos acumuladores não é adequada para os dados com que se está trabalhando, ocorrem sérios problemas de confusão (má interpretação dos objetos contidos na imagem). Este problema foi extensivamente estudado, no contexto da transformada de Hough, por ILLINGWORTH e KITTLER (1988).

Assim, para a obtenção de resultados satisfatórios, independentemente da quantidade de objetos analisados, ou das características de tais objetos, um espaço de atributos deveria ter um sistema de coordenadas contínuas. O conteúdo de um espaço de atributos contínuo pode ser modelado como uma amostragem de uma distribuição multivariada multimodal de probabilidade. Note-se que para imagens reais a quantidade de modas (valores mais freqüentes na amostra) pode ser grande, da ordem de dezenas.

As regiões com densidade mais alta correspondem a agrupamentos centrados nas modas da distribuição de probabilidade empregada. Técnicas tradicionais de classificação podem ser usadas na análise espacial de atributos, mas só são confiáveis se a quantidade de agrupamentos for pequena, e conhecida a priori (JAIN e DUBES, 1988). Determinar a quantidade de agrupamentos, a partir dos dados, é um procedimento muito caro computacionalmente, e não garante a produção de resultados satisfatórios.

Uma hipótese frequentemente utilizada é a de que agrupamentos individuais apresentam distribuições multivariadas normais, isto é, o espaço de atributos pode ser modelado como uma mistura de funções gaussianas (DUDA et al., 2001). Os parâmetros da mistura são então estimados pelo critério de minimização de erros. Como exemplo, SAHOO et al. (1988) apresenta diversos algoritmos que se baseiam em análises de histograma segundo modelos com mistura de funções gaussianas. Entretanto, não existe evidência teórica que a extração de um agrupamento, com distribuição normal, necessariamente corresponda a uma feição significativa na imagem. Pelo contrário, aparece uma confusão de agrupamentos quando diversas feições são mapeadas em regiões parcialmente sobrepostas (no espaço de atributos).

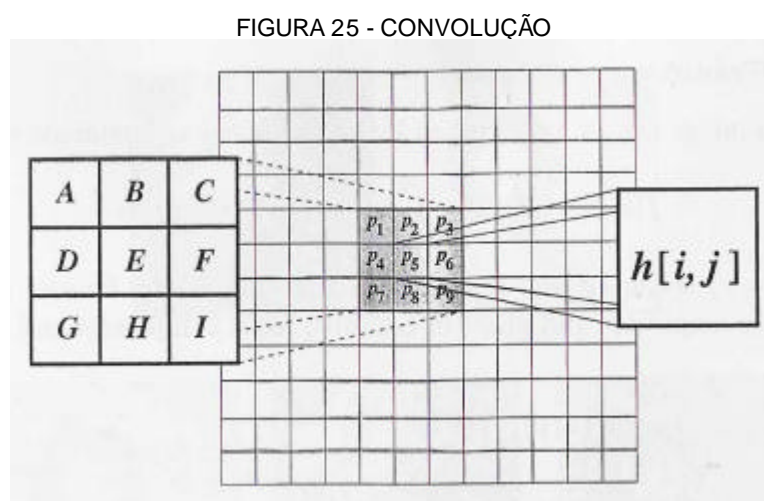
2.6.2 Conceitos Estatísticos

Em Estatística, os testes tradicionais (paramétricos) pressupõem o conhecimento da distribuição de probabilidade de onde vieram os dados, para que as inferências sejam adequadas. Por exemplo, é preciso verificar se a condição de normalidade dos dados é satisfeita no caso dos testes usados no planejamento de experimentos usuais. Entretanto, em muitas áreas de aplicação, tais premissas não são válidas, sendo necessário o uso de métodos alternativos que prescindam das suposições paramétricas. Esses métodos, ditos não-paramétricos, se baseiam em premissas muito menos restritivas sobre o comportamento dos dados e podem ser de grande utilidade em uma análise estatística. As técnicas não-paramétricas não adotam nenhum tipo de distribuição para as variáveis aleatórias. Suas primitivas são obtidas diretamente a partir dos dados.

A robustez de um método estatístico é a propriedade que traduz a capacidade desse método se mostrar pouco sensível em relação a afastamentos das hipóteses pressupostas para a sua aplicação. Por exemplo, o teste "t" e o teste F da ANOVA são métodos robustos.

2.6.3 Kernel

Dados uma imagem f e uma função impulso g , JAIN et al. (1995) define convolução da imagem f , com o impulso g , como sendo a somatória ponderada dos pixels da imagem f , usando os pesos do impulso g . Este procedimento gera uma outra imagem h . A função de impulso g também é denominada máscara de convolução.



FONTE: JAIN ET AL., 1995

Para cada pixel $[i, j]$ na imagem, é gerado um valor resultante $h[i, j]$. Para o cálculo deste valor centra-se a janela da máscara de convolução no pixel selecionado $[i, j]$, e toma-se a somatória ponderada dos pixels em uma vizinhança de $[i, j]$, dentro de uma janela comum, onde os pesos individuais são os valores correspondentes na máscara de convolução. A Figura 25 ilustra o cálculo da convolução usando uma máscara de convolução com tamanho 3x3. Para este caso, tem-se:

$$h[i, j] = Ap_1 + Bp_2 + Cp_3 + Dp_4 + Ep_5 + Fp_6 + Gp_7 + Hp_8 + Ip_9 \quad (48)$$

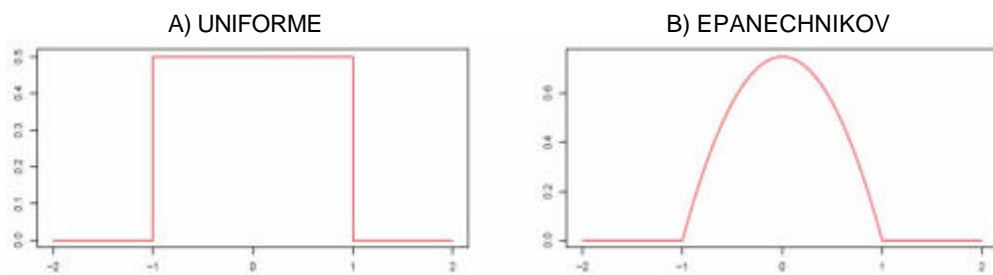
A máscara de convolução, ou melhor dizendo, a matriz de pesos discreta pode ser substituída por uma função matemática contínua simétrica, em torno do ponto central $[i, j]$, que determine a influência dos pontos vizinhos sobre uma característica qualquer que se deseje estimar no ponto selecionado. Esta função considera todos os pontos dentro de uma região de influência, e tem, como variável reguladora da ponderação, a distância normalizada de cada um à localização de interesse. Este

conceito pode ainda ser generalizado para quaisquer dimensões, sendo muito empregado em métodos não-paramétricos de estimativa de propriedades.

A função matemática simétrica, denominada kernel de convolução, deve satisfazer determinadas condições (WAND e JONES, 1995), existindo uma enorme variedade (funções de distribuição uniforme, normal, Epanechnikov, biponderada, triponderada, triangular, entre outras). Na prática, uma função kernel é contínua, limitada, simétrica em torno do zero, côncava no zero, com valores reais, e, por conveniência, frequentemente sua integração resulta na unidade. Podem ser funções de densidade de probabilidade. Tipicamente apresentam valores diferentes de zero dentro do domínio $[-1,+1]$, e zero fora deste domínio. É lícito dizer que a função do kernel é suavizar as características dos pontos analisados.

A Figura 26 ilustra unidimensionalmente os formatos do kernel uniforme e do kernel de Epanechnikov. Mais formatos de kernel podem ser encontrados em CHENG (1995).

FIGURA 26 - FORMATO DE KERNEL



Segundo SILVERMAN (1986), o kernel de Epanechnikov (K_E) é um kernel ótimo, garantindo o menor erro médio quadrático total (MISE - *Mean Integrated Square Error*). A equação (49) apresenta a definição do kernel de Epanechnikov, onde c_d é o volume da hipersfera d-dimensional com raio unitário ($c_1 = 2; c_2 = p; c_3 = 4p/3$).

$$K_E(X) = \begin{cases} \frac{(d+2)(1-X^T X)}{2c_d} & \text{se } X^T X < 1 \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad (49)$$

2.6.4 Estimativa Não-Paramétrica da Função Densidade de Probabilidade

Dado um conjunto arbitrário de pontos, o conhecimento da função de densidade de probabilidade (fdp) associada ao mesmo é extremamente relevante, podendo fornecer a base para importantes interpretações físicas sobre as observações.

Em muitos casos, desfruta-se da posição privilegiada de conhecer-se a priori o modelo que descreve a distribuição associada às variáveis aleatórias existentes. Nestes casos, a descrição completa das variáveis aleatórias exige meramente a estimativa de alguns parâmetros. Infelizmente, existem situações em que não se conhece de antemão o comportamento funcional dos dados, o que aponta para a direção de abordagens não-paramétricas. As inferências sobre a distribuição de ruídos existentes nas variáveis aleatórias são, então, extraídas diretamente dos dados existentes.

SILVERMAN (1986) apresenta diversos métodos não-paramétricos para a estimativa de fdp: método de histograma, k-ésimo vizinho mais próximo, estimativa por kernel, etc. O método de estimativa de densidade por kernel, é um dos mais populares.

Dado um conjunto de n pontos $\{x_i\}_{i=1,\dots,n}$ em um espaço Euclidiano d -dimensional \mathfrak{R}^d , o estimador multivariado da função densidade de probabilidade por kernel $K(x)$, da variável escalar independente x , dentro de uma janela com raio (banda de passagem) h , é definido como (SILVERMAN, 1986):

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (50)$$

O uso de um kernel diferenciável permite definir a estimativa do gradiente de densidade como o gradiente da estimativa de densidade por kernel, apresentada na equação (50):

$$\hat{\nabla}f(x) \equiv \nabla\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n \nabla K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (51)$$

De acordo com a equação (51), a estimativa do gradiente de densidade por kernel de Epanechnikov, definido na equação (49), pode ser escrito como:

$$\hat{\nabla}f(x) = \frac{n_x}{n(h^d c_d)} \frac{(d+2)}{h^2} \left(\frac{1}{n_x} \sum_{x_i \in S_h(x)} (x_i - x) \right) \quad (52)$$

onde a região $S_h(x)$ é uma hipersfera de raio h , com volume $h^d c_d$, centrado em x , e contendo n_x pontos. A utilização de um kernel diferente do de Epanechnikov resulta em um cálculo ponderado da estimativa.

2.6.5 Algoritmo de Deslocamento pela Média

O primeiro termo na equação (52) é a quantidade representativa da estimativa de densidade por kernel $\hat{f}(x)$, calculada dentro da hipersfera $S_h(x)$ (kernel uniforme):

$$\hat{f}(x) = \frac{n_x}{n(h^d c_d)} \quad (53)$$

e o último termo, ainda na equação (52), é denominado de vetor de deslocamento pela média (*sample mean shift* ou *mean shift vector*):

$$M_h(x) = \frac{1}{n_x} \sum_{x_i \in S_h(x)} (x_i - x) = \frac{1}{n_x} \sum_{x_i \in S_h(x)} x_i - x \quad (54)$$

Usando-se as equações (53) e (54), a equação (52) pode ser reescrita como:

$$\hat{\nabla}f(x) = \hat{f}(x) \frac{(d+2)}{h^2} M_h(x) \quad (55)$$

o que leva a:

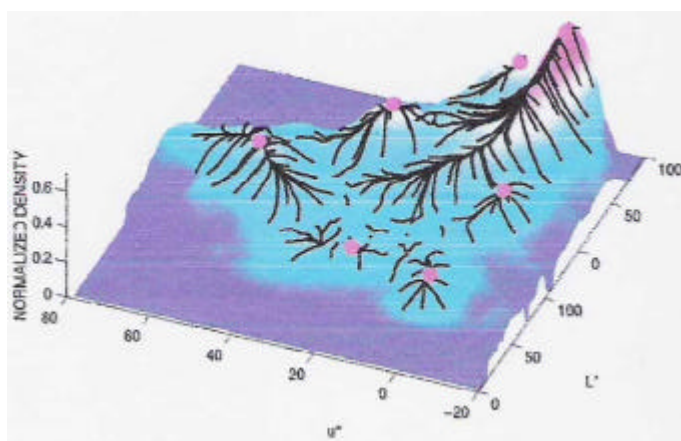
$$M_h(x) = \frac{h^2}{(d+2)} \frac{\hat{\nabla}f(x)}{\hat{f}(x)} \quad (56)$$

A equação (56) foi primeiramente apresentada por FUKUNAGA e HOSTETLER (1975), como um algoritmo de classificação não-paramétrica, e mostra

que a estimativa do gradiente de densidade normalizado pode ser calculada através do deslocamento amostral pela média em um kernel uniforme centrado em x . O deslocamento pela média é um excelente estimador não supervisionado do gradiente de densidade não-paramétrico, e o vetor de deslocamento pela média representa a diferença entre uma média local, calculada em uma janela, e o centro desta janela.

O vetor de deslocamento pela média aponta sempre na direção do maior incremento na densidade, isto é, descobre o caminho que leva a um máximo local de densidade (moda da densidade). O algoritmo trabalha em forma iterativa, deslocando as amostragens sucessivamente em direção ao máximo local mais adequado. A Figura 27 ilustra esta tendência.

FIGURA 27 - TENDÊNCIA DO ALGORITMO DE DESLOCAMENTO PELA MÉDIA



FONTE: COMANICIU E MEER, 2002

Segundo COMANICIU e MEER (1999b), o vetor de deslocamento pela média tem a mesma direção que a estimativa do gradiente de densidade em x quando esta estimativa é obtida pelo kernel de Epanechnikov. CHENG (1995) provou a convergência do algoritmo quando se usa o kernel gaussiano, e COMANICIU e MEER (2002) estenderam esta convergência para qualquer kernel com perfil convexo e monotonicamente decrescente, como o kernel de Epanechnikov. Os centros de convergência (ou janelas) correspondem a modas.

O algoritmo de deslocamento pela média utiliza os seguintes passos:

- a) escolhe-se o raio da janela de pesquisa (banda de passagem);
- b) inicializa-se a localização da janela;
- c) calcula-se o vetor de deslocamento pela média $M_h(x)$;
- d) movimenta-se a janela de pesquisa conforme o vetor dado por $M_h(x)$;
- e) repete-se os passos c) e d) até a convergência.

O algoritmo de deslocamento pela média pode ser estendido para processamento de imagens levando em consideração a vizinhança espacial de cada pixel selecionado (COMANICIU e MEER, 2002). Estes autores introduzem o domínio conjunto: toda amostra passa a ser descrita pela união do domínio da imagem (características da imagem: tons de cinza, componentes RGB, etc.) com o domínio espacial (localização de um pixel dentro da imagem). Dado $z_i^m = \{s_i^m, a_i^m\}, \forall i \in [1..n]$, domínio conjunto, onde s representa a informação espacial e a a informação contida na imagem, Comaniciu e Meer criaram o kernel definido pelo produto de dois kernels: K_A para o domínio da imagem, e K_S para o domínio espacial.

A estimativa de densidade (suavizada) pode ser, então, escrita como:

$$\hat{f}(z_j^m) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_A h_S} K_A \left(\frac{a_j^m - a_i^m}{h_A} \right) K_S \left(\frac{s_j^m - s_i^m}{h_S} \right) \quad (57)$$

onde h_A e h_S são as bandas de passagem no domínio da imagem e no domínio espacial, respectivamente. Somente as amostras que recaem dentro dos limites impostos por estas bandas de passagem e z_j^m é que contribuem para a estimativa da densidade no ponto z_j^m . O deslocamento das médias é realizado em ambos os espaços separadamente, isto é:

$$a_j^{m+1} = a_j^m + M_{h_A, K_A}(a_j^m) \quad \text{e} \quad s_j^{m+1} = s_j^m + M_{h_S, K_S}(s_j^m) \quad (58)$$

e a convergência ocorre simultaneamente em ambos os domínios, quando ambos os vetores de deslocamento pela média ficarem abaixo de um limiar. O algoritmo classifica os pontos segundo os agrupamentos existentes nos dois domínios.

Quando se usa um só kernel, seja no domínio da imagem, as amostras

pertencentes ao mesmo grupo estatístico, considerando-se somente as características deste domínio, convergem para uma mesma moda. É comum, entretanto, que esta moda seja resultante de diferentes localizações espaciais, incluindo a própria. Pela atualização do deslocamento no domínio espacial também (de forma conjunta), a localização das amostras no domínio da imagem muda, em cada iteração, mas sem esquecer a vizinhança espacial de que é originária.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 RECURSOS UTILIZADOS

Os recursos materiais foram disponibilizados pelo Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná e Departamento de Engenharia Geomática da Universidade de Calgary.

Os recursos materiais mais importantes foram:

-) um microcomputador Pentium IV - 2,4GHz, com memória principal de 1GB, e 80GB de capacidade de disco rígido;
-) imagens tomadas por uma câmara digital DSC-F717, de pequeno formato, da Sony, sobre o campus do Centro Politécnico da UFPR, datadas de 27/06/2003;
-) dados provenientes de levantamento efetuado por sistema de varredura a LASER (OPTECH / INS GPS APPLANIX), pertencente ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC - UFPR), sobre a mesma área do campus do Centro Politécnico da UFPR, em data de 09/05/2003;
-) programas computacionais: Compilador Delphi IV da Borland Inprise; Microsoft Visual Studio Professional 2005 (Calgary); Microsoft Office 2000 Standard; ENVI 3.4; Surfer 7.0, e Adobe Photoshop 6.0;
-) material bibliográfico disponível na Biblioteca do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, incluindo Portal da CAPES, e na Biblioteca da Universidade de Calgary.

3.1.1 Materiais

O levantamento fotográfico da região do campus do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em Curitiba, foi realizada no dia 27/06/2003,

por volta das 14h30, em vôo com altitude aproximada de 1650m. Cerca de 17 imagens foram tomadas com uma câmara digital de pequeno formato Sony DSC-F717, de propriedade da Agritec. A área recoberta foi de aproximadamente 1km².

A câmara empregada tem características de resolução de 5,2Mb, com CCD de dimensões 8,8mm X 6,6mm, apresentando 2560 X 1920 pixels. Esta câmara foi calibrada por DELARA (2003). Os parâmetros de calibração obtidos, mostrados no Quadro 3, são utilizados neste trabalho, sendo:

c = Constante da câmara (ou distância focal), em mm;

x_0, y_0 = Coordenadas do ponto principal no referencial fiducial, em mm;

k_1, k_2, k_3 = Parâmetros da distorção radial simétrica;

P_1, P_2 = Parâmetros da distorção descentrada;

A, B = Parâmetros de afinidade.

QUADRO 3 - PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DE CÂMARA

DSC-F717	PARÂMETROS	DESVIO PADRÃO
Resolução	2560 X 1920	
Dimensões CCD	8,8mm X 6,6mm	
c	10,078mm	4,58E-3
x_0	-0,246mm	5,24E-3
y_0	-0,142mm	5,26E-3
k_1	-2,25E-03mm ⁻²	8,53E-5
k_2	2,49E-05mm ⁻⁴	1,16E-5
k_3	1,29E-07mm ⁻⁶	4,76E-7
P_1	-1,17E-04mm ⁻¹	1,22E-5
P_2	6,90E-05mm ⁻¹	1,21E-5
A	-1,50E-04	7,68E-5
B	9,54E-06	7,75E-5

FONTE: DELARA (2003)

Muito embora DELARA (2003), seguindo tendência de não fazer uso das dimensões em milímetros do quadro CCD (ANDRADE, 2001; JEYAPALAN, 2004), tenha dado ênfase ao uso da unidade pixels, no cálculo dos parâmetros de calibração

da câmara digital, optou-se aqui pela sua apresentação tradicional, em mm, com intuito de melhor visualização comparativa entre as câmaras digital e a fotogramétrica (item a ser exposto em 3.2.3).

O levantamento por varredura LASER, da mesma região do campus, foi realizado com o sistema OPTECH ALTM (*Airborne LASER Terrain Mapper*) 2050 / INS GPS APPLANIX, pertencente ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC - UFPR). Os sobrevôos foram realizados em 09/05/2003 (cerca de um mês e meio antes das imagens), com altitude aproximada de 1000m. A varredura cobriu uma área aproximada de 7,2 km², dividida em seis faixas (disponibilizadas) de captura contínua. As varreduras são em formato de zig-zag transversal ao vôo.

Os seis arquivos disponibilizados apresentam-se em formato de texto, um ponto por linha de texto, contendo informações sobre: tempo (em segundos, com seis casas decimais); coordenadas espaciais Leste (E), Norte (N) e altitude ortométrica (h) do último pulso (último eco); intensidade de reflectância do último pulso; coordenadas espaciais Leste (E), Norte (N) e altitude ortométrica (h) do primeiro pulso (facultativo); e intensidade de reflectância do primeiro pulso (facultativo). Por facultativo subentende-se que, quando a informação referente ao primeiro pulso não existe (o que ocorre com frequência bastante alta), é porque ela é idêntica à do último pulso.

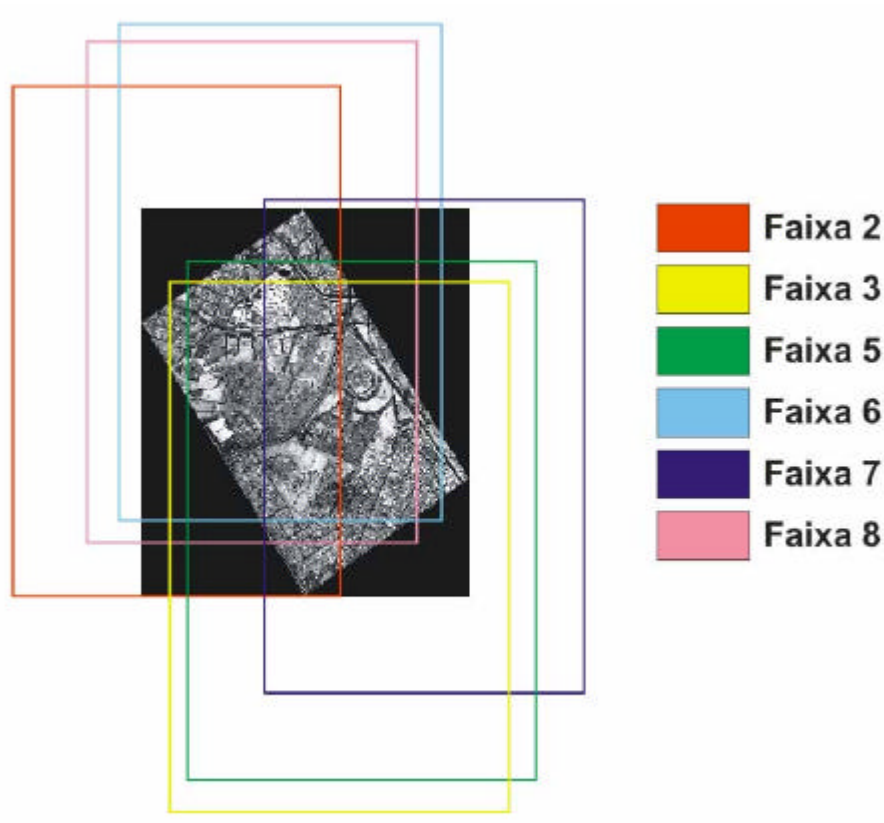
As informações referentes aos dados LASER ainda podem ser entregues segundo uma grade regular obtida por interpolação, regularizando os dados do levantamento, ou em arquivos separados de primeiro pulso e de último pulso. O LACTEC disponibilizou também imagens de intensidade e hipsométrica, em formato TIF, de uma área central do levantamento (muita sobreposição entre faixas), obtidas por interpolação com espaçamento regular de 0,40m.

A Figura 28 indica a localização das seis faixas de varredura LASER sobrepostas à imagem de intensidade fornecida, e o Quadro 4 provê informações sobre as faixas obtidas.

Tendo em vista a localização das faixas de varredura do LASER, e a

existência de uma imagem (DSC04197.JPG) compreendendo diversos tipos de edificações, campos, árvores próximas de edificações, além de pontos de controle pré-sinalizados, optou-se pela seleção de uma única imagem. Esta opção ainda minimizou o trabalho de determinação dos parâmetros de orientação, que não é o enfoque deste trabalho.

FIGURA 28 - LOCALIZAÇÃO DAS FAIXAS DE VARREDURA LASER



QUADRO 4 - INFORMAÇÕES SOBRE FAIXAS DE VARREDURA LASER

Faixa	Qtde de Pontos	Retângulo Envolvente			
		Emin	Nmin	Emax	Nmax
2	2255115	675118,628	7182731,862	677600,737	7186583,841
3	2274683	676309,711	7181095,783	678874,654	7185105,033
5	2289735	676448,935	7181334,144	679083,589	7185258,113
6	2101740	675925,493	7183298,020	678376,898	7187062,330
7	2029549	677025,139	7181994,834	679453,121	7185729,298
8	2486898	675687,486	7183136,213	678175,041	7186920,490

A imagem escolhida, apresentada na figura 29, tem seus parâmetros de orientação exterior indicados no Quadro 5. Estes parâmetros foram obtidos através de um ajustamento de diversos pontos de apoio observados na imagem.

FIGURA 29 - IMAGEM SELECIONADA (DSC04197.JPG)



QUADRO 5 - PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR DE IMAGEM

DSC04197.JPG	PARAMETROS	DESVIO PADRAO
X_0	677607,705	8,456E-1
Y_0	7183723,953	6,759E-1
Z_0	1651,643	4,337E-1
KAPA	1,951547	2,347E-4
PHI	0,008552	5,888E-4
OMEGA	-0,015407	4,037E-4

Sabendo-se que a altitude média da região visualizada é de aproximadamente 900m, pode-se calcular o valor da distância amostral do terreno ($GSD = \textit{Ground Sample Distance}$) como sendo 25cm (por pixel). Este valor pode ser obtido através da escala da foto:

$$GSD = \text{Tamanho do Pixel} * \frac{\text{Altura de Vôo}}{\text{Constante da Câmara}} \quad (59)$$

onde:

$$\text{Tamanho do Pixel} = \frac{8,8}{2560} = \frac{6,6}{1920} = 0,0034375 \text{mm} / \text{pixel} \quad (60)$$

Já no aspecto referente à massa de dados LASER, procedeu-se à seleção dos pontos de varredura cobertos pela imagem escolhida. O Quadro 6 informa a quantidade de pontos selecionados. Estes pontos tanto podem ser do primeiro pulso como do último pulso, sem duplicidades.

QUADRO 6 - QUANTIDADE DE PONTOS DE VARREDURA LASER

FAIXA	TOTAL DE PONTOS LASER	PONTOS LASER SOBRE A IMAGEM DSC04197.JPG			TOTAL PTOS SELECIONADOS
		PRIMEIRO PULSO	ÚLTIMO PULSO	PRIMEIRO E ÚLTIMO	
2	2255115	48580	48586	48577	48589
3	2274683	207961	207923	207911	207973
5	2289735	472779	472766	472761	472784
6	2101740	166811	166882	166790	166903
7	2029549	7426	7435	7423	7438
8	2486898	477816	477786	477773	477829
TOTAIS	13437720	1381373	1381378	1381235	1381516

Visando-se determinar a densidade de pontos LASER observáveis na imagem, tem-se que a área de terreno coberto pela imagem (0,339 km², calculados através das coordenadas de terreno dos quatro cantos da imagem) é varrida por 1381516 pontos, resultando 4,0698 pontos/m² ou, linearmente, 2,017 pontos/m, em média. É importante salientar-se que se trata de uma média, pois existem várias subregiões, dentro da imagem, cobertas por mais do que uma faixa, isto é, com sobreposição de faixas.

3.2 METODOLOGIA

A literatura apresenta diversas metodologias para se extrair contornos de

edificações, considerando-se informações provenientes de uma varredura LASER, sobretudo as sustentadas por modelos digitais de superfície normalizada. Esta sistemática utiliza tão somente os dados oriundos de perfilamento LASER, que constituem o modelo digital de superfície (DSM). A partir do DSM, por extrapolação, obtém-se o modelo digital de terreno (DTM). Nesta empreitada usam-se procedimentos de eliminação de desníveis abruptos. A diferença entre o DSM e o DTM compreende edificações, vegetações, e outros resíduos.

Neste trabalho procura-se fugir desta orientação, tendo em vista, que se dispõe de mais informação (não somente os dados de varredura LASER): a imagem da região trabalhada. Os sistemas de varredura LASER apresentam grande precisão na altimetria, em detrimento da planimetria, ao contrário dos trabalhos fotogramétricos. Neste sentido, a imagem da mesma região varrida por um sistema de perfilamento LASER, acrescenta mais informação ao conjunto, com conseqüente melhoria da precisão e acurácia, constituindo um agrupamento interessante de informação. Outro detalhe importante a ser observado é o fato de que as distâncias amostrais de terreno coberto pela imagem são menores (melhor resolução) que as existentes no perfilamento LASER.

A elaboração de procedimentos automáticos de extração de contornos de edificações é permeada de grandes dificuldades, apesar da resolução de forma aparentemente simples pelo nosso cérebro. Nesta busca, o pesquisador deve se apoiar em quantas informações estiverem disponíveis, com o objetivo de minimizar a dependência de fatores externos. Não obstante todas as informações disponibilizadas, as metodologias existentes ainda se ressentem de informações extras, como limiares adequados e diferentes para cada caso, funcionando bem apenas em casos específicos.

Diante destes fatos cria-se uma necessidade de atentar com maior peso às informações fornecidas pela imagem digital, contra-indicando metodologias originárias do espaço-objeto. Por outro lado, analogamente aos modelos digitais de superfície normalizada, onde se tem regiões representativas do objeto pesquisado, pode-se pesquisar uma sistemática baseada em regiões segmentadas na imagem digital

por semelhança de cores. Esta é a proposta deste trabalho, para alcançar o objetivo principal.

Iniciando-se o desenvolvimento da metodologia, observou-se, cedo, a necessidade de adoção de algum mecanismo de manipulação rápida dos pontos de varredura LASER. Para se superar este problema, implementou-se uma estrutura de dados simples e eficiente. Esta estrutura é explanada no item 3.2.1, sob o título de manuseio da massa de dados LASER.

Dando-se prosseguimento, vislumbrou-se que a busca de feições retilíneas na imagem poderia ser um bom ponto de partida. Para isto, dever-se-ia eliminar as distorções existentes na imagem digital, já que poderiam converter quaisquer feições retilíneas em curvas, falseando resultados.

Neste afã, constatou-se que a aproximação usual de empregar as coordenadas não distorcidas, como se fossem as distorcidas, válidas para câmaras fotogramétricas, não era adequada, introduzindo graves erros de aproximação. Desta forma, concluiu-se pela obrigatoriedade de uso de métodos iterativos para a resolução do sistema de equações para introdução dos erros sistemáticos. Esta parte da metodologia é detalhada no item 3.2.2, sob o título de refinamento das coordenadas de imagem, mostrando claramente as diferenças de comportamento entre uma câmara fotogramétrica e não fotogramétrica.

Para se adicionar conhecimento à metodologia necessita-se de informação. Neste caso dispõe-se de coordenadas tridimensionais de pontos de varredura LASER (espaço-objeto) e de imagem colorida (espaço-imagem). O espaço comum adotado para a agregação de tais informações foi denominado de EIID (espaço-imagem isento de distorções), sendo descrito no item 3.2.3. A nuvem de pontos LASER, projetada no EIID, adiciona a informação de altimetria em alguns pixels que apresentam correspondência. O espaço de cores RGB da imagem (imagem original reamostrada no EIID), convertido para o espaço "isotrópico" CIELUV, adiciona a cor.

A metodologia desenvolvida neste trabalho faz uso do processo de segmentação por cores de imagem, via algoritmo de deslocamento pela média no

espaço de cores CIELUV. O item 3.2.4 descreve minuciosamente, como não encontrado na literatura, este algoritmo. A seguir, no item 3.2.5, comenta-se sobre o algoritmo de perseguição de contornos por varredura radial, o melhor experimentado para a geração dos contornos das regiões segmentadas, definindo-os pixel por pixel.

Complementarmente à segmentação por cores deve-se efetuar um trabalho de análise e filtragem dos segmentos encontrados, eliminando-se as regiões não condizentes com edificações. Quanto melhor a efetivação desta etapa, tanto melhor serão os resultados obtidos.

Para se filtrar os segmentos, três filtros são aplicados sucessivamente, diminuindo passo a passo a quantidade de regiões avaliadas: filtro para o padrão VERDE, filtro altimétrico, e filtro Douglas-Peucker.

O filtro para o padrão VERDE usa a cor média no espaço de cores CIELUV para excluir regiões próximas do tom de verde, ensejando eliminação de vegetação (árvores, etc) dentre as regiões segmentadas. O filtro altimétrico, através da altitude média das regiões, classifica binariamente todas as regiões como ALTA ou BAIXA, eliminando todas as regiões rotuladas como BAIXAS. Finalmente, o filtro Douglas-Peucker busca contornos retilíneos nas regiões persistentes, baseando-se no grau de simplificação das poligonais envolventes (algoritmo de Douglas-Peucker) destas regiões. Estes filtros são descritos no item 3.2.6, refinamento.

As regiões que passaram pelo crivo dos filtros apresentados são avaliadas quanto à possibilidade de fusão entre regiões vizinhas, estabelecendo-se os contornos definitivos (nível de pixel) do que se acredita serem edificações. A fusão de polígonos ainda faz parte da etapa de refinamento.

A última etapa transforma as coordenadas de imagem dos pontos mais significativos do contorno de uma edificação presumida, para coordenadas de terreno, vetorizando-os, com detalhamento explicado no item 3.2.7. Esta transformação é realizada via equações de colinearidade, em sua forma inversa, mas sem iterações. A sistemática implementada é esmiuçada sob o título de monorestituição sem iterações, item 3.2.8.

3.2.1 Manuseio da Massa de Dados LASER

A operacionalização da massa de dados 3D dos pontos gerados pela varredura do sistema LASER requer cuidado especial no que se refere à estrutura de dados utilizada para seu manuseio. Isto ocorre devido ao grande volume de informações existentes, com evidente necessidade de rapidez para seu acesso (repetitividade de busca de pontos em algoritmos).

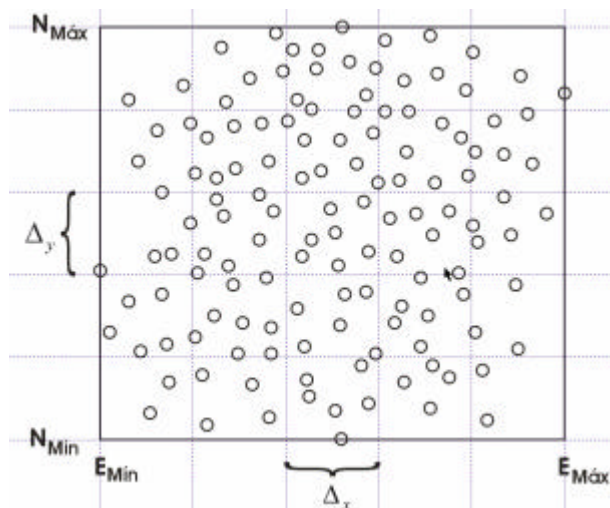
Para se ter uma idéia, um dos mais modernos equipamentos de varredura a LASER, dos dias atuais, utiliza uma frequência de varredura igual a 100KHz. Isto significa que, em tese, 100.000 pontos são levantados em um segundo. Se um vôo demora 10 minutos com seu sistema de varredura funcionando, tem-se cerca de 60 milhões de pontos gerados (com coordenadas tridimensionais da superfície varrida X, Y, Z do primeiro/último pulso, mais intensidades de reflexão do primeiro/último pulso). Para se processar todo este grande conjunto de dados deve-se empregar técnicas adequadas de estruturação dos dados com algoritmos especiais, sob pena de se inviabilizar qualquer processamento destes pontos.

Para se superar esta dificuldade, dividiu-se todo o conjunto de pontos em agrupamentos bidimensionais (planimétricos), em formato matricial (ver Figura 30). A determinação da extensão de cada agrupamento de pontos deve ser realizada a partir dos limites de domínio das abcissas (coordenadas Leste) e das ordenadas (coordenadas Norte) empregadas. Como exemplo, no caso do presente trabalho, os domínios para coordenadas Leste foram [677216, 677940], e para coordenadas Norte foram [7183319, 7184134].

Os intervalos de domínio podem ser divididos segundo uma quantidade fixa (diferente ou não para abcissas e ordenadas), como por exemplo, 100 partes cada um, totalizando 100x100 agrupamentos de pontos espacialmente vizinhos. As 100 subdivisões nas abcissas medem $(677940 - 677216)/100 = 7,24\text{m}$ cada uma, e as 100 subdivisões nas ordenadas medem $(7184134 - 7183319)/100 = 8,15\text{m}$ cada uma, determinando uma área de $7,24\text{m} \times 8,15\text{m} = 59,006\text{m}^2$ por agrupamento, com uma

média de $1381516/10000 = 138,15$ pontos por agrupamento (*cluster*).

FIGURA 30 - AGRUPAMENTO DE PONTOS



Visando-se automatizar o processo mencionado, sem se preocupar com a quantidade de pontos existente ou a área coberta, melhorando o que já tinha sido feito, resolveu-se especificar a quantidade média de pontos desejada por agrupamento. A partir daí o algoritmo deveria ter condições de calcular a quantidade de divisões em cada domínio.

Empregando-se o mesmo exemplo, e estabelecendo-se em 100 a quantidade média de pontos por agrupamento, tem-se $1381516 \text{ pontos}/100 = 13815$ agrupamentos. Extraíndo-se a raiz quadrada deste valor (caso em que a quantidade de divisões nas abcissas e nas ordenadas são iguais, ou de outra forma) tem-se a quantidade de divisões no intervalo de domínio das abcissas e das ordenadas igual a 117. Determina-se, finalmente, a extensão destas divisões: As 117 subdivisões nas abcissas medem $(677940 - 677216)/117 = 6,19\text{m}$ cada uma, e as 117 subdivisões nas ordenadas medem $(7184134 - 7183319)/117 = 6,97\text{m}$ cada uma, determinando uma área aproximada de $6,19\text{m} \times 6,97\text{m} = 43,144\text{m}^2$ por agrupamento.

Genericamente, pode-se calcular os tamanhos dos intervalos pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned}\Delta_x &= (E_{M\acute{a}x} + dE - E_{M\acute{i}n}) / K_x \\ \Delta_y &= (N_{M\acute{a}x} + dN - N_{M\acute{i}n}) / K_y\end{aligned}\tag{61}$$

onde $E_{Máx}$, E_{Min} , $N_{Máx}$, N_{Min} representam respectivamente as abcissas máxima e mínima, e ordenadas máxima e mínima do conjunto de pontos estudado. dE e dN são valores muito pequenos (um determinado porcentual de E_{Min} e N_{Min}) quaisquer, e introduzidos tão somente para se garantir que todo intervalo seja fechado a esquerda e aberto a direita [..., ...), garantindo que $E_{Máx}$ e $N_{Máx}$ estejam dentro do último intervalo. K_x e K_y representam a quantidade de grupos segundo a dimensão das abcissas e das ordenadas, que de forma geral podem ser até diferentes entre si. Neste trabalho adotou-se valores idênticos, conforme equação (62):

$$K_x = K_y = \sqrt{\frac{\text{Qtde total de pontos LASER}}{\text{Qtde média de pontos por agrupamento}}} \quad (62)$$

A estratégia empregada, para se efetuar rapidamente o acesso à massa de coordenadas 3D, de agrupamento por posicionamento espacial dos pontos, exige a pré-classificação de todos os pontos, segundo suas coordenadas planimétricas. Esta pré-classificação ocorre apenas uma vez e em etapa anterior à da sua utilização. Os pontos são ordenados segundo o agrupamento a que pertencem, e armazenados previamente nesta ordem. Dentro de um agrupamento não importa a ordem dos pontos. Esta classificação, dadas suas características, tem condições de ser bastante rápida (não envolve classificação de todos os pontos, mas sim de grupos de pontos).

Para se saber a identificação do grupo, ao qual um determinado ponto pertence, usa-se a equação (63):

$$\begin{aligned} C &= \text{Trunc}((X - E_{Min}) / \Delta_x) + 1 \\ L &= \text{Trunc}((Y - N_{Min}) / \Delta_y) + 1 \end{aligned} \quad (63)$$

onde $C \in [1, K_x]$, $L \in [1, K_y]$ definem respectivamente a coluna e a linha da grade; *Trunc* é uma função que converte números reais para números inteiros, truncando a sua parte fracionária; X e Y representam a abcissa e a ordenada (coordenadas planimétricas) do ponto analisado. Deve-se ressaltar que a quantidade de pontos por agrupamento (coluna e linha da grade) varia, não existindo nenhum relacionamento entre os diferentes grupos.

A grande vantagem da estrutura de dados utilizada é a simplicidade. Ao se efetuar a leitura das coordenadas dos pontos, e sabendo-se da subdivisão de agrupamentos empregada através da pré-classificação, gera-se adicionalmente apenas dois números para cada agrupamento: O apontador para a primeira coordenada de ponto do grupo, e um contador de elementos pertencentes ao conjunto. Tecnicamente falando existe redundância aí, pois o último ponto de cada grupo vem a ser o anterior ao primeiro ponto do grupo seguinte. Na programação desenvolvida utilizou-se os dois elementos comentados (um apontador e um quantificador). O fato é que esta estratégia simples necessita de apenas 8 bytes (dois números inteiros com 4 bytes cada) vezes 100x100 agrupamentos (exemplo abordado), totalizando 80Kbytes. Como se pode constatar a estrutura de dados empregada é bastante básica, sem exageros de utilização de memória principal do computador, fácil de programar e, o mais importante, bastante rápida.

A técnica de agrupamento efetuada determina uma grade regular, como se fosse uma supermatriz sobre o conjunto de pontos de varredura LASER. Qualquer pesquisa que precise ser feita, em torno de um ponto, usa um agrupamento central, qual seja o agrupamento do ponto em questão, determinado a partir de suas coordenadas planimétricas pela equação (64) e, eventualmente, no máximo mais 8 agrupamentos vizinhos ao agrupamento central mencionado. A pesquisa se desenvolve então, conforme o exemplo abordado, em cima de aproximadamente 100 pontos (uma cela central) ou 900 pontos (uma cela central mais 8 celas vizinhas). Torna-se claro que esta pesquisa tem que ser muitíssimo mais rápida do que a que analisa 1000000 de pontos.

Para melhorar ainda mais o acesso a todos estes pontos, pode-se armazenar os mesmos na memória principal do computador. Esta sistemática utiliza, aproximadamente, 1000000 pontos vezes 3 coordenadas (X, Y, Z) vezes 8 bytes (precisão dupla em ponto flutuante) por coordenada unidimensional, ou seja 24,0Mb, o que é bastante razoável e não impactante sob o ponto de vista de uso de memória.

3.2.2 Refinamento das Coordenadas de Imagem

Para se correlacionar as informações relativas ao espaço-objeto e espaço-imagem, deve-se seguir uma seqüência de transformações garantindo a fidedignidade das coordenadas transformadas. O embasamento para este assunto foi comentado no item 2.1.

A imagem gerada por uma câmara fotogramétrica ou digital apresenta distorções resultantes de desvios da perfeita projeção central, e são causados por erros sistemáticos e aleatórios. Para que se possa utilizar os métodos de ajustamento por mínimos quadrados, largamente empregados em Fotogrametria, deve-se identificar os erros sistemáticos (modelando-os) e corrigi-los, de forma que os ajustamentos trabalhem apenas com erros aleatórios. A modelagem introduz diversos parâmetros tais que permitam a reconstrução da geometria projetiva no instante da tomada da foto, e sua determinação se dá através de um processo de calibração.

A calibração de uma câmara necessita de um modelo matemático. Diz-se que o modelo é explícito ou implícito se ele fornece explicitamente os parâmetros físicos da câmara ou não. Os modelos mais conhecidos são explícitos: modelo fotogramétrico, e modelo da transformação linear direta (DLT). Neste trabalho utiliza-se o modelo fotogramétrico. Diz-se que ele é um “modelo físico” porque todas as suas componentes podem ser atribuídas diretamente a fontes de erros físicas.

A formulação para correção de erros sistemáticos existentes em uma imagem, no modelo fotogramétrico, embasa-se em teorias fundamentadas em aspectos físicos, apresentando resultados satisfatórios dentro do estado da arte. Costuma-se tratar quatro fontes de erros, por ordem de importância: translação do ponto principal, corrigindo a projeção do centro óptico da câmara sobre a imagem gerada; distorção radial simétrica, devido às imperfeições no processo de fabricação das lentes que compõem a objetiva; distorção descentrada, devido à impossibilidade do fabricante em alinhar perfeitamente os eixos ópticos das lentes; distorção de não ortogonalidade ou afinidade, devido à não planaridade do filme (ou da área do sensor CCD) e não

ortogonalidade entre eixos.

A translação do ponto principal é uma operação muito importante, porque qualquer erro na correção desta implica tratamento inadequado de todos os demais erros sistemáticos, visto que os mesmos se referem ao ponto principal (centro fiducial transladado).

Diversas etapas de transformações são aplicadas quando se parte do espaço imagem, em coordenadas de pixel, para se chegar no espaço objeto, em coordenadas de terreno. Estas etapas iniciam com a aplicação de uma transformação afim geral no plano para converter o referencial levógiro de máquina (como por exemplo, coluna e linha em uma imagem digital) para o referencial dextrógiro fiducial em câmaras fotogramétricas. Como não se dispõe de referencial fiducial, e, por conseguinte de centro fiducial, nas câmaras digitais de pequeno formato, utiliza-se, costumeiramente, o centro geométrico da imagem digital como tal. Conforme mostrado em MITISHITA (1997), os resultados práticos com a transformação afim geral no plano tem sido plenamente adequados nas aplicações desta natureza.

Realizada a transformação afim geral no plano, passa-se à correção dos erros sistemáticos, segundo duas fases. Na primeira, translada-se do centro fiducial para o ponto principal. Na segunda fase, corrigem-se simultaneamente distorção radial simétrica, distorção descentrada e distorção de afinidade, sempre em relação a uma mesma coordenada referida ao ponto principal. Para se chegar ao referencial de terreno, no espaço objeto, usa-se ainda a equação de colinearidade, não abordada aqui.

Deve-se olhar com atenção especial, entretanto, a tarefa (inversa) de introdução dos erros sistemáticos, quando se vem do espaço objeto pretendendo-se chegar no espaço imagem. Tal é o percurso adotado usualmente na produção de ortoimagens, bem como no presente trabalho. Este sentido de transformação apresenta grandes discrepâncias, quando não equacionado adequadamente, especialmente no caso de imagens tomadas por câmaras digitais não métricas. Na era em que as câmaras digitais de pequeno formato assumem um papel cada vez mais acentuado na Fotogrametria, a ponto de serem inclusive montadas em helicóptero com fins

profissionais (Ver MITISHITA et al., 2001), estes cuidados no equacionamento tornam-se muito relevantes.

Estes cuidados não são desconhecidos da comunidade, principalmente da área de Visão Artificial, que trabalham usualmente com câmaras não métricas. HEIKKILÄ e SILVÉN (1997) apresentam um método de calibração explícita para mapear coordenadas 3D de terreno em coordenadas de imagem, e empregam uma abordagem implícita para correção da imagem, em procedimento de quatro passos. MELEN (1994) usa um processo com duas iterações para estimar as coordenadas de imagem.

Discorre-se, a seguir, sobre a seqüência de transformações exigida para se ir do espaço-imagem ao espaço-objeto e voltar. As diferenças observadas, comparando-se uma câmara fotogramétrica com uma câmara digital de pequeno formato não métrica, usando-se a metodologia aproximada (sem rigor matemático) de introdução de erros sistemáticos, são analisadas.

3.2.2.1 Câmaras

A evidência do que se vai expor aparece de forma nítida quando se compara o comportamento de uma câmara fotogramétrica com uma câmara digital, de sorte que é buscando-se a clareza da exposição que se lança mão de uma câmara fotogramétrica "virtual" neste item.

A câmara digital Sony DSC-F717 tem seus parâmetros de calibração apresentados no Quadro 3 (item 3.1.1). A câmara fotogramétrica adotada provém de trabalho realizado por MITISHITA e OLIVAS (2001). Trata-se de uma câmara WILD RC-10, de propriedade da empresa Universal Aerofotogrametria S.A., montada com o cone grande angular (distância focal nominal de 152,060mm), lente Wild 15 UAG I, calibrada no mesmo trabalho. Seus parâmetros de calibração são mostrados no Quadro 7, e correspondem aos parâmetros de aerofoto digitalizada no trabalho mencionado (Ver MITISHITA e OLIVAS, 2001). A cobertura aerofotogramétrica do trabalho

mencionado foi executada na escala 1/12000, de acordo com as necessidades geométricas exigidas pelo método de calibração ANDRADE (1998).

QUADRO 7 - PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DE CÂMARA

CÂMARA	WILD RC-10
Resolução de Digitalização	23000 X 23000
Dimensões Imagem	230mm X 230mm
c	152,209mm
x ₀	-0,020mm
y ₀	0,036mm
k ₁	6,3892818E-08mm ⁻²
k ₂	-7,4152301E-12mm ⁻⁴
k ₃	2,4049528E-16mm ⁻⁶
P ₁	-9,9601589E-08mm ⁻¹
P ₂	4,3407418E-07mm ⁻¹
A	0
B	0

FONTE: MITISHITA E OLIVAS (2001)

Os negativos do trabalho de MITISHITA e OLIVAS (2001) foram digitalizados no scanner fotogramétrico Digital VEXCEL VX3000, na empresa Universal Fotogrametria S.A. A dimensão do pixel empregado foi de 0,010mm, resultando um arquivo digital com tamanho aproximado de 590Mbytes para cada imagem. Utiliza-se aqui somente a parte útil da digitalização: 23000 pixels por 23000 pixels, como dimensões da imagem digital gerada (230mm/0,010mm por pixel).

3.2.2.2 Transformação entre Referenciais de Imagem e Fiducial

A orientação interior tem por fim transformar o referencial de imagem levógiro de linha e coluna, onde são realizadas as observações, para o referencial fotogramétrico dextrógiro com origem no centro de perspectiva de tomada da foto, adequando as coordenadas das observações, após correção de erros sistemáticos, para

a orientação exterior. O referencial levógiro de linha e coluna tem sua origem no canto superior esquerdo da imagem. Como não existem marcas fiduciais na imagem digital, tomada pela câmara Sony DSC-F717, assumiu-se um centro fiducial situado exatamente no centro geométrico da imagem. O primeiro pixel, no canto superior esquerdo de ambas as imagens, foi definido como sendo o de coordenadas 0,0 (coluna 0 e linha 0).

A transformação de coordenadas entre o sistema de coordenadas de pixel (Col_i e Lin_i) e o sistema de coordenadas fiduciais (x_f e y_f) é dada pela equação (04) (item 2.1.2.1). No caso da câmara Sony:

$$\begin{aligned}x_f &= 0,0034375 * Col_i - 4,39828125 \\y_f &= -0,0034375 * Lin_i + 3,29828125\end{aligned}\quad (64)$$

e no caso da câmara fotogramétrica:

$$\begin{aligned}x_f &= 0,010 * Col_i - 114,995 \\y_f &= -0,010 * Lin_i + 114,995\end{aligned}\quad (65)$$

Ao se efetuar o caminho inverso, isto é, do referencial fiducial para o referencial de coordenadas de pixel (coluna e linha), usa-se a mesma transformação ortogonal, só que agora em sua forma inversa. No caso da câmara Sony:

$$\begin{aligned}Col_i &= 290,90909 * x_f - 1279,5 \\Lin_i &= -290,90909 * y_f + 959,5\end{aligned}\quad (66)$$

e no caso da câmara fotogramétrica:

$$\begin{aligned}Col_i &= 100,0 * x_f - 11499,5 \\Lin_i &= -100,0 * y_f + 11499,5\end{aligned}\quad (67)$$

3.2.2.3 Correção de Erros Sistemáticos

O sistema de coordenadas fotogramétricas tem sua origem no centro óptico da câmara, sendo necessário uma pequena translação de coordenadas, do sistema

fiducial para o sistema fotogramétrico (x_o , y_o e c são informados nos parâmetros de calibração). Os eixos de ambos os referenciais são paralelos e de mesmo sentido.

$$\begin{bmatrix} x_{err} \\ y_{err} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \end{bmatrix} \quad (68)$$

onde x_{err} e y_{err} representam as coordenadas fotogramétricas de observações transladadas do ponto fiducial para o centro de perspectiva (Ver ANDRADE e OLIVAS, 1981), e ainda com erros sistemáticos a serem eliminados.

Com base nos parâmetros de calibração da câmara, todas as observações, após as transformações anteriores, devem ser corrigidas da distorção radial simétrica (k_1, k_2, k_3), da distorção descentrada (P_1, P_2), e das distorções de afinidade ou não ortogonalidade (A, B). O modelo matemático empregado para as correções destes erros sistemáticos é o mesmo utilizado por MONIWA (1977), por ser o mais amplamente difundido na literatura:

$$\begin{bmatrix} x_{corr} \\ y_{corr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{err} \\ y_{err} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d_{rx} \\ d_{ry} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d_{dx} \\ d_{dy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d_{ax} \\ d_{ay} \end{bmatrix} \quad (69)$$

onde x_{corr} e y_{corr} representam coordenadas no sistema fotogramétrico isentas de erros sistemáticos.

As correções da equação (69) são calculadas conforme apresentado nas equações (13), (14), (16) e (18), no item 2.1.4.

Um aspecto muito importante que se deve chamar a atenção é o de que todas as três correções acima são aplicadas às mesmas coordenadas de pontos x_{err} e y_{err} , isto é, referidas ao centro óptico. Então a aplicação destas correções não se dá em cascata (em série), e sim de uma vez só, simultaneamente. Usam-se os mesmos x_{err} e y_{err} para se calcular todas as três distorções. Este detalhe deve sempre ser observado, evidentemente, e deve corresponder ao modelo matemático da calibração realizada. Após estas correções, todas as medidas encontram-se no referencial fotogramétrico isentas de erros sistemáticos.

3.2.2.4 Introdução de Erros Sistemáticos

Suponha-se que se pretenda agora retornar ao sistema de coordenadas de pixel, expresso em colunas e linhas. Torna-se claro que se deve atingir as mesmas coordenadas das quais se partiu. Então, deve-se partir de x_{corr} e y_{corr} , no referencial fotogramétrico, e se chegar em Col_i e Lin_i , pois numa aplicação inversa parte-se de coordenadas X, Y e Z de terreno, aplica-se a equação de colinearidade e obtém-se x_{corr} e y_{corr} , no espaço imagem.

Observando-se com rigor matemático as equações (13), (14), (16) e (18), que calculam as correções a serem aplicadas na equação (69), pelas quais se deveria começar (desconsiderando-se as equações de colinearidade), constata-se que elas não podem ser utilizadas. Isto se dá porque elas são funções de x_{err} e y_{err} (coordenadas fotogramétricas com erros, isto é, não corrigidas de todos erros sistemáticos) e, neste momento, em que se acabou de se chegar do espaço-objeto, não se dispõe destes valores. Tudo o que se tem são x_{corr} e y_{corr} (coordenadas fotogramétricas isentas de erros). A equação (69) fica sendo:

$$\begin{bmatrix} x_{err} \\ y_{err} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{corr} \\ y_{corr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{rx} \\ \mathbf{d}_{ry} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{dx} \\ \mathbf{d}_{dy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{ax} \\ \mathbf{d}_{ay} \end{bmatrix} \quad (70)$$

Atendendo-se o rigor matemático, dever-se-ia usar funções diferentes das equações (13), (14), (16) e (18). Seriam funções que relacionassem x_{corr} e y_{corr} . (e não x_{err} e y_{err}) com os erros introduzidos ($\mathbf{d}_{rx}, \mathbf{d}_{ry}, \mathbf{d}_{dx}, \mathbf{d}_{dy}, \mathbf{d}_{ax}, \mathbf{d}_{ay}$), para só então poder-se utilizar a equação (70). Acontece que não se consegue explicitar x_{err} e y_{err} em função de x_{corr} e y_{corr} . Nestes casos propõem-se o uso de métodos numéricos iterativos, que partem de uma solução aproximada, que é exatamente o que se tem (x_{corr} e y_{corr}). A literatura matemática aponta diversos algoritmos: método da interpolação ou da falsa posição (regula falsi), plotagem sucessiva em escalas maiores (equivalente gráfico de regula falsi), e método de Newton-Raphson, entre outros.

O método de Newton-Raphson permite calcular rapidamente as raízes reais de uma função $f(x)$ quando a derivada desta função for uma expressão simples e

facilmente encontrada. A idéia básica proveio de Newton, mas o método tal como é conhecido hoje é devido a Raphson. No presente caso, tem-se ainda um sistema de duas equações com duas incógnitas, o que remete para método de Newton-Raphson mais abrangente (resolução de sistemas de equações). A equação (71) apresenta o sistema de duas equações com duas incógnitas que se pretende resolver:

$$\begin{bmatrix} F_1(x_{err}, y_{err}) \\ F_2(x_{err}, y_{err}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{corr} \\ y_{corr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{rx}(x_{err}, y_{err}) \\ \mathbf{d}_{ry}(x_{err}, y_{err}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{dx}(x_{err}, y_{err}) \\ \mathbf{d}_{dy}(x_{err}, y_{err}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{ax}(x_{err}, y_{err}) \\ \mathbf{d}_{ay}(x_{err}, y_{err}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{err} \\ y_{err} \end{bmatrix} = 0 \quad (71)$$

Seja o sistema genérico de duas equações com duas incógnitas:

$$\begin{aligned} F_1(x, y) &= 0 \\ F_2(x, y) &= 0 \end{aligned} \quad (72)$$

Agora, se (x_0, y_0) são valores aproximados das raízes do sistema de equações acima, e (h, k) são correções que se deve aplicar aos valores aproximados, tem-se que:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + h \\ y &= y_0 + k \end{aligned} \quad (73)$$

podendo-se reescrever o sistema de equações (72):

$$\begin{aligned} F_1(x_0 + h, y_0 + k) &= 0 \\ F_2(x_0 + h, y_0 + k) &= 0 \end{aligned} \quad (74)$$

Expandindo-se (74) pelo teorema de Taylor para função de duas variáveis, e assumindo-se que h e k são valores pequenos, pode-se desprezar seus quadrados, bem como produtos e termos de mais alta ordem referentes aos mesmos.

$$\begin{aligned} F_1(x_0 + h, y_0 + k) &= F_1(x_0, y_0) + h \left(\frac{\partial F_1}{\partial x} \right)_0 + k \left(\frac{\partial F_1}{\partial y} \right)_0 = 0 \\ F_2(x_0 + h, y_0 + k) &= F_2(x_0, y_0) + h \left(\frac{\partial F_2}{\partial x} \right)_0 + k \left(\frac{\partial F_2}{\partial y} \right)_0 = 0 \end{aligned} \quad (75)$$

Resolvendo-se (75) por determinantes, encontra-se as primeiras correções como sendo:

$$h_1 = \frac{\begin{vmatrix} -F_1(x_0, y_0) & \left(\frac{\partial F_1}{\partial y}\right)_0 \\ -F_2(x_0, y_0) & \left(\frac{\partial F_2}{\partial y}\right)_0 \end{vmatrix}}{D} \quad \text{e} \quad k_1 = \frac{\begin{vmatrix} \left(\frac{\partial F_1}{\partial x}\right)_0 & -F_1(x_0, y_0) \\ \left(\frac{\partial F_2}{\partial x}\right)_0 & -F_2(x_0, y_0) \end{vmatrix}}{D} \quad (76)$$

onde:

$$D = \begin{vmatrix} \left(\frac{\partial F_1}{\partial x}\right)_0 & \left(\frac{\partial F_1}{\partial y}\right)_0 \\ \left(\frac{\partial F_2}{\partial x}\right)_0 & \left(\frac{\partial F_2}{\partial y}\right)_0 \end{vmatrix} \quad (77)$$

Demonstra-se (SCARBOROUGH, 1958) que o processo acima converge sempre que:

$$\begin{aligned} \left| \frac{\partial F_1}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial F_2}{\partial x} \right| &< 1 \\ \left| \frac{\partial F_1}{\partial y} \right| + \left| \frac{\partial F_2}{\partial y} \right| &< 1 \end{aligned} \quad (78)$$

e tanto mais rapidamente quanto menores forem os valores acima em relação à unidade.

Então, para se resolver o sistema de duas equações com duas incógnitas (71), pelo método iterativo de Newton-Raphson, tem-se que inicializar:

$$\begin{aligned} x_0 &= x_{corr} \\ y_0 &= y_{corr} \end{aligned} \quad (79)$$

e iterar de forma que:

$$\begin{aligned} x_n &= x_{n-1} + h_n \\ y_n &= y_{n-1} + k_n \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (80)$$

Os valores de h e k são obtidos pelas equações (76) e (77). Encontrados x_{err} e y_{err} , procede-se à eliminação do translado do ponto principal:

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{err} \\ y_{err} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \end{bmatrix} \quad (81)$$

sendo sucedido pela transformação ortogonal inversa, já apresentada nas equações (66), para a câmara Sony, e (67) para a câmara fotogramétrica.

Caso não se faça uso de um expediente tal como o método iterativo de Newton-Raphson, comete-se um erro de aproximação. Este erro passa despercebido para as câmaras fotogramétricas, graças à ordem de grandeza dos erros sistemáticos existentes (muito pequenos). No caso das câmaras digitais não fotogramétricas esta aproximação ocasiona um erro já significativo para trabalhos fotogramétricos, principalmente por causa da ordem de grandeza da distorção radial simétrica, constituindo por si só um novo erro sistemático não desprezível.

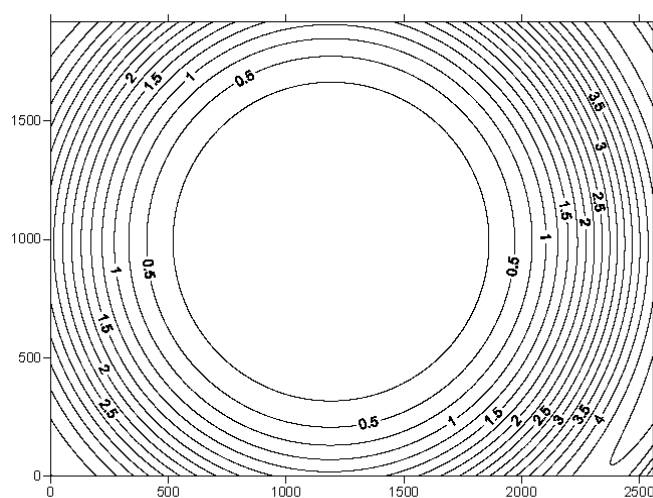
Para verificação do que se está apresentando, fez-se um procedimento que consta em percorrer todos os pixels das duas imagens (fictícias) fornecidas. Sai-se do referencial de imagem e vai-se até o referencial fotogramétrico com isenção total de erros sistemáticos. A seguir retorna-se pelo caminho inverso, sem fazer uso da iteração por Newton-Raphson, ou seja, cometendo-se o erro de aproximação comentado. Verifica-se então as distâncias existentes entre o pixel do qual se saiu e o pixel ao qual se chegou.

Realizado este procedimento, conforme apresentado, não se chega às mesmas coordenadas das quais se partiu, sobretudo para a câmara Sony. Os erros de deslocamento de uma determinada localização (coluna e linha) são dependentes de sua distância ao ponto principal. Os erros que se obtém, neste processo errôneo (em termos matemáticos), expressos em pixel, são apresentados na Figura 31, para a câmara digital Sony, e na Figura 32 para a câmara fotogramétrica. Os cálculos feitos não se preocuparam com o fato de que, ao se retornar ao referencial de imagem, deve-se arredondar coluna e linha para números inteiros. Não se usou deste arredondamento neste experimento, com fins de se observar melhor as discrepâncias existentes.

As diferenças de comportamento entre a câmara Sony e a fotogramétrica são claramente visíveis nas Figuras 31 e 32. As equidistâncias das curvas de isovalores na Figura 31 valem 0,25 pixel, e na Figura 32 valem 0,05 pixel (as escalas são diferentes de forma que aumentam os erros em pixels para a câmara aerofotogramétrica). Chama-

se a atenção ainda para o fato de que os parâmetros selecionados para a câmara fotogramétrica, extraído de MITISHITA e OLIVAS (2001), foram os calibrados sobre uma imagem digitalizada, e não sobre o negativo. Este procedimento provocou um aumento nas distorções radiais nas bordas das imagens. Apesar deste aumento na significância da distorção radial simétrica, verifica-se o não comprometimento da qualidade geométrica destas câmaras pelo equacionamento aproximado de introdução dos erros sistemáticos.

FIGURA 31 - ERROS EM PIXELS PARA A CÂMARA DIGITAL SONY DSC-F717



Depreende-se ainda, destas figuras, que procedimentos aceitos para câmaras fotogramétricas devem necessariamente ser revistos para o caso de câmaras digitais não fotogramétricas, por força da ordem de grandeza dos parâmetros de calibração, sobretudo os da distorção radial simétrica.

O procedimento recomendado, no caso de câmaras digitais não fotogramétricas, para introdução de erros sistemáticos, deve empregar métodos numéricos iterativos de resolução de equações. Neste estudo de caso observou-se que o método de Newton-Raphson atende perfeitamente os quesitos esperados, com erros iguais ou menores que um limiar imposto, em toda a imagem. O limiar empregado foi bastante acurado e igual a $1,0 \times 10^{-6}$, ou seja 0,0003 pixel (câmara Sony). Observou-se que as introduções de erros sistemáticos, em toda a imagem, exigiram praticamente três iterações para cada pixel avaliado (média igual a 2,903 iterações), sendo que não se precisou em momento algum de mais do que três iterações.

3.2.3 Referencial do Espaço-Imagem Isento de Distorções (EIID)

Para se agregar as informações oriundas da imagem digital, e da varredura LASER, deve-se escolher um referencial comum, transformando todas as informações para o novo referencial. Neste trabalho optou-se pela seleção do referencial do espaço-imagem isento de distorções (projeção central). Neste caso, a imagem representa uma projeção central perfeita da região abrangida pela tomada da foto.

A justificativa para a escolha deste referencial baseia-se em dois fatos: o primeiro, já comentado, é o de que as distâncias amostrais de terreno coberto pela imagem são menores (melhor resolução) que as distâncias médias encontradas no perfilamento LASER. Isto leva a uma escolha do espaço-imagem, em detrimento do espaço-objeto.

O segundo fator, levado em consideração para a escolha do referencial comum, se baseia no interesse pelas feições retilíneas (edificações). A imagem distorcida, como o próprio nome diz, transforma os segmentos de reta em curvas,

perdendo uma das principais características desejáveis para pesquisa na imagem.

Para se poder explorar as propriedades de paralelismo (exemplo: bordas opostas de uma edificação) e colinearidade (um segmento de reta dá origem a um segmento de reta) deve-se eliminar todas as distorções existentes na imagem. Estas propriedades são muito importantes na detecção de feições construídas pelo homem. Por outro lado, por causa da projeção central, perde-se a exploração de ângulos retos, visto que esta projeção pode deformar esta característica.

O espaço-imagem, conforme visto em uma imagem digital, é composto por uma rede regular (matriz de pontos). Para se transformar a foto tomada para o EIID deve-se reamostrar a imagem adquirida, gerando uma nova imagem (saída do processo). Para se evitar pontos duplicados ou inexistentes, na nova rede regular de pontos obtida (EIID), aconselha-se que a transformação ocorra do espaço final de saída para o espaço de entrada, conforme técnicas consagradas de processamento de imagem, e em sentido inverso ao esperado.

Para a eliminação das distorções contidas na imagem, com reamostragem no espaço-imagem isento de distorções, deve-se, portanto, introduzir os erros sistemáticos a partir do EIID. Ocorre aqui, então, a necessidade do método iterativo de Newton-Raphson, apresentado no item anterior (3.2.3).

Esta reamostragem pode ocorrer de inúmeras formas, mas basicamente, conservando-se as dimensões da imagem (quantidade de pixels), e/ou o tamanho dos pixels: optou-se, neste trabalho, por conservar as dimensões da imagem, e o tamanho de cada pixel. Desta forma, o aspecto do pixel foi preservado.

No tocante ao espaço-objeto, referido pelas coordenadas dos pontos levantados pelo sistema de varredura LASER, deve-se informar que se optou pelo emprego não só das coordenadas relativas ao último pulso, como também das do primeiro pulso. Ocorre que a perspectiva de tomada da foto é diferente da perspectiva de varredura da superfície, de forma que, no processamento do segundo pulso, ainda acontece pequena agregação de informação.

Na realidade, o único caso em que ocorre diferença entre o primeiro e último

pulsos acontece quando da reflexão em bordas de objetos, onde parte do pulso é refletido pelo objeto e outra parte pelo ambiente vizinho ao objeto. Esta circunstância pode ocorrer tanto em bordas de edificações quanto em vegetações (folhas). Devido a esta confusão de bordas de edificações com vegetações não se explorou neste trabalho as características do primeiro e do último pulsos, nem suas diferenças.

As coordenadas dos pontos LASER são levadas ao EIID através das equações de colinearidade (09). Sempre que houver mais do que um ponto LASER relacionado ao mesmo pixel do EIID, conserva-se aquele que apresentar a maior altitude, em conformidade com as peculiaridades da projeção central (o ponto com a menor altitude fica oculto pelo ponto que tem a maior altitude).

Com a projeção dos pontos LASER sobre o EIID cria-se um referencial 3D (C, L, Z) com coordenadas planimétricas de imagem Coluna e Linha, e altitude proveniente da varredura LASER. A colorimetria advém da foto tomada. Este é o espaço trabalhado nos procedimentos que se seguem.

Tendo em vista a menor distância amostral de terreno coberto pela imagem, em relação à distância média de pontos de varredura LASER, torna-se claro, infelizmente, que a quantidade de pontos da grade regular do EIID com informação altimétrica é muito pequena. Para garantir que todos os pontos deste espaço tenham informação altimétrica necessita-se de interpolação.

Empregou-se interpolação de altitude ponderada pelo inverso da distância dos pontos usados (informação altimétrica conhecida através da varredura LASER) ao ponto que se deseja calcular a altitude. Nesta interpolação, levou-se em consideração apenas os pontos mais próximos ao interpolado, em uma seqüência de diâmetros prefixados crescentes até o encontro de pelo menos um ponto com altimetria conhecida. Os pontos interpolados ficam marcados até o final de todos os procedimentos, avisando que a sua informação não é tão fidedigna quanto a dos pontos obtidos diretamente pela varredura LASER.

3.2.4 Segmentação por Cores (Algoritmo de Deslocamento pela Média)

Sabe-se que a etapa de segmentação é fundamental para se obter um bom resultado no processo de extração de edificações. Segundo BRADSKI e THRUN (2003) o algoritmo de deslocamento pela média talvez seja o melhor segmentador existente na atualidade. Esta afirmação é sustentada por Gari Rost Bradski, Ph.D., membro de Vision, Graphics and Pattern Recognition Group, Intel Labs, da Intel Corporation; e Sebastian Thrun, Ph.D., diretor de Stanford Artificial Intelligence Lab, tendo sob seu comando mais de 120 pesquisadores de Inteligência Artificial, na Universidade de Stanford.

O algoritmo de deslocamento pela média (*mean-shift*) é uma técnica robusta de classificação de agrupamentos que não exige conhecimento a priori sobre a quantidade de grupos, nem restringe o formato destes agrupamentos. Trata-se de um método iterativo que estima a moda (regiões mais densas) de distribuições multivariadas obtidas no espaço de atributos (Ver item 2.7). A quantidade de agrupamentos é obtida automaticamente pela descoberta dos centros destas modas.

A operação mais custosa deste algoritmo, segundo GEORGESCU et al. (2003), é a pesquisa dos vizinhos mais próximos de um ponto no espaço de atributos, problema denominado de pesquisa de elementos em espaço n-dimensional (*multidimensional range searching*) (COMANICIU e MEER, 1999a).

A segmentação de uma imagem colorida, usando o algoritmo de deslocamento pela média, foi apresentado por COMANICIU e MEER (1997). Os autores, através de GEORGESCU e CHRISTOUDIAS (2002), disponibilizam código aberto (freeware) de um programa segmentador denominado de *Edge Detection and Image SegmentatiON (EDISON) System*, em sua versão 1.1. Este aplicativo foi desenvolvido no ambiente de *Robust Image Understanding Laboratory, Center for Advanced Information Processing, Rutgers University*. O programa lê imagens, detecta bordas e realiza segmentação, gerando imagens de saída, com tempo de processamento muito bom (15s para imagem com 512 x 512 pixels). As imagens de saída, da etapa de

segmentação, são em forma de contornos (branco e preto) de regiões com colorido semelhante.

BAILER et al. (2005) comenta, a respeito do algoritmo de deslocamento pela média, que, após a proposta de COMANICIU e MEER (1997), a segmentação de imagens por cores tornou-se um processo largamente empregado, porque fornece melhor segmentação que outras abordagens (por exemplo algoritmo *watershed*), segmentos com tamanho mais apropriado, e robustez em casos de mudanças de iluminação.

Não existe dúvida que uma imagem colorida contém mais informação que uma imagem em tons de cinza. Um dos melhores algoritmos de detecção de bordas em imagens, o operador de CANNY (1983), em sua forma original, trabalha com imagens em tons de cinza (monocromática).

O artigo de COMANICIU e MEER (1997) serviu de base, neste trabalho, para a etapa de segmentação de imagem colorida, que ocorreu no espaço-imagem isento de distorções (EIID). O algoritmo de deslocamento pela média é, em tese, bastante simples, mas para melhorar sua eficiência diversos cuidados são necessários, sob pena de se perder muito tempo de processamento (operação custosa), sem resultados adequados.

Visando o processamento de regiões vizinhas, no espaço das cores, COMANICIU e MEER (1997) adotam o espaço de cores CIELUV. A justificativa para este procedimento é a de minimização de parâmetros de definição da forma e tamanho da região circunvizinha, em termos de cores (ver item 2.4.9). Para isto o espaço de atributos deve ser isotrópico, isto é, a distância entre dois pontos quaisquer é independente da localização destes pontos no espaço (independente de translação). Sabe-se que o espaço de cores CIELUV não é perfeitamente isotrópico, mas certamente é um dos melhores espaços de cores nesta direção.

Segue-se que, para segmentar uma imagem, segundo regiões com cores semelhantes, deve-se transformar todas as cores RGB da imagem original (EIID) para o espaço de cores CIELUV. Não se faz isto com todo o espaço de cores RGB

($256*256*256 = 16777216$ cores), mas somente com as cores existentes na imagem (da ordem de 1/3 da quantidade de pixels existentes na imagem).

A seguir, necessita-se de um histograma (fdp) das cores transformadas CIELUV. Como o domínio deste espaço é constituído por números reais, usa-se de realizar o histograma no espaço de cores RGB, obtendo-se o mesmo resultado, já que a função transformação entre os espaços RGB e CIELUV é biunívoca, embora não linear. Obviamente, só se calcula a densidade para as cores existentes.

Para a definição do tamanho da janela de pesquisa ($h = 2*r+1$), no espaço de atributos de cores, COMANICIU e MEER (1997) recomendam valores que resultem de medida da "atividade visual" da imagem, isto é, derivados da matriz global de variância e covariância. O tipo de segmentação que se pretende fazer é definido nesta escolha: subsegmentação ($r = 0,4*s$), supersegmentação ($r = 0,3*s$), e quantização ($r = 0,2*s$). A seguir, calculando o desvio padrão, COMANICIU e MEER (1997) empregam um valor único para as três dimensões da cor (L, U e V), como sendo a raiz quadrada do traço da matriz de variância e covariância. Neste trabalho adotou-se valores diferentes para cada dimensão, conforme a variância da cor na mesma dimensão, e igual a $0,52*s$, almejando supersegmentação (tipo recomendado para tarefas de reconhecimento de objetos).

A estimação da média m e do desvio padrão s é realizada em uma única passada sobre toda a imagem. A forma de cálculo dos estimadores clássicos desses parâmetros são:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (82)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (83)$$

Desenvolvendo a equação (83), tem-se:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X_i^2 - \sum_{i=1}^N (2X_i\bar{x}) + \sum_{i=1}^N \bar{x}^2}{N-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X_i^2 - 2\bar{x}\sum_{i=1}^N X_i + N\bar{x}^2}{N-1}} \quad (84)$$

Mas, da equação (82) pode-se obter:

$$\sum_{i=1}^N X_i = N\bar{x} \quad (85)$$

Substituindo-se (85) em (84), e somando-se os termos correspondentes (86), obtem-se a equação (87), que foi empregada para o cálculo do desvio padrão. Deve-se garantir que os valores dos quais se vai extrair a raiz quadrada sejam sempre positivos.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X_i^2 - 2N\bar{x}^2 + N\bar{x}^2}{N-1}} \quad (86)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X_i^2 - N\bar{x}^2}{N-1}} \quad (87)$$

De acordo com esta equação, em uma varredura de toda a imagem, calcula-se a somatória dos valores dos pixels (um atributo considerado) e a somatória dos quadrados dos valores dos pixels. Ao final, calcula-se a média do atributo (dividindo-se a somatória simples pela quantidade de elementos processados) e, através da equação (87), obtém-se o desvio padrão.

O tamanho da janela de pesquisa no domínio de atributos espaciais deve ser obtido empiricamente, ocorrendo um compromisso entre os efeitos indesejáveis de divisão de uma mesma região (tamanho de janela pequeno) ou união de diferentes regiões (tamanho de janela grande). Neste trabalho adotou-se o valor único de 21 pixels por 21 pixels como sendo o tamanho da janela de pesquisa no âmbito de atributos espaciais.

As janelas de pesquisa, quer no domínio das cores (três dimensões), quer no domínio espacial (duas dimensões), definem uma hipersfera de cinco dimensões. As três dimensões do espaço de atributos das cores são iteradas, no algoritmo de

deslocamento pela média, assumindo novos valores e, por conseguinte alterando o posicionamento da hiperesfera. A janela de pesquisa no domínio espacial é fixa durante todo o processo. Todo o algoritmo de deslocamento pela média é executado dentro desta hiperesfera semi-móvel (parte móvel, parte fixa), com resultado válido para o pixel central da hiperesfera final. Opcionalmente, pode-se estender o resultado para outros pixels, sempre dentro da hiperesfera, que acompanharam o resultado final das iterações.

Explicando-se mais detalhadamente, a sistemática de processamento de um determinado pixel começa no domínio espacial, selecionando-se um determinado pixel. A janela de pesquisa, neste domínio, conforme comentado, permanece imóvel durante todo o processo, sempre centrada no pixel selecionado. Como esta janela é fixa, todos os demais procedimentos (incluindo os realizados no domínio das cores) só levarão em conta os pixels que se encontram dentro desta janela no domínio espacial.

A seguir, levando-se os atributos de cor do pixel selecionado para o domínio das cores, obtem-se uma hiperesfera inicial de ação do processo. Executa-se uma primeira iteração, usando-se tão somente os pixels que se encontram dentro da hiperesfera de cinco dimensões. Obtêm-se novos valores de cor (três dimensões), ensejando um novo posicionamento da hiperesfera. Reitera-se novamente, e assim sucessivamente, até que a diferença de posicionamento entre duas hiperesferas consecutivas seja desprezível. Os últimos valores de cor são armazenados para serem atribuídos, no final de todo o processamento da imagem, ao pixel selecionado inicialmente. O conjunto novo de cores gera uma nova paleta de cores para a imagem.

O algoritmo de deslocamento pela média tem este nome porque, no fundo, não passa de um calculador de média ponderada, deslocando-se segundo os valores desta média. Os pesos dos pixels advém do kernel empregado. Neste trabalho, como em COMANICIU e MEER (1997), empregou-se o kernel uniforme, isto é, as médias são médias aritméticas.

Em vez de processar todos os pixels da imagem de entrada, em sistemática muito demorada, COMANICIU e MEER (1997) optaram pela geração contínua de

uma quantidade predeterminada (25 pixels) de números aleatórios indicadores de linha e coluna de pixel a ser processado (lote). Após cada geração de um lote (25 pixels), todos os pixels gerados são avaliados para se saber qual o que se encontra na região mais homogênea (apresenta mais pontos dentro da hipersfera). Somente um pixel, dentre todos avaliados, é selecionado e processado. O algoritmo termina quando não se encontra mais uma quantidade mínima de pixels dentro da hipersfera, ou não se consegue mais formar um lote. Isto significa que, ao final do processo, tem-se diversos pixels (poucos) que não foram processados. A cor destes pixels é atribuída ao final por proximidade com as cores existentes na nova paleta de cores.

COMANICIU e MEER (1997) empregam ainda uma terceira paleta de cores aceitando como cores definitivas somente as que apresentem uma quantidade mínima de realizações.

O procedimento de segmentação por cores consiste, basicamente, em uma transformação matemática $\mathfrak{R}^5 \rightarrow \mathfrak{R}$, isto é, a partir de cinco variáveis gera um número identificador de segmento, por localidade bidimensional. Todas as regiões identificadas nesta etapa apresentam contornos fechados (polígonos).

3.2.5 Perseguição de Contornos por Varredura Radial

Para se prosseguir com a metodologia deste trabalho necessita-se de distinguir as fronteiras das regiões segmentadas. Esta tarefa é relativamente simples, sendo resolvida através de uma varredura de toda a imagem, seguindo qualquer ordem pré-estabelecida, com marcação dos pixels que pertencem a uma região (via identificador de segmento) com vizinhos em outra região. O conceito de vizinhança é o de 4-vizinhança, isto é, os vizinhos da direita, esquerda, de cima e embaixo. O processo de marcação dá origem a uma matriz bidimensional, com dimensões idênticas à da imagem original, e que só tem dois valores por pixel (bi-valorado): ou marcado, ou não marcado.

Tendo em vista esta sistemática, observe-se que toda região tem o seu

contorno definido, traçado sobre um pixel pertencente à região. Isto quer dizer que uma região vizinha qualquer também vai ter o seu contorno, ou seja, as fronteiras entre uma região e outra vizinha tem traçado duplo (dois pixels são marcados, sendo um de cada região).

Os pixels marcados são usados pelo algoritmo de varredura radial visando a geração dos traçados dos contornos das regiões, compondo polígonos. Este algoritmo também é simples, podendo ser encontrado em diversos livros sobre algoritmos e processamento de imagens, tais como PAVLIDIS (1982), SEUL et al. (2001).

Os pixels de um contorno podem ser percorridos por um caminho, e sempre é possível escolher um caminho fechado para a travessia. PAVLIDIS (1982) mostra uma forma particular de travessia. Ele usa o conceito de 8-vizinho (todos os vizinhos imediatos de um pixel na imagem) com a notação mostrada na Figura 33 para indicar a próxima direção a ser percorrida em relação ao pixel P. As operações numéricas, nesta notação, são em módulo de 8, facilitando os algoritmos.

FIGURA 33 - NOTAÇÃO DE VIZINHANÇA EM RELAÇÃO A UM PONTO P

3	2	1
4	P	0
5	6	7

FONTE: ADAPTADO DE PAVLIDIS, 1982

O algoritmo pode ser descrito em termos de um observador que caminha ao longo dos pixels que pertencem ao conjunto e seleciona sempre o pixel disponível mais à direita. O pixel inicial de um contorno pode ser encontrado de vários modos, inclusive através de uma varredura na imagem de cima para baixo, da esquerda para a direita. Um traçado termina quando se atinge o seu pixel inicial.

Usando-se a notação de PAVLIDIS (1982), com seleção sempre do pixel mais à direita do observador, os contornos externos terão o sentido anti-horário, e os

contornos internos (buracos) terão o sentido horário. Aplicando-se esta orientação sobre a imagem bivalorada obtida anteriormente, com traçado duplo de fronteira de região, verifica-se que todos os contornos obtidos apresentam o sentido horário de percurso. Esta observação é muito importante quando se procura realizar fusões de segmentos, mais adiante.

Ao se executar este algoritmo de perseguição de contorno, memoriza-se a cada visita de pixel, as suas coordenadas, gerando como produto diversas listas de pixels, sendo que cada lista constitui um polígono.

3.2.6 Refinamento

Esta etapa é responsável pela filtragem dos objetos segmentados, pela identificação, e extração das informações que caracterizam um objeto ou feição. Diversas fases são aqui executadas.

Resumindo o que se tem até este momento, no espaço EIID: imagem corrigida de distorções com cores antigas (antes do algoritmo de deslocamento pela média) e novas (depois do algoritmo de deslocamento pela média), altitude para cada pixel (interpolada ou não), identificação de região, por semelhança de cores, para cada pixel, e diversas listas de polígonos, com as coordenadas de todos os seus vértices.

Reunindo as informações de cor originais (CIELUV) e altitude de cada pixel com a identificação de regiões, por pixel, obtém-se a cor média de cada região, e a altitude média de cada região. Observe-se que, para o cálculo de altitude média de uma região, usou-se apenas a informação original, não se levando em consideração as altitudes interpoladas. Nos casos em que não se tinha nem uma altitude para se calcular a altitude média de uma região, desprezou-se a região. Esta tarefa pode ser executada em uma simples varrida de toda a imagem. Estas novas informações são usadas adiante, em uma seqüência de filtragens.

3.2.6.1 Filtro para Padrão VERDE

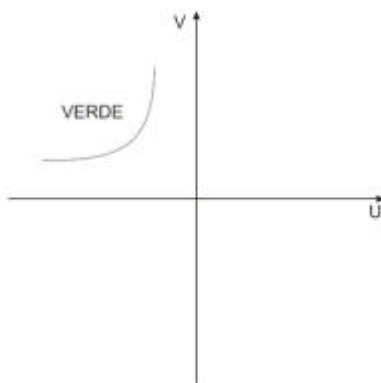
Verificou-se que a varredura LASER, através da diferença de altitude entre seus primeiro e último pulsos, confunde vegetação com bordas de edificações, não fornecendo informação confiável sobre o que é um e o que é outro.

Aproveitando-se das características isotrópicas do espaço de cores CIELUV, e analisando-se as cores formadas neste espaço tridimensional, em função de suas variáveis independentes, estabeleceu-se um subconjunto do domínio destas variáveis para caracterizar o padrão de cor VERDE (com todas suas nuances: *tints*, *shades* e *tones* - ver item 2.4.3), na tentativa de identificar de forma simples e inequívoca a vegetação existente em uma região (através de foto tomada).

Os limiares obtidos nesta análise deviam ser robustos no sentido de poder-se pecar por falta, mas não por excesso, isto é, quando se atribuísse o padrão VERDE, não se deveria errar, ou, mais realisticamente, os erros seriam minimizados. Esta definição foi assumida sabendo-se que erros seriam cometidos.

Na transformação do espaço de cores RGB para CIELUV (ver item 2.4.10), verificou-se que, dentro do domínio $R \in [0 \text{ a } 255]$, $G \in [0 \text{ a } 255]$, e $B \in [0 \text{ a } 255]$, o contradomínio definido é $L \in [0 \text{ a } 100]$, $U \in [-83,079751 \text{ a } 175,053036]$, e $V \in [-134,116076 \text{ a } 107,401365]$. O padrão VERDE, independentemente de luminosidade (L), e de forma aproximada, é obtido no início do contradomínio de U, e no final do contradomínio de V, conforme esclarecido na Figura 34.

FIGURA 34 - LOCALIZAÇÃO DO PADRÃO VERDE NO ESPAÇO DE CORES CIELUV

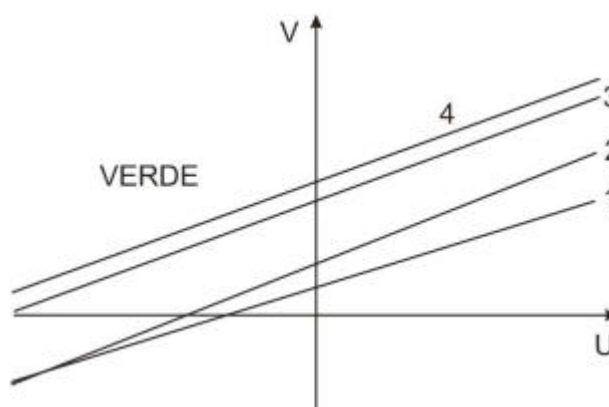


Após diversos testes realizados, definiu-se que a região do padrão VERDE, no espaço de cores CIELUV, poderia ser delimitada através dos parâmetros de quatro retas ($V = A*U + B$). Cada reta atenderia uma faixa do contradomínio de luminosidade. Todo ponto que estivesse acima e a esquerda das retas (no espaço bidimensional U - V) poderia ser considerado como pertencente ao padrão VERDE. O Quadro 8 apresenta estes parâmetros estabelecidos empiricamente, e a Figura 35 fornece uma idéia melhor de sua distribuição espacial, com a identificação das retas especificadas no Quadro 8.

QUADRO 8 - LUMINOSIDADE CIELUV E PARÂMETROS DE RETAS

RETA	FAIXA DE LUMINOSIDADE	COEFICIENTE ANGULAR (A)	COEFICIENTE LINEAR (B)
1	[15 a 50]	1,172291	23,402487
2	(50 a 70]	1,497580	63,752759
3	(70 a 85]	1,382398	124,997724
4	(85 a 90]	1,383178	145,080374

FIGURA 35 - LOCALIZAÇÃO DO PADRÃO VERDE ADOTADO



O filtro VERDE estabelecido funciona, então, da seguinte forma: Avalia-se a luminosidade, e dependendo de seu valor, seleciona-se uma dentre quatro retas. Feito isto, os valores de U e V (espaço de cores CIELUV) são checados para verificar se o ponto UV se encontra acima ou abaixo da reta selecionada, resultando em VERDE ou não, respectivamente.

Este procedimento é realizado com todas as regiões obtidas até o presente momento, classificando a região como pertencente ao padrão VERDE ou não. As regiões com padrão VERDE são eliminadas do processamento, com todos os seus pixels, e seus polígonos de fronteira.

3.2.6.2 Filtro Altimétrico

É evidente que a informação de altitude fornecida pela varredura LASER é de fundamental importância. Para se fazer uso desta preciosa informação, tentando identificar o que é edificação ou não, elaborou-se a sistemática que se segue.

Todas as regiões têm altitude média calculada. Classificou-se estas regiões em ordem ascendente, segundo suas altitudes médias, processando-as nesta ordem. O objetivo deste procedimento é o de atribuir uma classificação como edificação potencial ou não para cada região, em função de exame em todas as regiões circunvizinhas. Assume-se que as vegetações (regiões) já foram eliminadas do processo.

Toda região processada tem sua atribuição, como edificação potencial ou não, auferida, sendo, naquele momento, a região com menor altitude média sem atribuição. As identificações de edificação potencial ou não são baseadas em desníveis abruptos com regiões vizinhas (principal característica), ou semelhança de altitude com regiões vizinhas previamente classificadas.

O Quadro 9 esclarece a lógica do processo, lembrando-se que as regiões são analisadas sempre em ordem ascendente de altitude média. Z_c identifica a altitude média da região corrente (sob análise), e Z_v a altitude média de uma região vizinha qualquer. No processamento de uma região corrente, todas as suas regiões vizinhas são examinadas. A lógica comparativa emprega limiares (histerese), com adoção, no presente trabalho, de 0,5m e 2,5m. Como resultado do processamento obtém-se classificações binárias para as regiões como ALTA ou BAIXA.

Quando do processamento de uma região corrente, se, após o exame de todas

as regiões vizinhas, ainda não houver atribuição para ela (região corrente), atribui-se-lhe a classificação de Baixa, porque deste ponto em diante ela é mais baixa do que todas as posteriores. Esta última regra é bastante poderosa, e ajuda a filtrar de forma satisfatória todo o conjunto.

QUADRO 9 - LÓGICA DE PROCESSAMENTO DE ALTIMETRIA

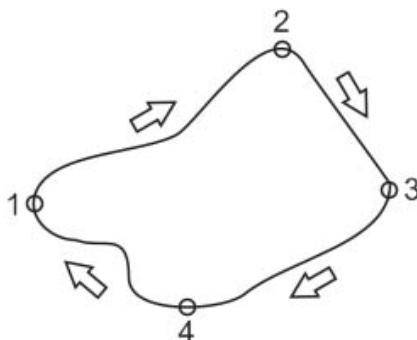
COMPARAÇÃO	REGIÃO VIZINHA JÁ CLASSIFICADA?	RESULTADO
$Z_c < Z_v$, com $2,5 < Z_v - Z_c$	Não	Classifica Região Corrente Como Baixa e Região Vizinha como Alta
$Z_c < Z_v$, com $0,5 \leq Z_v - Z_c \leq 2,5$	Sim ou Não	Sem resultado
$Z_c \leq Z_v$, com $Z_v - Z_c < 0,5$	Sim	Classifica Região Corrente da mesma forma que a Região Vizinha
$Z_c > Z_v$, com $Z_c - Z_v < 0,5$	Sempre Sim	Classifica Região Corrente da mesma forma que a Região Vizinha
$Z_c > Z_v$, com $0,5 \leq Z_c - Z_v \leq 2,5$	Sempre Sim	Sem resultado
$Z_c > Z_v$, com $2,5 < Z_c - Z_v$	Sempre Sim	Resolvido anteriormente (quando do processamento do Vizinho)

3.2.6.3 Filtro Douglas & Peucker

De um modo geral, os objetos antrópicos apresentam linhas geométricas, sobretudo linhas retas. Neste filtro pretendeu-se explorar estas características das edificações, buscando-se segmentos de retas nos contornos das regiões obtidas até o momento. Para se fazer isto, utilizou-se o algoritmo de Douglas-Peucker (ver item 2.5).

Todas as regiões que passaram pelo crivo do filtro de padrão VERDE e filtro altimétrico são candidatas a edificações. Dispondo-se das coordenadas de todos os pixels descritores de contorno das regiões pode-se analisá-los em busca da determinação dos quatro cantos extremos de cada região enfocada (quatro pontos críticos: 1-2-3-4), conforme ilustrado na Figura 36. Com uma simples inspeção de todas as coordenadas dos pontos de um polígono consegue-se esta informação.

FIGURA 36 - PONTOS EXTREMOS DE UM POLÍGONO



Fixando-se duas extremidades opostas quaisquer, sejam o primeiro e o terceiro pontos críticos do polígono envolvente considerado, aplica-se o algoritmo de Douglas-Peucker duas vezes, ora pelo caminho que passa pelo segundo ponto (1-2-3), levando-se em consideração todos os pixels componentes do polígono neste trajeto, ora pelo caminho que passa pelo quarto ponto, mas em sentido inverso (3-4-1). Desta forma, obtêm-se somente os pontos mais relevantes dentre todos os componentes de um polígono.

Torna-se claro que esta simplificação de poligonais é dependente do limiar de tolerância empregado, apresentando mais pontos à medida que a tolerância diminui. O objetivo proposto foi o de identificar com robustez a presença de linhas retas no polígono envolvente de região (edificação potencial). Pensou-se, então, em aplicar inicialmente uma tolerância bem baixa, de forma a oferecer boas garantias da presença das feições retas procuradas, e finalmente uma tolerância mais relaxada, para analisar se ainda persistia uma simplificação razoável.

Com este propósito em mente, aplicou-se inicialmente um limiar de

tolerância igual a um pixel e meio (1,5 pixels). Esta medida, na verdade, é duplicada, porque a tolerância é válida para os dois lados da poligonal simplificada. Isto significa que se forma um corredor de largura igual a três pixels, neste caso, em torno da poligonal resultante, dentro do qual se enquadram todos os pontos componentes da poligonal original. A tolerância final aplicada foi igual a três (3,0) pixels, o dobro da primeira.

A aplicação deste filtro não exclui as informações de coordenadas de todos os pontos componentes originalmente dos polígonos, sem a simplificação, mas serve tão somente para quantificar as feições retas existentes em cada polígono.

O critério empregado para a tomada de decisão, se um polígono pertence (é mantido) ou não a uma edificação, foi dado pelo tamanho da simplificação resultante. Na tolerância inicial, se um polígono simplificar em algum trecho de seu contorno mais do que vinte (20) pixels, então ele é mantido. Na tolerância final, se um polígono obtiver, em sua simplificação, menos vértices do que 5% dos vértices originais, então ele também é mantido, representando um bom candidato a uma edificação.

Para este procedimento, polígonos com baixa quantidade de vértices não são bem aceitos. Isto se torna claro a partir do momento em que se testa a existência de pelo menos vinte pixels em uma mesma linha reta. Segue-se daí, que, neste trabalho só se aceitou polígonos com mais do que 50 vértices originais. Esta medida faz realmente uma limpeza nos pequenos polígonos espúrios existentes.

3.2.6.4 Fusão de Polígonos

Prosseguindo-se com o refinamento de polígonos envolventes de regiões, observa-se a existência de regiões vizinhas que não foram eliminadas por nenhum dos diversos filtros anteriores. Isto significa que elas passaram nos teste de vegetação, altimetria (altitudes médias em um mesmo patamar), e traços retos.

Aplica-se, neste caso, a regra: se duas regiões vizinhas apresentam as mesmas características altimétricas, então elas devem pertencer a uma mesma

edificação. Surge, então, a necessidade de fundir ambas as regiões em uma única. O processo de fusão elimina a maior fronteira comum entre duas regiões vizinhas, mantendo todos os demais pixels. Isto acontece desde que um segmento não envolva totalmente o outro, caso em que o envolvido é simplesmente eliminado.

O algoritmo de fusão de segmentos explora a característica, comentada anteriormente (ver item 3.2.5), de sentido de geração de polígono (horário). Conseqüentemente, em uma fronteira comum, entre dois segmentos vizinhos, enquanto que em um polígono se efetua o caminhamento no sentido horário, a mesma seqüência de pixels comuns é encontrada em um caminhamento no sentido anti-horário no outro polígono.

No espaço discreto de pixels pode-se encontrar diversas fronteiras comuns entre dois segmentos vizinhos. A maioria destas fronteiras são constituídas por apenas um ou dois pixels. Esta é a razão para se procurar a maior fronteira comum para se praticar a operação de fusão.

O processo de fusão de polígonos vizinhos, para apresentar bons resultados, consistentes, deve ser acompanhado por um procedimento de verificação da existência de laços, com posterior exclusão dos mesmos. Usualmente, a definição de laço é apresentada como sendo um subpolígono em que os vértices inicial e final são os mesmos, ou seja, existe um pequeno polígono dentro do polígono de maior extensão. Nos procedimentos programados estendeu-se esta definição para os casos em que o subpolígono apresenta vértices inicial e final vizinhos (excetuando-se, é claro, os vizinhos imediatos de cada pixel).

3.2.7 Vetorização

Nesta etapa estão incluídos os processos para ajustar os polígonos aceitos como válidos (edificações potenciais), até o presente momento, a segmentos de retas, e encontrar, então, as intersecções entre elas, ou seja, os vértices que definem as feições, visando a definição geométrica de seus contornos.

Os segmentos obtidos representam as áreas cobertas das edificações, e os contornos dos segmentos são os contornos das edificações. As coordenadas dos vértices destes contornos devem sofrer ajustes, objetivando a determinação dos melhores segmentos de retas (somatória dos quadrados dos resíduos minimizada - SPIEGEL, 1985).

Para a realização desta tarefa, necessita-se, inicialmente, dividir os vértices de cada polígono, atribuindo-os a diferentes segmentos de retas. Claro que, se dois vértices são atribuídos a um mesmo segmento de reta, todos os seus vértices intermediários, dentro da ordem de geração do polígono, devem ser atribuídos ao mesmo segmento de reta. Em suma, é preciso saber quais vértices serão ajustados a quais segmentos de retas.

Para a resolução deste problema usa-se novamente o algoritmo de Douglas-Peucker, conforme explanado no item 3.2.7.3. Busca-se determinar, dentro de uma tolerância grosseira, quais são os vértices mais críticos dentro do polígono. Neste trabalho, adotou-se uma tolerância igual a dez (10,0) pixels, bastante alta, portanto. Como conclusão, divide-se o polígono em partes segundo mudanças acentuadas em direção de trajetória. Todos os vértices intermediários são ajustados a uma mesma reta.

A rotina de ajustamento de pontos a uma reta pelo método dos mínimos quadrados pode ser encontrada em vários livros, incluindo código aberto disponível para diversas linguagens de programação. Aproveitou-se aqui de codificação em Pascal disponibilizada em PRESS et al. (1989). Este programa fornece os coeficientes angulares e lineares da reta ajustada, bem como suas variâncias.

A codificação encontrada em PRESS et al. (1989) usa a equação geral da reta $y = ax + b$, e teve que ser adaptada tendo em vista as retas verticais. Usou-se do expediente de uma segunda equação $x = cy + d$ para coeficientes angulares próximos à vertical. Esta adaptação é extremamente simples, bastando inverter-se linhas com colunas nas coordenadas dos vértices considerados. Deve-se tomar cuidado de se saber sempre com qual tipo de equação de reta se está lidando.

Determinados os coeficientes angulares e lineares das retas que melhor se

ajustam aos pontos formadores de um polígono, resolvem-se sistemas de equações (cada duas retas consecutivas compõem um sistema) para a identificação dos pontos de intersecção destas retas entre si. Obtidas tais coordenadas de intersecções de retas, tem-se a vetorização completa de um polígono.

Procurando-se melhorar o aspecto das edificações resultantes, programou-se um ajuste geométrico, que examina a condição de paralelismo entre segmentos de reta opostos. Se estes segmentos tiverem coeficientes angulares com até cinco graus de diferença entre si, assume-se que são idênticos, alterando-se o coeficiente angular da reta com maior variância. Este pequeno cuidado mostrou-se importante na apresentação dos resultados.

Outro pormenor analisado neste ajuste geométrico é o das distâncias das coordenadas das intersecções com os vértices originais do polígono. Caso alguma distância esteja muito alta, fora da tolerância do algoritmo Douglas-Peucker, então diminui-se gradativamente esta tolerância, recalculando-se todas as intersecções. Este cuidado também se mostrou importante na apresentação dos resultados.

Chama-se a atenção para o significado da tolerância empregada, que age como se fosse um coeficiente de generalização para a etapa de representação das feições em uma carta. Quanto menor a tolerância, tanto maior o nível de detalhes retratados.

3.2.8 Monorestituição sem Iterações

Os algoritmos utilizados fizeram uso de uma altitude associada a cada pixel no EIID. Estas altitudes foram sempre distinguidas, ao longo de todo o processo, como sendo interpoladas ou originais (provenientes da varredura LASER, via equações de colinearidade e parâmetros de orientação exterior).

As coordenadas finais de um trabalho cartográfico devem ser fornecidas no espaço-objeto, em coordenadas referenciadas a um sistema de projeção. Para se obter tais coordenadas, a partir de uma localização específica dentro de uma imagem, deve-

se empregar as equações (12) de colinearidade, em sua forma inversa. Estas equações necessitam da altitude Z , previamente à obtenção das coordenadas planimétricas. Sem se dispor da altitude, fica-se impossibilitado de se ter X e Y , coordenadas planimétricas. Por outro lado, tendo-se as mesmas, pode-se encontrar a altitude via DTM.

Para resolver este impasse, MAKAROVIC (1973) sugeriu o processo de monorestituição, para superfícies contínuas, que consiste em adotar uma altitude inicial (geralmente uma altitude média da região trabalhada) e calcular, a partir daí, as coordenadas planimétricas. Encontradas as mesmas, obtém-se uma nova altitude, mais refinada, que pode ser usada novamente nas equações de colinearidade, em sua forma inversa. Este processo é repetido até que as diferenças entre as coordenadas novas e antigas sejam menores que uma tolerância prefixada.

O modelo digital de terreno corresponde a uma amostra do relevo do terreno. A rigor, onde não houver observação, não se pode dizer nada sobre o relevo naquela localização. É claro que, para que um DTM seja bem aceito, ele deve conter informações sobre os pontos mais notáveis do terreno, de forma que, mesmo com uma amostra, consiga-se interpolar adequadamente qualquer posição da região de estudo. Segue-se que a interpolação fornece uma informação "aproximada" sobre o terreno. Quanto melhor o DTM tanto melhor a aproximação.

Pode-se ainda discutir aqui o tipo de algoritmo de interpolação utilizado. A literatura apresenta diversos (vizinho mais próximo, regressão polinomial, triangulação com interpolação linear, citando uns poucos). Dependendo da escolha que se fizer, pode-se obter resultados diferentes, melhores (mais perto da realidade do terreno) ou piores. A única importante qualidade que se pode atribuir à interpolação é que é aproximada.

A imagem tomada por uma câmara segue as características da projeção central, mantendo a colinearidade (eliminadas as distorções do processo). Sob uma linha reta, as proporções são mantidas. Como conclusão importante tem-se que a triangulação com interpolação linear (tipo de interpolação) apresenta os mesmos

resultados quer seja executada no espaço-imagem ou no espaço-objeto. Mais, qualquer interpolação que se faça no espaço-imagem pode ser vista como mais um tipo de interpolação (uma nova função) apresentando um novo resultado, diferente ou não (como qualquer algoritmo de interpolação).

Com este embasamento propõe-se associar, a todo pixel do espaço-imagem, uma altitude original ou interpolada, procurando representar o relevo do terreno, como se fosse uma maquete (a escala de Z é real 1:1).

Para se transformar as coordenadas de imagem (do polígono vetorizado) para o espaço-objeto usa-se a altitude associada ao pixel do qual se deseja as coordenadas de terreno. Neste caso não se precisa realizar iterações para a obtenção das coordenadas finais. Já que a altitude é conhecida, as coordenadas planimétricas são determinadas diretamente pelas equações (12). As coordenadas das feições vetorizadas são, então, armazenadas apropriadamente em arquivos.

Um ponto que merece ser destacado aqui é o das superfícies contínuas. Torna-se claro que, em teoria, não se pode fazer uso do processo de monorestituição para edificações (descontinuidade nas bordas), pois o algoritmo pode não convergir (a menos que se tome cuidados especiais). Já o processo de monorestituição sem iterações não apresenta este problema, porque uma grade regular de pontos com altitudes associadas pode ser perfeitamente entendida como uma superfície contínua.

O estabelecimento de altitude na borda de uma edificação é um item de extrema importância neste trabalho. As altitudes manuseadas se encontram no limite de um desnível, e altitudes erradas implicam coordenadas planimétricas erradas. Enganos podem ser facilmente cometidos, se não se der atenção especial para este tópico, e a robustez deste processo é altamente desejável.

Dada uma posição na imagem (coordenadas de terreno ainda desconhecidas), procura-se, dentro de sua vizinhança, a existência de um desnível. Conhecido o desnível (altitudes máxima e mínima da vizinhança), determina-se a maior altitude dentre dois valores: altitude mínima mais limiar de desnível (no caso deste trabalho 2,5m), e altitude máxima menos limiar de desnível. Caso o desnível seja menor que o

limiar de desnível deve-se aumentar a vizinhança pesquisada (ou não se está trabalhando na borda de uma edificação).

Esta última altitude determinada, aqui denominada de altitude mínima de referência, serve como limiar local de altitude. Procura-se, a seguir, a menor altitude, dentre a vizinhança selecionada, que seja acima deste limiar calculado. Esta altitude é aceita como a altitude da posição analisada na imagem.

Para conferir mais robustez ao processo, pode-se comparar a altitude de cada um dos vértices de uma edificação entre si, aceitando-se o de maior altitude como a altitude de todas as bordas da edificação. Este último procedimento tem por objetivo evitar pontos na lateral das edificações.

3.2.9 Aplicativo Desenvolvido

Este trabalho gerou, de forma concomitante aos experimentos, um aplicativo, o qual implementa toda a metodologia aqui referida. Mais importante ainda que os resultados apresentados adiante foi a enorme quantidade de código desenvolvido (mais de 30000 linhas em Delphi IV), disponibilizando várias subrotinas e funções, relativas a diferentes áreas do conhecimento humano. Segue-se uma relação dos itens mais relevantes:

Fotogrametria:

-) cálculo da matriz de rotação;
-) equações de colinearidade, em sua forma direta e inversa (com ou sem iteração). As equações de colinearidade, em sua forma inversa, podem agir diretamente sobre os pontos de varredura LASER originais (malha irregular de pontos) ou não (malha regular);
-) transformação de coordenadas de pixel para coordenadas fotogramétricas (isentas de distorções);
-) transformação de coordenadas fotogramétricas isentas de distorções para coordenadas de pixel empregando o método iterativo de Newton-

Raphson (introdução dos erros sistemáticos);

-) transformação de coordenadas de terreno, no espaço-objeto, para o espaço-imagem, em coordenadas de pixel;
-) transformação ortogonal, com sua inversa;
-) obtenção de limites de correspondência de coordenadas de imagem, no espaço fotogramétrico, ou no espaço-objeto;
-) eliminação de distorções contidas em uma imagem, com reamostragem;
-) ortoretificação de uma imagem, usando malha regular ou irregular de pontos de DTM;

Sensoriamento Remoto:

-) cálculo de NDVI (Índice de Vegetação Normalizado - *Normalized Difference Vegetative Index*) de uma imagem, com possível geração de uma imagem em tons de cinza com este índice (visualização);

Ajustamento de Observações:

-) ajustamento pelo método paramétrico, linear, não-linear, com ou sem injunções;
-) ajustamento de pontos a uma reta;

Colorimetria:

-) conversão entre espaços de cores RGB - XYZ;
-) conversão entre espaços de cores XYZ - CIELAB;
-) conversão entre espaços de cores XYZ - CIELUV;
-) conversão entre espaços de cores RGB - CIELAB;
-) conversão entre espaços de cores RGB - CIELUV;
-) conversão entre espaços de cores RGB - HSI;
-) detecção de tons de verde no espaço de cor CIELUV;

Processamento de Dados:

-) leitura de arquivo com formatação do tipo GS-ASCII (gerado pelo programa Surfer) para DTM/DSM;

-) programação com estruturas de dados do tipo pilha (LIFO = *Last In First Out* = último que entra é o primeiro que sai), e listas encadeadas (FIFO = *First In First Out* = primeiro que entra é o primeiro que sai);

Morfologia Matemática:

-) abertura e fechamento, dilatação e erosão;

Processamento Digital de Imagens:

-) algoritmo de perseguição de contorno por varredura radial;
-) segmentação por crescimento de região;
-) segmentação por deslocamento pela média, usando imagens coloridas;
-) fusão de segmentos, segundo seus contornos;
-) transformada de Hough para detecção de pontos pertencentes a linhas retas, com conseqüente traçado das mesmas;
-) detecção de bordas por Canny;
-) diferenciação por Sobel;
-) visualização de lista de pontos sobre imagem colorida;
-) transformação de imagem do tipo bitmap para matriz 2D (monocromática) ou 3D (colorida), e vice-versa;
-) geração de imagem de intensidade (varredura LASER);
-) suavização de imagem;
-) transformação de imagem colorida para monocromática;

Estatística:

-) máscara Gaussiana de convolução;
-) interpolação de altitude ponderada pelo inverso da distância, vizinho mais próximo, e média aritmética;
-) geração de histograma;
-) algoritmo de deslocamento pela média;

Álgebra Linear:

-) inversa e transposta de uma matriz;
-) adição, subtração e produto de matrizes;

Geometria:

-) determinação se um pixel se encontra no interior de um polígono, dado por seus vértices, ou não;
-) determinação do coeficiente angular (e ângulo em graus) de uma reta, dados dois pontos;
-) determinação dos parâmetros de uma reta (forma paramétrica);
-) cálculo da distância de um ponto a uma reta;
-) determinação da equação de um plano, dados três pontos no espaço;
-) cálculo de área, perímetro e compacidade de um polígono dado por seus vértices;
-) algoritmo de Douglas-Peucker;
-) verificação de paralelismo de retas, e cálculo de intersecção de retas;

No trato com pontos oriundos de varredura LASER, mais especificamente, desenvolveu-se as rotinas:

-) leitura, classificação, obtenção rápida de N vizinhos mais próximos, com distâncias e ângulos, em ordem ascendente de distância, ou de ângulos;
-) recorte de área;
-) gradientes de altitude de uma malha irregular de pontos;
-) obtenção de pontos próximos de desníveis (distância pré-especificada): só acima ou só abaixo;

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para se iniciar os experimentos, todos os pontos de varredura LASER foram projetados para o espaço-imagem isento de distorções. A imagem selecionada (Figura 29), com distorções devidas a erros sistemáticos, foi reamostrada, conforme metodologia exposta nos itens 3.2.3 e 3.2.4. A imagem obtida, isenta de distorções, é apresentada na Figura 37.

A reamostragem aplicada trouxe como consequência, além de correção das feições retilíneas, uma ligeira diminuição do campo de visão, isto é, sob este aspecto, a imagem reamostrada é ligeiramente menor que a imagem original. Este efeito pode ser constatado comparando-se as Figuras 29 e 37 entre si.

FIGURA 37 - IMAGEM REAMOSTRADA ISENTA DE DISTORÇÕES



Para se avaliar a metodologia apresentada, operação que custou centenas de testes, lançou-se mão do expediente de subdividir a imagem trabalhada em diversas subimagens. Desta forma o tempo de execução caiu drasticamente, e a tarefa de análise dos resultados pode ser feita com menor perda de tempo, até porque dezenas de

algoritmos foram desprezados, antes de se chegar à metodologia final exposta. Não se trabalhou com experimentos sintéticos, ambientes ideais, mas tão somente com situações reais, o que sabidamente torna os experimentos mais difíceis.

Antes de se recortar as subimagens, analisaram-se as regiões levantadas por varredura LASER. Devido a pequenos problemas de inconsistência entre faixas de varredura, que poderiam atrapalhar os experimentos, partiu-se para o emprego de uma única faixa por subimagem recortada. As faixas 2 e 7 (ver Quadro 6), devido à baixa quantidade de pontos LASER sobre a imagem escolhida, foram abandonadas. Verificou-se, ainda, que a faixa 6 sobrepõe-se na imagem apenas em pequena região junto ao canto inferior direito, em local que não se aproveitou, sendo também abandonada.

QUADRO 10 - DESCRIÇÃO DE SUBIMAGENS PARA EXPERIMENTOS

RECORTE	VARREDURA LASER		COORDENADAS (PIXEL)		DIMENSÕES		QTDE DE PIXELS
	FAIXA	PONTOS	CSE	CID	LARGURA	ALTURA	
1	3	4800	1037,0	1266,213	230	214	49220
2	3 / 5	2577 / 2260	1245,147	1413,315	169	169	28561
3	5	2308	668,746	811,935	144	190	27360
4	8	35146	83,1102	713,1745	631	644	406364
5	8	3311	820,1358	1017,1564	198	207	40986
6	5	3492	1956,532	2177,711	222	180	39960
7	8	1456	2309,1134	2449,1256	141	123	17343
8	8	8640	1895,1324	2188,1638	294	315	92610
9	8	48598	1066,1128	1763,1919	698	792	552816
10	5	11201	2138,80	2532,434	395	355	140225
11	5	29942	0,497	592,1077	593	581	344533
12	3	8675	0,0	306,384	307	385	118195
13	5	4752	2239,618	2519,825	281	208	58448
14	5 / 8	11329 / 11693	1454,888	1803,1264	350	377	131950
15	5	8629	927,588	1261,924	335	337	112895

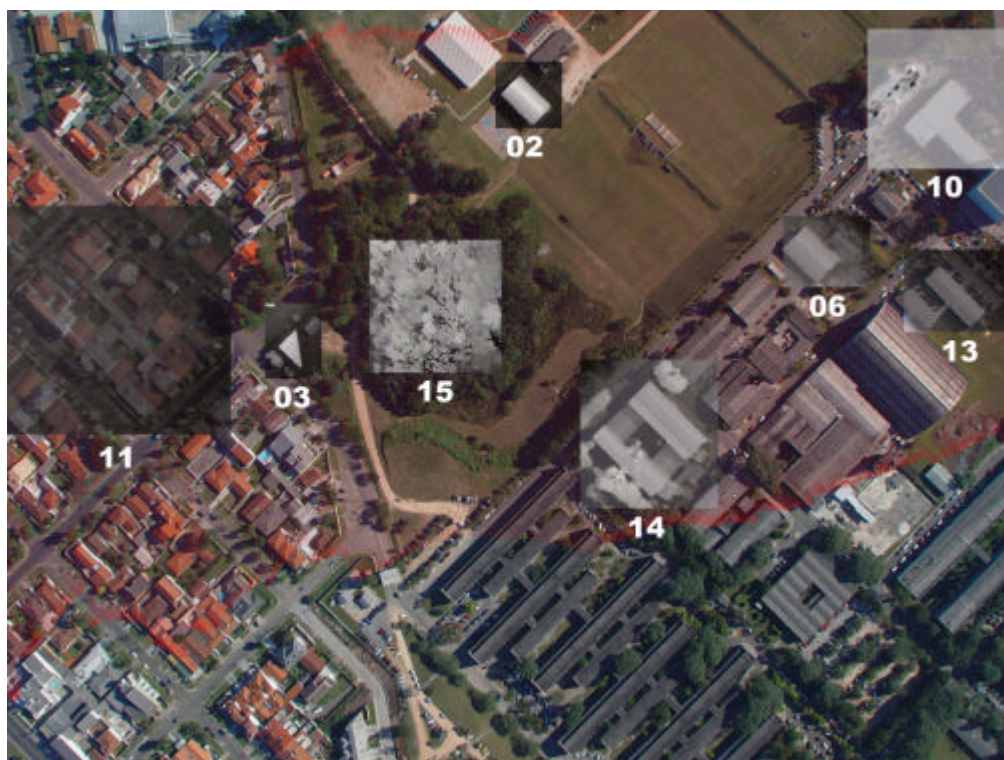
Selecionaram-se quinze (15) subimagens para os experimentos, sendo que dois destes recortes acontecem em regiões varridas por duas faixas LASER, totalizando, então, 17 experimentos. O Quadro 10 apresenta a descrição destes recortes. CSE (canto superior esquerdo) e CID (canto inferior direito), neste Quadro, indicam as coordenadas, em pixels, de tais extremidades dos recortes, referenciadas sempre à imagem corrigida de distorções. A posição do primeiro pixel, no canto superior esquerdo, tem as coordenadas [0,0]. Observe-se ainda, no Quadro 10, que a

quantidade de pontos da varredura LASER existentes na região dos recortes é invariavelmente menor que 10% da quantidade de pixels (sobre a mesma região).

FIGURA 38 - IMAGEM REAMOSTRADA, FAIXA 3, E RECORTES 1, 2, 12

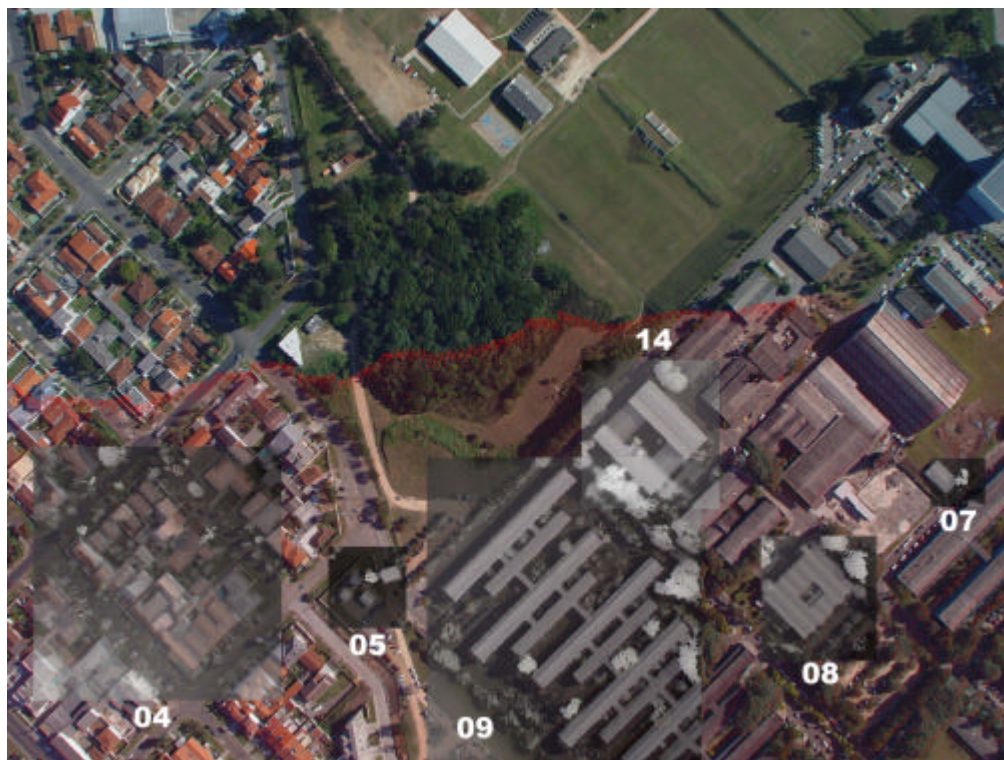


FIGURA 39 - IMAGEM REAMOSTRADA, FAIXA 5, E RECORTES 2, 3, 6, 10, 11, 13, 14, 15



As Figuras 38, 39 e 40 ilustram a localização das faixas de varredura LASER, 3, 5 e 8 (pontos vermelhos), respectivamente, juntamente com os recortes sobrepostos.

FIGURA 40 - IMAGEM REAMOSTRADA, FAIXA 8, E RECORTES 4, 5, 7, 8, 9, 14



A seguir, a metodologia apresentada no item 3.2 foi aplicada a todos os experimentos, sem alteração de nenhum parâmetro ou limiar. Cabe ressaltar, entretanto, que tais limiares foram obtidos após muitos testes, porque, de modo geral, quando se melhora um aspecto no reconhecimento de edificações, prejudica-se outro.

Algumas imagens obtidas durante o processamento foram colocadas para ilustrar melhor o processo. Nos cinco primeiros experimentos apresenta-se toda a seqüência de imagens, conforme sua obtenção no desenrolar das etapas de processamento. Nos experimentos seguintes, para diminuir a repetitividade, expõe-se apenas as imagens inicial e final, exceto quando relevante.

4.1 EXPERIMENTO 1

Como primeiro experimento escolheu-se uma imagem próxima da situação ideal: uma única edificação isolada, sem árvores na vizinhança da mesma, bem separada de qualquer outra edificação. As Figuras 41 a 46 retratam toda a seqüência de imagens obtidas neste processamento, desde a segmentação até a vetorização.

A fase de segmentação distinguiu claramente quaisquer diferenças maiores na coloração da imagem. Todos os objetos semelhantes foram agrupados.

A cobertura da edificação com caída para a parte superior-direita da imagem (ver Figura 41) teve o seu extremo inferior (na imagem) mal delimitado. Isto ocorreu por causa da similaridade de visualização da cobertura (bem clara) com a parede lateral da edificação (também bem clara). Este reconhecimento fica difícil até mesmo no processo manual. Neste caso, o ser humano usa de outros expedientes, tais como visualização dos outros cantos da edificação, para fazer uma poligonação regular, baseando-se na experiência que lhe diz tratar-se de uma edificação com cobertura ortogonal de quatro cantos.

Prosseguindo-se, eliminou-se algumas áreas verdes mais evidentes (Figura 42). No filtro altimétrico (Figura 43), tendo em vista o limiar imposto de 2,5m, acabou-se eliminando uma pequena cobertura (anexa à edificação principal) existente na parte superior da imagem, encostada na edificação.

Na Figura 44 apresenta-se as regiões ainda existentes após a passagem do filtro Douglas-Peucker, evidenciando a eliminação das pequenas regiões esparsas, restando somente a edificação. A seguir, fundiram-se as regiões vizinhas existentes, sobrando uma única região (Figura 45).

A fase de vetorização, graças a limiares com alta tolerância que impõem uma generalização, consertou como pode o que se perdeu na segmentação (observar as diferenças entre as Figuras 45 e 46). A rotina de paralelismo entre segmentos de reta opostos contribuiu para a melhoria do aspecto final da vetorização.

FIGURA 41 - RECORTE 01 - FAIXA 3 - SEGMENTAÇÃO



FIGURA 42 - RECORTE 01 - FAIXA 3 - FILTRO VERDE CIELUV

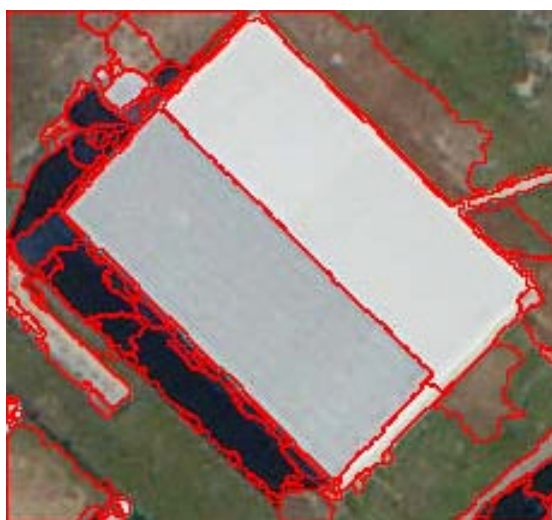


FIGURA 43 - RECORTE 01 - FAIXA 3 - FILTRO ALTIMÉTRICO



FIGURA 44 - RECORTE 01 - FAIXA 3 - DOUGLAS-PEUCKER



FIGURA 45 - RECORTE 01 - FAIXA 3 - FUSÃO DE SEGMENTOS



FIGURA 46 - RECORTE 01 - FAIXA 3 - VETORIZAÇÃO



Um detalhe importante neste experimento, e que acaba se constituindo em uma vantagem da metodologia proposta, é a identificação da linha de quebra da cobertura da edificação (cumieira), que pode ser vista na Figura 44, mas não na Figura 45. O algoritmo de fusão de polígonos desempenhou corretamente o seu papel fazendo com que esta linha desaparecesse. Chama-se atenção porque a detecção desta linha é muito interessante para os processos de reconstrução tridimensional das edificações, tópico de grande importância na Fotogrametria, mas não tratada nesta pesquisa.

4.2 EXPERIMENTO 2

Este experimento (recorte 02 com faixa 3) buscou o reconhecimento de uma edificação menor que a anterior, na escala da foto, acrescido de mais dificuldades como a cobertura contendo diversas pequenas regiões com coloração completamente diferente, provavelmente devido a consertos no telhado. A cobertura da edificação continuou isolada de quaisquer outros objetos. As Figuras 47 a 52 ilustram o processamento, que ocorreu de forma similar ao anterior.

FIGURA 47 - RECORTE 02 - FAIXA 3 - SEGMENTAÇÃO



A detecção dos consertos no telhado, pelo algoritmo de segmentação, fez com que as delimitações externas da cobertura da edificação assumissem formas menos retilíneas (Figura 51). Apesar disto, a generalização contida na fase de vetorização corrigiu o traçado do contorno, que ainda teve seu aspecto melhorado pela rotina de paralelismo. É claro que quanto mais imperfeições existirem nas fases

anteriores à vetorização, tanto pior será o posicionamento final das bordas. Pode-se verificar, na Figura 52, que a borda superior da edificação ficou aquém de sua localização esperada.

FIGURA 48 - RECORTE 02 - FAIXA 3 - FILTRO VERDE CIELUV



FIGURA 49 - RECORTE 02 - FAIXA 3 - FILTRO ALTIMÉTRICO



FIGURA 50 - RECORTE 02 - FAIXA 3 - DOUGLAS-PEUCKER



FIGURA 51 - RECORTE 02 - FAIXA 3 - FUSÃO DE SEGMENTOS



FIGURA 52 - RECORTE 02 - FAIXA 3 - VETORIZAÇÃO



4.3 EXPERIMENTO 3

O terceiro experimento usou o mesmo recorte anterior, com outros dados de varredura LASER. Quase que se pode dizer que foram os mesmos dados, tão próximos os resultados (sequência de imagens intermediárias) entre si. No caso anterior foram empregados 2577 pontos LASER, contra 2260 neste experimento. As imagens das regiões ainda válidas no processo, após a segmentação, e após o filtro verde CIELUV, deixam de ser apresentadas aqui por serem idênticas às anteriores (Figuras 47 e 48, respectivamente). Excetuando-se o caso de pequenas regiões que não apresentam nenhum ponto de varredura LASER (e por isso são eliminadas), os procedimentos acima citados independem de altitude.

FIGURA 53 - RECORTE 02 - FAIXA 5 - FILTRO ALTIMÉTRICO



FIGURA 54 - RECORTE 02 - FAIXA 5 - DOUGLAS-PEUCKER



FIGURA 55 - RECORTE 02 - FAIXA 5 - FUSÃO DE SEGMENTOS



Comparando-se as coordenadas finais, resultantes da vetorização, com as do experimento anterior, verificou-se que as coordenadas respectivas, de ambos os

traçados, são idênticas, comprovando-se a robustez do processo. Para inspeção visual as Figuras 53 a 56 devem ser comparadas com as Figuras 49 a 52.

FIGURA 56 - RECORTE 02 - FAIXA 5 - VETORIZAÇÃO



4.4 EXPERIMENTO 4

O quarto experimento (recorte 03) situou-se sobre uma região com duas edificações (Figuras 57 a 61) menores ainda que as anteriores. A maior das duas aqui, de forma aparentemente triangular (na realidade esta edificação tem sua vista superior com a forma de um trapézio, com uma diminuta base menor), foi contornada de forma quase perfeita, com pequena divergência na definição da menor aresta lateral.

FIGURA 57 - RECORTE 03 - FAIXA 5 - SEGMENTAÇÃO



A realização bem precisa do contorno de forma trapezoidal apresenta uma grande dificuldade, dado que os cálculos das intersecções dos segmentos de reta resultam em pontos distantes do polígono original, pela má orientação das retas. Segue-se que este resultado foi uma comprovação de que as tolerâncias decrescentes progressivas (até que os pontos de intersecção estejam próximos ao polígono original), do filtro Douglas-Peucker, representam um grande trunfo nos algoritmos implementados.

FIGURA 58 - RECORTE 03 - FAIXA 5 - FILTRO VERDE CIELUV



FIGURA 59 - RECORTE 03 - FAIXA 5 - FILTRO ALTIMÉTRICO



A segunda edificação, menor que a anterior, foi eliminada no filtro de Douglas-Peucker, porque o seu contorno aparentava muitas irregularidades. Neste caso, se o filtro de fusão de segmentos fosse aplicado antes do filtro de Douglas-

Peucker, as irregularidades iriam desaparecer, cedendo lugar a mais feições retilíneas, e preservando esta edificação.

FIGURA 60 - RECORTE 03 - FAIXA 5 - DOUGLAS-PEUCKER



FIGURA 61 - RECORTE 03 - FAIXA 5 - VETORIZAÇÃO



A questão de ordem de aplicação dos filtros deve ser resolvida com base na maior quantidade de feições retilíneas: se antes ou após a fusão de segmentos. Se, antes de se fundir dois segmentos, a quantificação de feições retilíneas presentes (ver item 3.2.6.3) for maior do que depois da fusão, então estes segmentos não devem ser fundidos antes de se passar pelo crivo do filtro Douglas-Peucker. A razão para isto é que pequenas regiões espúrias situadas ao longo de uma aresta da edificação não devem ser fundidas, mas sim eliminadas. Este fenômeno se apresentou de forma muito frequente, motivando a ordem selecionada neste trabalho.

Por outro lado, se a quantidade de feições retilíneas presentes for maior após a fusão de dois segmentos, do que antes (ambos os segmentos pré-fusão são considerados), então o algoritmo de Douglas-Peucker deve ser precedido pelo de fusão, evitando eliminações indesejáveis. Isto acontece quando a cobertura de uma edificação é mal segmentada (sombras, objetos diferenciados no topo da edificação).

Observe-se que à medida que se diminuem os objetos analisados, na escala da foto, menos pontos de varredura LASER se têm, ficando mais difícil avaliar se duas regiões vizinhas, com cores diferentes, podem ser fundidas (isto é, pertencem à uma mesma cobertura de edificação) ou não (falta altimetria). Para complicar ainda mais, pequenas edificações fogem dos limiares de segurança estabelecidos neste trabalho (mínimo de vinte pixels para segmentos de reta aceitáveis, cinquenta pixels para perímetros). Abaixo destes limiares a confusão na percepção aumenta, dificultando o reconhecimento.

4.5 EXPERIMENTO 5

Este experimento incidiu sobre uma quadra inteira de pequenas edificações (comparativamente dentro da imagem), similares às do experimento anterior, só que, neste momento, com árvores próximas às casas, com edificações geminadas, e sombras projetadas sobre o topo das edificações. Muito embora a grande maioria das edificações tenha aparecido na imagem de forma bem visível, as casas são cheias de detalhes.

Identificaram-se quarenta e três edificações totalmente compreendidas dentro do recorte 04. Dentre estas, quarenta apresentam características de geminação, seis têm árvores sobrepostas à cobertura das edificações, e treze têm sombras, sendo somente duas isoladas (uma delas apresenta sombras). Devido às suas características, este teste apresentou grande dificuldade.

A etapa de segmentação separou todos os detalhes importantes contidos na imagem, sem exceção, como pode ser visto na Figura 62. As árvores com sobreposição

na cobertura das edificações foram segmentadas à parte, como uma nova região. As sombras sobre as edificações também constituíram novas regiões.

FIGURA 62 - RECORTE 04 - FAIXA 8 - SEGMENTAÇÃO

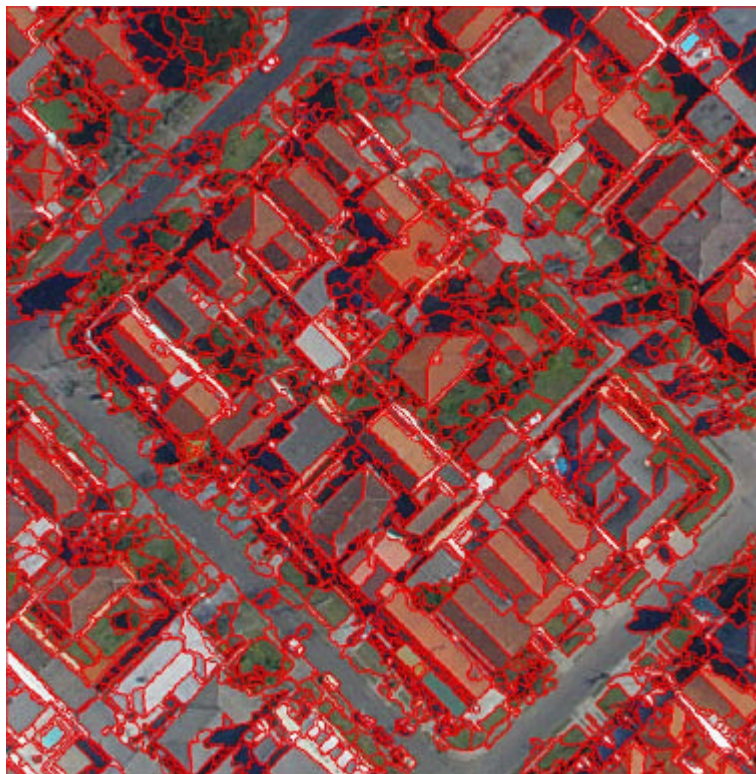


FIGURA 63 - RECORTE 04 - FAIXA 8 - FILTRO VERDE CIELUV

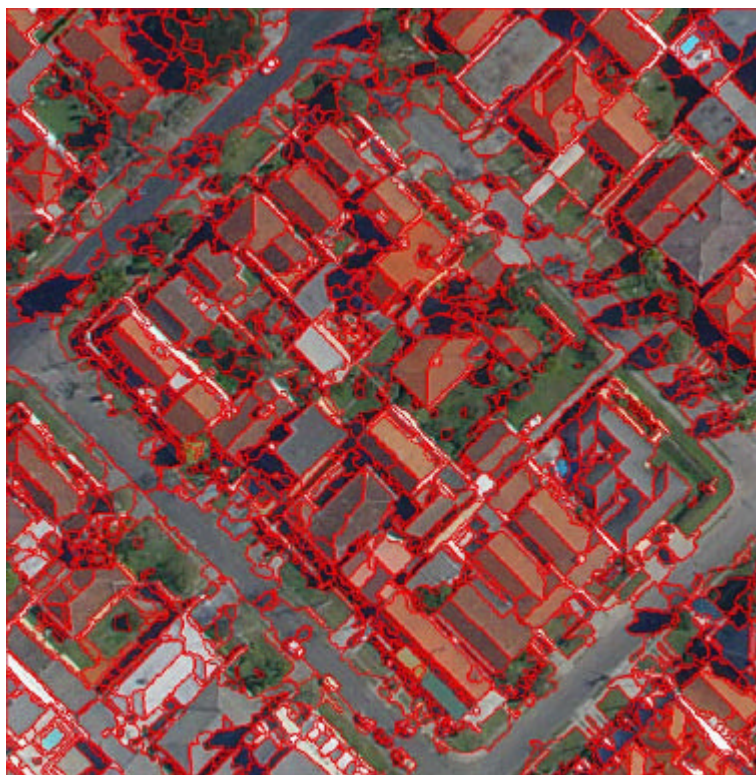


FIGURA 64 - RECORTE 04 - FAIXA 8 - FILTRO ALTIMÉTRICO



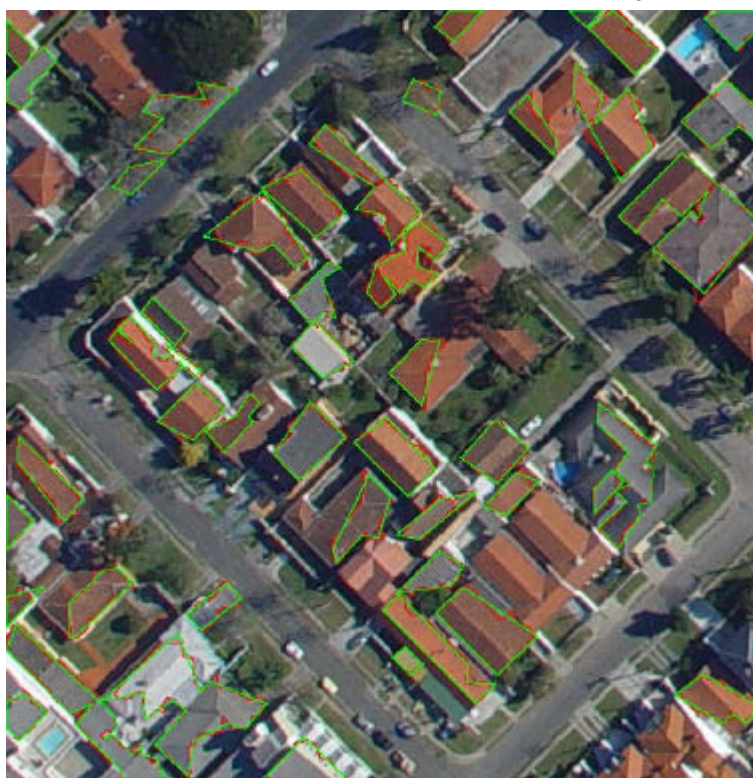
FIGURA 65 - RECORTE 04 - FAIXA 8 - DOUGLAS-PEUCKER



FIGURA 66 - RECORTE 04 - FAIXA 8 - FUSÃO DE SEGMENTOS



FIGURA 67 - RECORTE 04 - FAIXA 8 - VETORIZAÇÃO



No caso das árvores e sombras muito escuras, as segmentações obtidas constituem problemas, pois os algoritmos consecutivos não dispõem de conhecimento necessário para deduzir as formas ocultas. Entretanto, no que se referiu à etapa de segmentação, os procedimentos foram adequados.

O filtro verde CIELUV também processou corretamente os segmentos (ver Figura 63), eliminando apenas aqueles mais identificados com a cor verde. Nenhuma edificação foi excluída ou prejudicada nesta fase. O mesmo não se pode dizer da etapa de filtragem altimétrica (Figura 64), onde a delimitação de contornos de nove edificações foi prejudicada parcialmente, e três desapareceram. Pode-se atribuir esta deficiência à pequena quantidade de pontos LASER frente a tantos detalhes.

Tendo em vista o alto grau de segmentação, resultante do nível de detalhes existente no recorte, muitas regiões ficaram muito pequenas, sendo eliminadas no processo Douglas-Peucker (limiar de cinquenta pixels para perímetro). Os detalhes também acabam ocasionando contornos muito irregulares para as regiões, contendo poucas feições retilíneas, acarretando eliminações pelo mesmo filtro. Fazendo-se uma leitura na imagem resultante (Figura 65) encontraram-se dezesseis edificações prejudicadas parcialmente (sete por este filtro) e seis prejudicadas em sua totalidade (três por este filtro).

O algoritmo de fusão de segmentos não altera os contornos das regiões, atendo-se às fronteiras comuns entre regiões vizinhas. Neste processo (ver Figura 66), cinco edificações, razoavelmente descritas por seus contornos até então, foram unidas a vizinhos, fundindo cada duas edificações como se fosse uma só, e descaracterizando ambas. Consequentemente dez edificações foram descaracterizadas neste procedimento, ganhando-se cinco disformes. A razão foi o grau de proximidade das edificações existentes no recorte.

A Figura 67 ilustra a vetorização resultante das rotinas aplicadas. A tolerância (generalização) contida no processo de ajustamento de pontos a uma reta e simplificação de polígonos por Douglas-Peucker não conseguiu capturar os pequenos detalhes das feições, distorcendo alguns contornos de edificações que, até então,

estavam bem.

Como conclusão, entre todas as vetorizações obtidas, distingue-se três com apresentação bem razoável, mais quatro com uma aresta generalizada indevidamente. Diversas outras edificações têm pelo menos um ponto relevante seu identificado, quando não mais, caracterizando um grau de acerto da ordem de 35% (84/238). Tendo em vista o grau de dificuldade do experimento, classifica-se este resultado como regular.

4.6 EXPERIMENTO 6

No sexto experimento (recorte 05) continuou-se operando sobre pequenas edificações, com coberturas homogêneas, mas agora bem isoladas uma das outras. Duas edificações parcialmente ocultas pelas árvores não foram consideradas.

Um pequeno deslize aconteceu na definição do contorno de uma das edificações (a primeira mais à esquerda na Figura 68), onde ocorreu confusão na segmentação, integrando cobertura de edificação com terreno vizinho ao seu redor. O filtro altimétrico foi prejudicado, pela diminuição do valor de altitude média da região integrada, eliminando uma parte (metade) da cobertura da edificação. A correta identificação dos limites desta edificação, a partir da imagem fornecida, é difícil de ser executada mesmo em processos manuais.

A guarita do Centro Politécnico, maior edificação mais à direita, que em diversos testes anteriores com múltiplos algoritmos experimentados, inclusive utilizando-se exclusivamente de dados de varredura LASER, sempre apresentou problemas de confusão em seus contornos com as vegetações próximas (árvores), teve sua identificação perfeitamente delineada aqui. A edificação central, devido à pequena confusão com o solo vizinho, mais a generalização vetorial, teve duas de suas arestas inclinadas um pouco mais do que o adequado.

Como melhoria, proveniente deste experimento, deve-se analisar todas as altitudes internas de uma região buscando indícios de descontinuidade. No caso de

existência da descontinuidade altimétrica deve-se dividir o segmento em dois, sendo um alto e outro baixo.

FIGURA 68 - RECORTE 05 - FAIXA 8 - SEGMENTAÇÃO



FIGURA 69 - RECORTE 05 - FAIXA 8 - VETORIZAÇÃO



4.7 EXPERIMENTO 7

Este experimento (recorte 06) processou uma região com duas edificações, de tamanho médio para grande, uma com cobertura homogênea, outra menor nem tanto. A cobertura da edificação menor é parcialmente sobreposta por uma árvore vizinha à mesma (ver Figuras 70 e 71).

A edificação que apresentou sobreposição de árvores em sua cobertura foi fragmentada em diversas regiões pelo algoritmo de segmentação, renunciando dificuldades, o que não ocorreu com a cobertura homogênea maior.

A filtragem da cor verde realizou-se sem perda de nenhuma edificação. O filtro de altitudes, por decisão errônea, acabou eliminando a menor edificação, restando somente uma. A classificação, inesperada, aconteceu por conta das altitudes médias das regiões vizinhas (com árvores) que falsearam os dados computados para esta edificação, eliminando-a completamente.

A eliminação da menor edificação sugere uma melhoria para a filtragem altimétrica. Atualmente, as pequenas regiões sem pontos de varredura LASER são desprezadas porquanto não tem altitude média computada. Os segmentos eliminados pelo filtro da cor verde também não são considerados pelas rotinas altimétricas. O que aconteceu foi que uma edificação estava rodeada por regiões não consideradas pelo algoritmo, de forma que não houve referência alguma para a sua classificação (alta ou baixa), sendo então eliminada.

Para se melhorar a filtragem altimétrica pode-se adotar, para as regiões desprovidas de altimetria, a menor altitude média dentre as regiões que lhe são vizinhas (e que tenham altitude média, evidentemente). Esta sugestão, juntamente com a elaborada no experimento anterior (quebra de segmentos) deve melhorar os resultados deste experimento.

A edificação que restou teve uma variância maior no posicionamento de sua aresta superior (na imagem), e a localização de seus vértices apresentou um erro médio planimétrico menor que três pixels, com desvio padrão de um pixel.

FIGURA 70 - RECORTE 06 - FAIXA 5 - SEGMENTAÇÃO

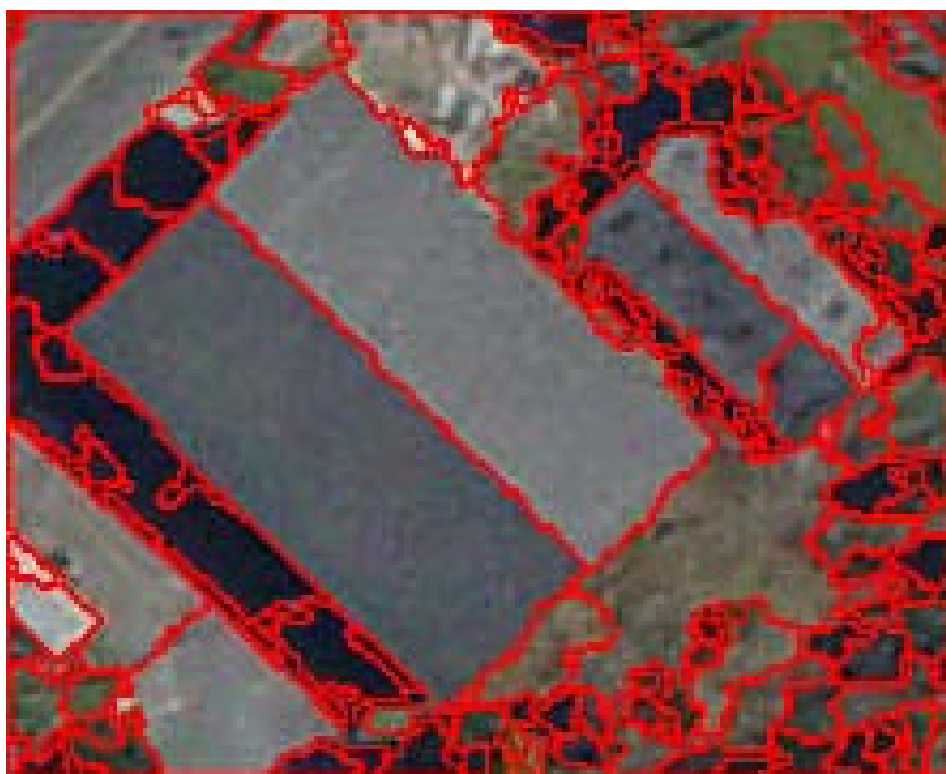


FIGURA 71 - RECORTE 06 - FAIXA 5 - VETORIZAÇÃO



4.8 EXPERIMENTO 8

Este experimento, com uma única edificação, também conta com árvore vizinha à edificação (ver Figuras 72 e 73). A sombra da mesma árvore também é projetada sobre a cobertura. A sobreposição no telhado se dá mais com a sombra da árvore do que com ela própria. O problema é que um vértice da edificação, com uma boa área ao seu redor não se encontra visível. Conforme comentado anteriormente, nenhum algoritmo aqui apresenta conhecimento de dedução de formas ocultas.

A segmentação correu de forma normal, classificando todas as regiões por similaridade. O filtro verde, seguinte, eliminou uma região que adentrava na cobertura da edificação, dificultando a compreensão do objeto. Esta compreensão piorou após o filtro altimétrico, que, embora tenha conseguido uma referência para seus procedimentos, conservando a edificação, eliminou mais alguns segmentos escuros nas proximidades daquela região já eliminada. Desta forma, o vértice oculto, além de não ficar agregado às regiões conservadas, ainda ficou muito distante do que seria a cobertura da edificação.

FIGURA 72 - RECORTE 07 - FAIXA 8 - SEGMENTAÇÃO



Como seria de se esperar, a generalização vetorial não traçou um contorno adequado, por não conseguir abranger as disparidades encontradas, comprometendo toda a restituição. O traçado final do polígono fica bem diferente do almejado.

FIGURA 73 - RECORTE 07 - FAIXA 8 - VETORIZAÇÃO



4.9 EXPERIMENTO 9

No nono experimento (recorte 08) usou-se uma edificação bem grande (visualmente na foto, comparativamente com as anteriores) com diversas listras de tonalidades diferentes (por causa da orientação dos telhados), e também com vegetação vizinha, projetando sombra sobre uma pequena área da cobertura. Existem pelo menos cinco árvores vizinhas, sendo duas de grande porte. Este recorte acabou tornando-se um excelente teste para o algoritmo de fusão de segmentos. Para complicar existe uma parte central, na edificação, sem construção ("um buraco").

O algoritmo de segmentação classificou todas as regiões (Figura 74), separando as partes escuras. Estas partes escuras, para este algoritmo, são uma só, quer estejam sobre a edificação ou não (na vizinhança imediata da mesma). Os filtros de

padrão verde, e altimetria, funcionaram perfeitamente, conservando todas estas áreas. O filtro de Douglas-Peucker, dada sua definição de conservação de feições retilíneas de contorno, rejeitou as áreas escuras, por terem aspecto irregular, destruindo uma pequena parte da edificação (a sombreada). O aspecto dos polígonos após o filtro de Douglas-Peucker pode ser observado na Figura 75.

O topo da edificação, por causa das listras de tonalidades diferentes, ficou dividido em várias regiões pela segmentação, mas o algoritmo de fusão conseguiu unilas todas adequadamente, excetuando-se a área central que foi suprimida por este mesmo algoritmo. Fica anotada então mais uma sugestão de melhoria.

A vetorização não conseguiu traçar a aresta sombreada, mas as demais foram bem ajustadas, inclusive podendo-se dizer que três vértices do contorno da edificação foram bem determinados. Somente o vértice mais escuro não foi localizado.

FIGURA 74 - RECORTE 08 - FAIXA 8 - SEGMENTAÇÃO

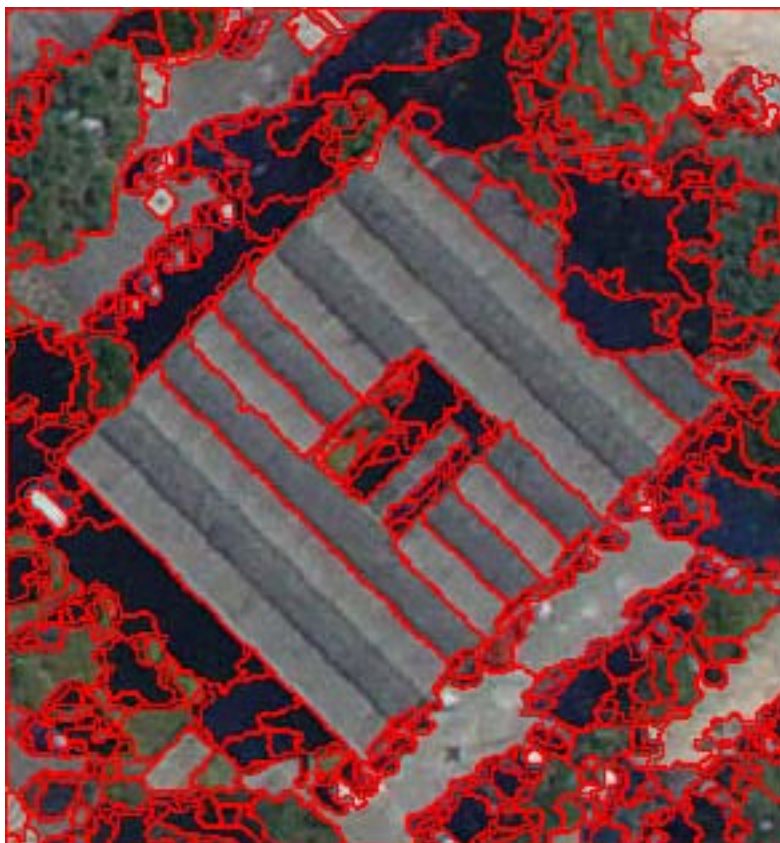


FIGURA 75 - RECORTE 08 - FAIXA 8 - DOUGLAS-PEUCKER

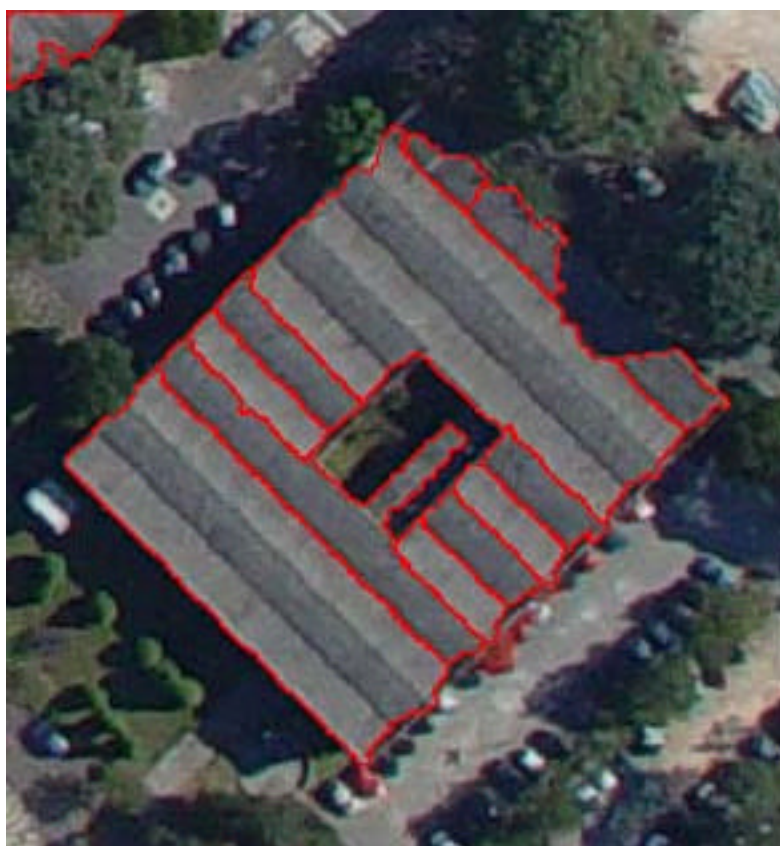


FIGURA 76 - RECORTE 08 - FAIXA 8 - VETORIZAÇÃO



4.10 EXPERIMENTO 10

O décimo experimento (recorte 09) foi feito sobre alguns dos blocos do Centro Politécnico (Figura 77), e consiste de várias edificações interligadas, com vegetação distribuída entre seus blocos. Este teste, além de utilizar o algoritmo de fusão de segmentos, também utiliza intensamente os procedimentos de vetorização (intersecção de segmentos de reta). Qualquer erro na programação resulta em objetos com forma completamente diferente do pretendido, com criação de pontas, e distanciamento do polígono original. Pode-se dizer que estes aspectos de programação foram cumpridos satisfatoriamente.

Alguns blocos do Centro Politécnico apresentam um telhado em formato de dente de serra, formando uma espécie de mureta divisória (vista superior), em seu teto. A metodologia empregada escolheu, frequentemente, esta mureta como sendo o contorno da edificação, o que não é verdadeiro. A segmentação, o filtro verde e o filtro altimétrico desempenharam corretamente o seu papel. Acontece que, conforme pode ser visto na Figura 77, entre a mureta e a verdadeira borda do prédio existe uma região escura causando a criação de dezenas de micro-segmentações. Estas regiões, com aspecto irregular foram, em sua grande maioria, eliminadas pelo filtro de Douglas-Peucker, falseando a informação sobre a localização da verdadeira borda do prédio, e fazendo com que a mureta fosse escolhida como o contorno da edificação.

Note-se aqui novamente a importância da ordem de aplicação dos filtros de Douglas-Peucker e de fusão, conforme discutido no experimento 4 (item 4.4).

As sombras, não só pelo fato comentado acima, mas também por diversos outros experimentos anteriores (e posteriores), exerce uma influência considerável sobre os resultados. A remoção de sombras constitui um problema crítico em processamento digital de imagens. Existem diversos trabalhos apresentando alternativas para diminuição das mesmas. Neste trabalho não se realizou nenhum tratamento das sombras, o que fez falta, pois diversos resultados poderiam ser melhorados.

FIGURA 77 - RECORTE 09 - FAIXA 8 - SEGMENTAÇÃO

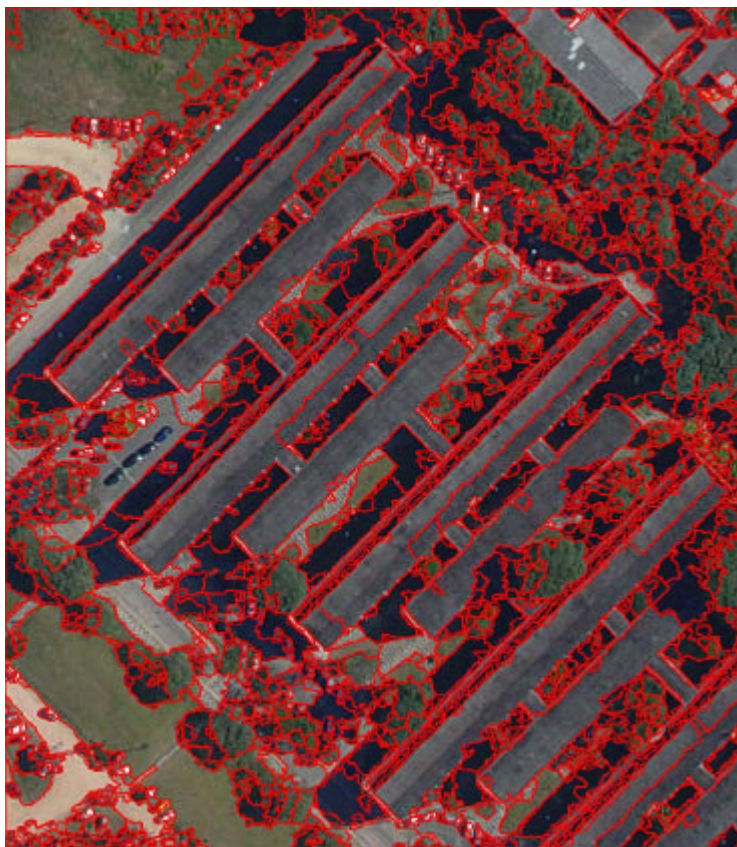


FIGURA 78 - RECORTE 09 - FAIXA 8 - VETORIZAÇÃO



De um modo geral, as formas vetorizadas na Figura 78 ficaram próximas das verdadeiras, exceto quando perto de vegetação (tons escuros de verde), ou sombras. Diversos pontos relevantes do traçado do contorno da edificação foram determinados corretamente, e dois polígonos foram vetorizados indevidamente sobre árvores (passando pelo crivo de todos os filtros).

4.11 EXPERIMENTO 11

Neste experimento (recorte 10) selecionou-se uma área com dois prédios, bem distantes entre si (ver Figura 79). Ambas as edificações contêm sombras e desníveis em seu topo. Um deles apresenta uma região sombreada bem grande em sua cobertura, provocada por uma edificação conexas mais alta (parte direita da imagem). O outro (parte superior esquerda da imagem) apresenta pequena área sombreada acrescida de diversos objetos em sua parte superior (serviço de meteorologia). O recorte ainda contém parte de uma pequena edificação em seu canto inferior esquerdo.

A segmentação deste recorte classificou inclusive os objetos existentes no topo do prédio, mostrando a ferramenta poderosa que se tem em mãos. O filtro verde eliminou algumas regiões com vegetação, e o filtro altimétrico eliminou outras mais baixas que os prédios. As coberturas das edificações permaneceram intactas.

Tendo em vista o alto grau de segmentação, existente no topo do prédio de serviço de meteorologia, pode-se prever dificuldades na aplicação do filtro Douglas-Peucker antes do filtro de fusão. Conclusão: metade da cobertura desta edificação foi eliminada (polígonos irregulares com poucas feições retilíneas), desfavorecendo a identificação correta de seus contornos. A vetorização disforme pode ser visualizada na parte superior esquerda da Figura 80, com um vértice da edificação posicionado corretamente.

No outro prédio, a sombra prejudicou o desempenho da metodologia, mas acabou integrada, como almejado, às demais regiões em sua cobertura. Conforme discutido no nono experimento, as partes escuras, para o algoritmo de segmentação,

são similares entre si, independentemente de sua localização (sobre o topo da edificação, ou em sua lateral, ou ainda no solo). Como resultado, as linhas de contorno nesta região se degeneraram, avançando pelas laterais do prédio. Para melhorar esta performance tem-se duas alternativas: ou não se usa o segmentador como elemento base na metodologia, pelo menos para os locais mais escuros, ou se encontra mecanismos de tratamento das sombras, diminuindo seu efeito sobre a metodologia aplicada. De qualquer modo, as sombras merecem tratamento especial.

O desnível existente no topo deste último prédio foi evidenciado pela segmentação, e as fases seguintes da metodologia acabaram ocasionando o aparecimento de uma ponta inexistente no contorno da edificação (ver Figura 80). Esta pequena inconsistência pode ser resolvida através de uma verificação com conhecimento sobre a geometria dos contornos. A vetorização localizou corretamente cinco vértices relevantes.

Finalmente, a pequena edificação presente parcialmente no canto inferior esquerdo foi vetorizada com pequena irregularidade por causa das árvores em sua proximidade.

FIGURA 79 - RECORTE 10 - FAIXA 5 - SEGMENTAÇÃO

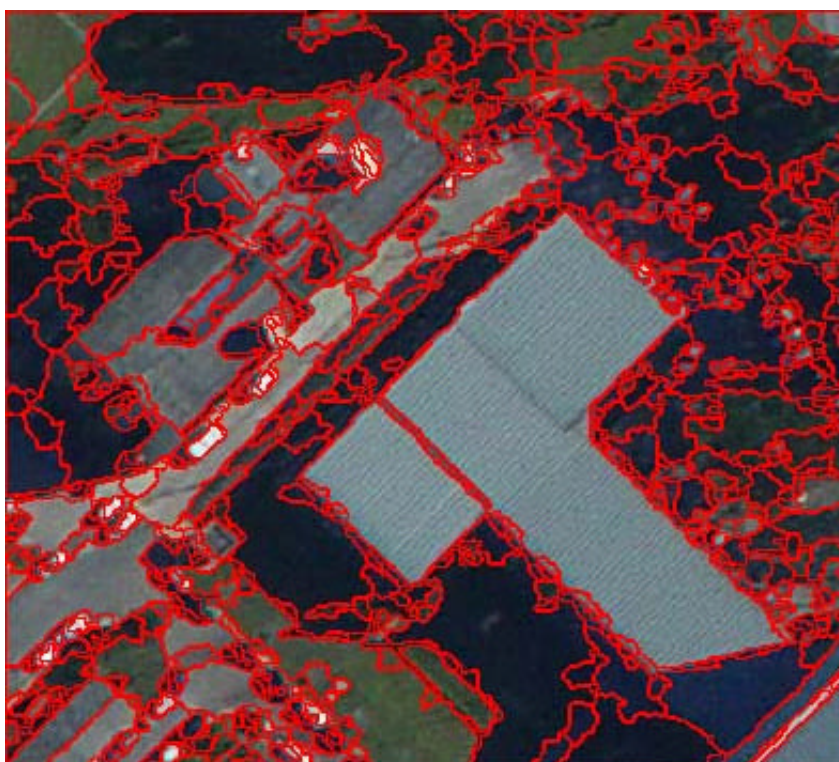


FIGURA 80 - RECORTE 10 - FAIXA 5 - VETORIZAÇÃO



4.12 EXPERIMENTO 12

Neste experimento (recorte 11) voltou-se a trabalhar com regiões urbanas, casas geminadas, árvores, sombras, etc (ver Figuras 81 e 82). Discriminaram-se trinta e seis edificações totalmente compreendidas dentro deste recorte. Dentre estas, quase todas, isto é, trinta e quatro edificações apresentam traços de geminação ou conexão com um ou mais vizinhos. Subentende-se daí que a varredura LASER não consegue separar as mesmas entre si, porque não existem pontos no solo nas conexões. A única alternativa viável para a diferenciação é a segmentação por cores, que é exatamente o que o ser humano faz.

Ainda como características destas edificações: onze apresentam árvores em sua periferia, e onze têm sombras em sua cobertura, sendo que o conjunto intersecção contém cinco edificações; somente uma casa se encontra isolada, embora tenha árvores nas laterais; uma casa se encontra quase que totalmente oculta por árvores e sombras.

FIGURA 81 - RECORTE 11 - FAIXA 5 - SEGMENTAÇÃO

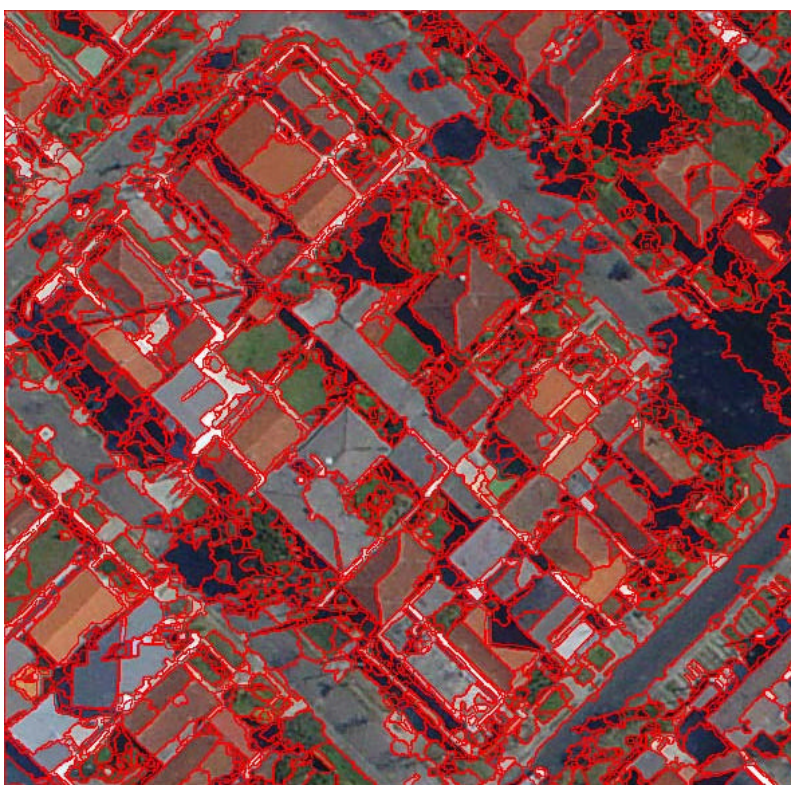


FIGURA 82 - RECORTE 11 - FAIXA 5 - VETORIZAÇÃO

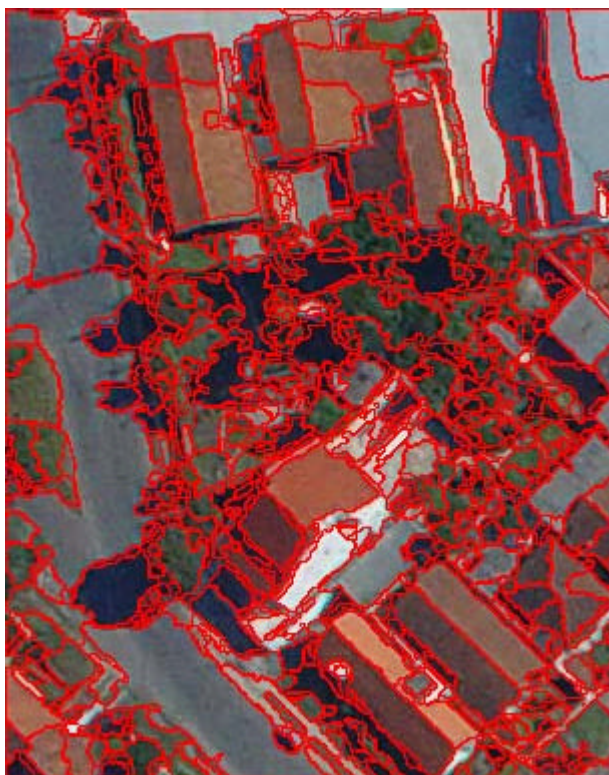


Os filtros de segmentação e de padrão verde conservaram todas as edificações. O filtro altimétrico eliminou parcialmente cinco casas e totalmente duas. O filtro Douglas-Peucker, consecutivo, eliminou mais onze casas parcialmente e uma totalmente.

Todas as edificações contidas no recorte tiveram alguma parte sua vetorizada, exceto as três casas eliminadas em sua totalidade anteriormente, e pelo menos cinco casas foram totalmente restituídas. Desconsiderando-se sete fusões inadequadas, aproximadamente 25% (46/180) de pontos relevantes da vetorização desta quadra foram encontrados pela metodologia, o que representa, em média, um ponto por edificação.

4.13 EXPERIMENTO 13

FIGURA 83 - RECORTE 12 - FAIXA 3 - SEGMENTAÇÃO



O experimento 13 (recorte 12) processou uma pequena quadra, com sete edificações totalmente compreendidas dentro da imagem, em área bastante arborizada

(ver Figuras 83 e 84). Pelo menos cinco edificações podem ser tidas como isoladas. Os procedimentos foram bem, sem eliminação de nenhuma casa, até o algoritmo de Douglas-Peucker, quando cinco casas foram eliminadas parcialmente, provocando deformações em sua vetorização final.

FIGURA 84 - RECORTE 12 - FAIXA 3 - VETORIZAÇÃO



Todas as residências apresentaram alguma vetorização, sendo que, pelo menos um ponto relevante na construção de cada uma foi localizado corretamente. Somente uma casa teve a vetorização adequada, embora a tolerância presente na vetorização tenha suprimido detalhes em uma aresta. A quantidade de pontos relevantes detectados foi de 32,5% (13/40), ou seja, mais do que um por edificação, em média.

4.14 EXPERIMENTO 14

O recorte 13 apresenta duas edificações isoladas, contendo muita área sombreada. Conforme já visto, as áreas sombreadas introduzem uma

supersegmentação com o aparecimento de micro-regiões, que acabam sendo eliminadas nos procedimentos, deformando o contorno da edificação. No topo de uma das edificações (a mais central na Figura 85) as sombras foram geradas por força de uma mureta delimitante do prédio, dificultando a localização precisa destas bordas, conforme pode ser apreciado na Figura 86.

FIGURA 85 - RECORTE 13 - FAIXA 5 - SEGMENTAÇÃO

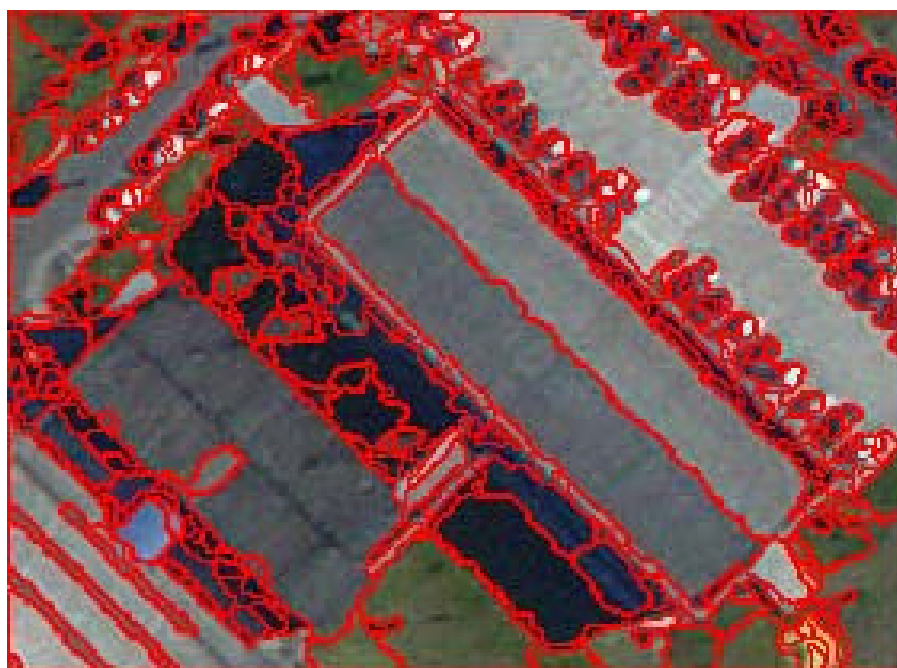


FIGURA 86 - RECORTE 13 - FAIXA 5 - VETORIZAÇÃO



A segunda edificação, em posição mais inferior na imagem, também teve o seu contorno prejudicado por uma sombra em sua lateral superior (na imagem).

Apesar das sombras, três pontos relevantes, dentre os dez definidores dos dois prédios foram localizados adequadamente, significando 30% (3/10) de acertos, pontualmente falando.

4.15 EXPERIMENTO 15

Este experimento (Figuras 87 e 88) e o seguinte (Figuras 89 e 90) foram realizados sobre uma mesma região (recorte 14), inspecionada por duas faixas LASER distintas. A Figura 89, repetição da Figura 87, foi colocada para facilitar a análise visual. Os resultados diferiram sensivelmente, mostrando que o posicionamento dos pontos LASER pode fazer diferença na metodologia proposta. O Quadro 10 (item 4) fornece a quantidade de pontos de varredura LASER: 11329 pontos no experimento 15 contra 11693 pontos no experimento 16.

Apesar da menor quantidade de pontos, o experimento 15 apresentou melhores resultados, incluindo o contorno interior da edificação. Alguns detalhes se perderam em ambos os processamentos, sendo que a sombra invariavelmente prejudicou o resultado. Neste experimento, 27% (5/18) de pontos foram localizados adequadamente, e no experimento seguinte, apenas 11% (2/18).

Procurando-se compreender o porquê de tal diferença, selecionaram-se todos os pontos de varredura LASER, próximos (1,0m de raio) de declives de 2,5m (utilizado pela metodologia). A visualização destes pontos pode ser feita através das Figuras 91 (faixa 05) e 92 (faixa 08), que devem ser comparadas entre si. Percebe-se claramente a falta de densidade de pontos justamente nas bordas em que a metodologia proposta foi prejudicada.

FIGURA 87 - RECORTE 14 - FAIXA 5 - SEGMENTAÇÃO

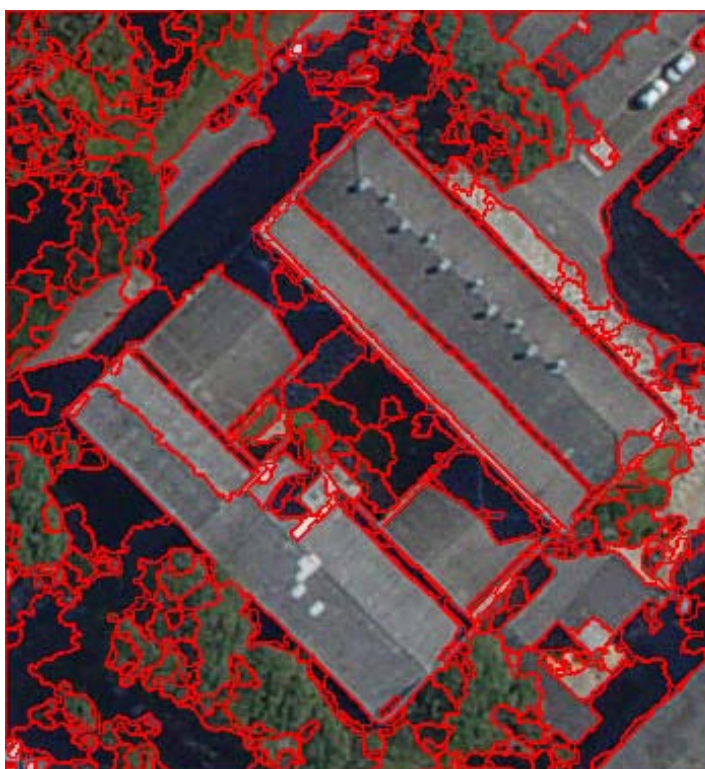


FIGURA 88 - RECORTE 14 - FAIXA 5 - VETORIZAÇÃO



4.16 EXPERIMENTO 16

FIGURA 89 - RECORTE 14 - FAIXA 8 - SEGMENTAÇÃO

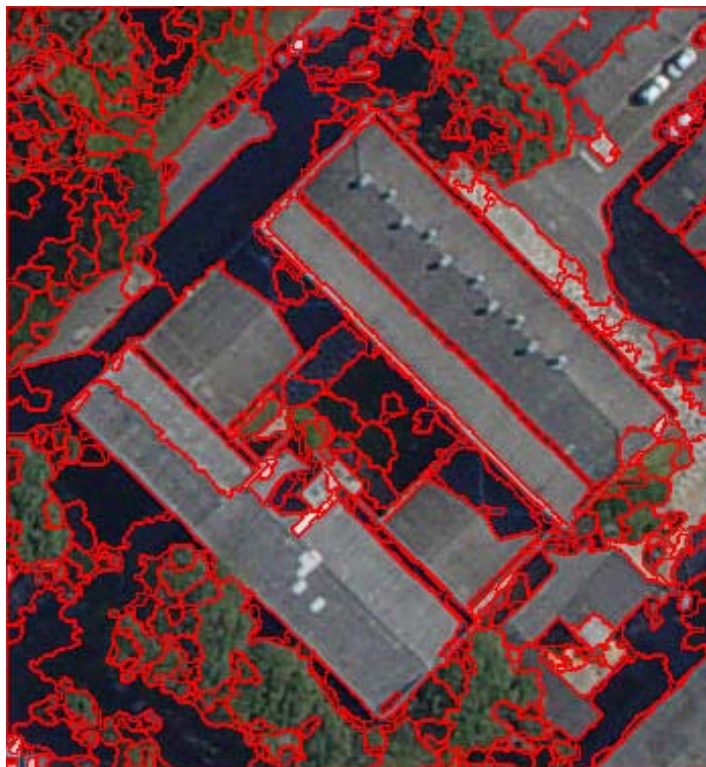


FIGURA 90 - RECORTE 14 - FAIXA 8 - VETORIZAÇÃO

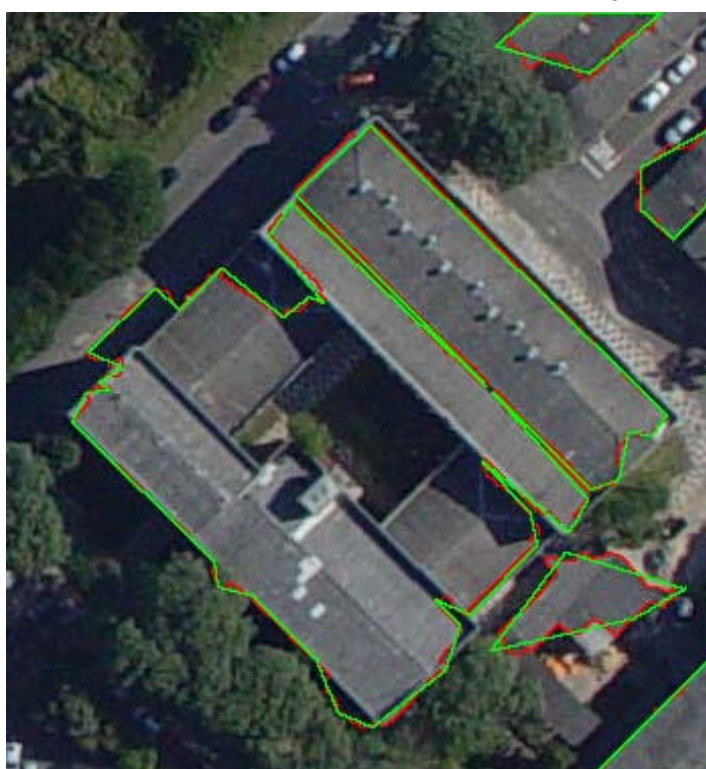


FIGURA 91 - RECORTE 14 - FAIXA 5 - PONTOS PRÓXIMOS DE BORDA

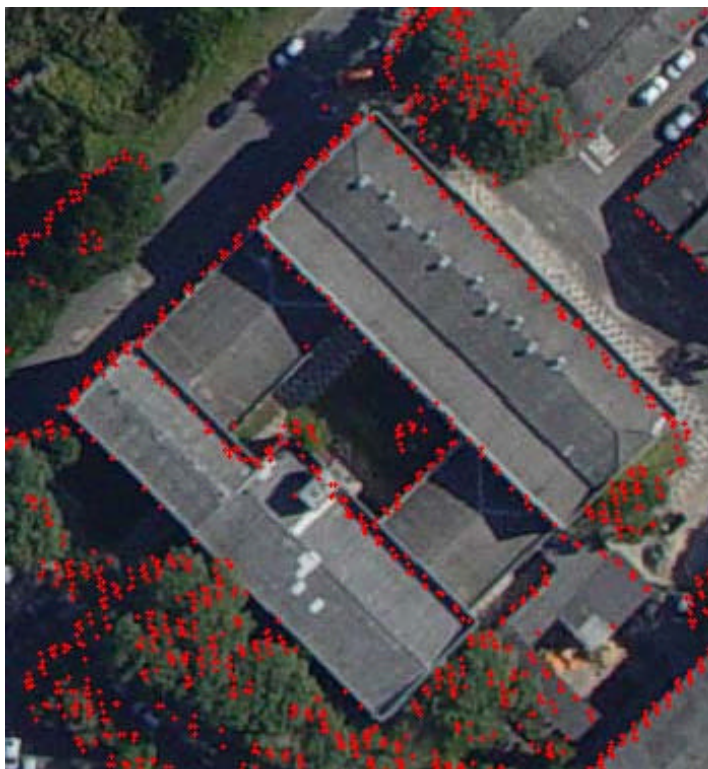
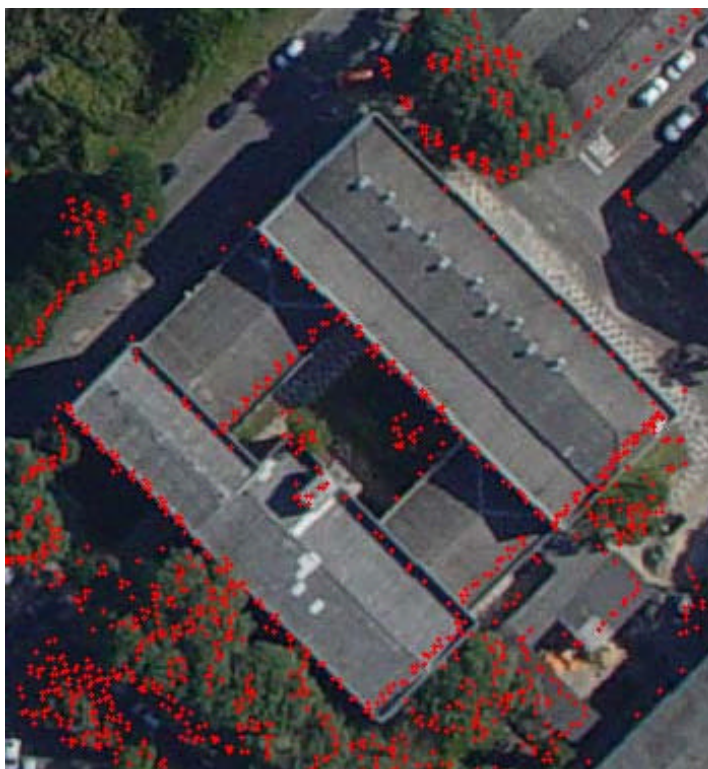


FIGURA 92 - RECORTE 14 - FAIXA 8 - PONTOS PRÓXIMOS DE BORDA



4.17 EXPERIMENTO 17

FIGURA 93 - RECORTE 15 - FAIXA 5 - SEGMENTAÇÃO

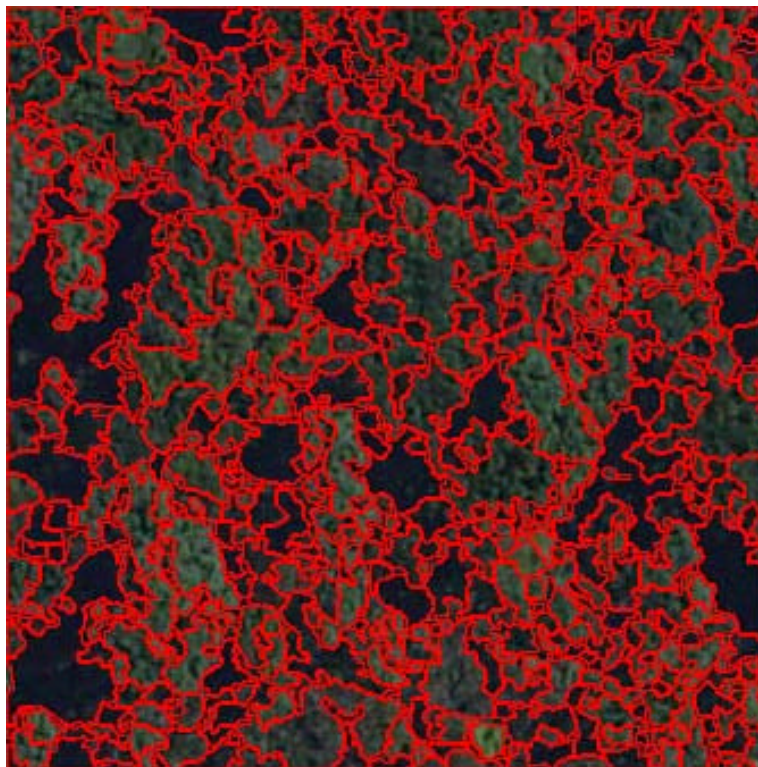
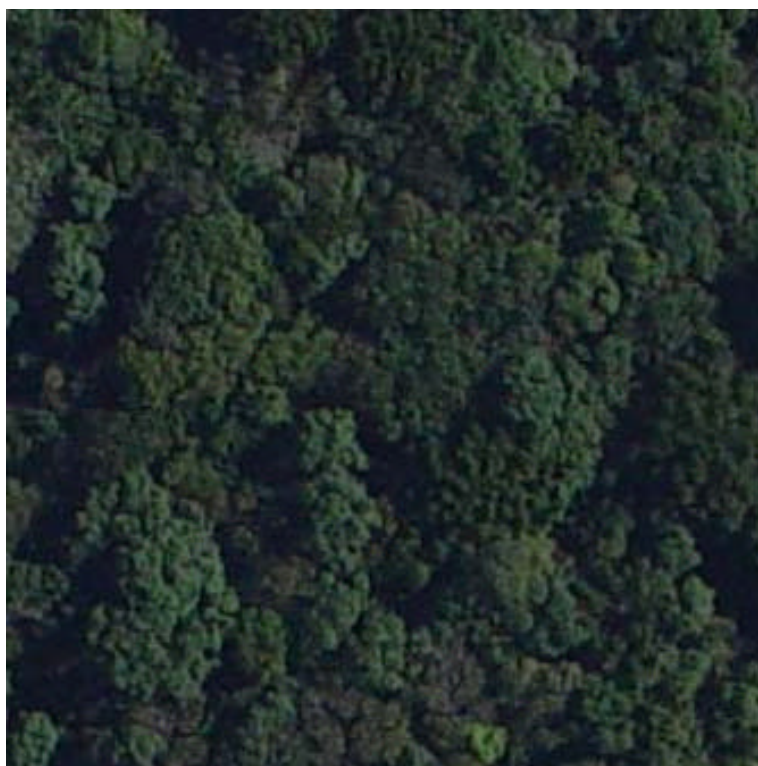


FIGURA 94 - RECORTE 15 - FAIXA 5 - VETORIZAÇÃO



No último experimento (recorte 15) escolheu-se uma região onde não houvesse edificações e, melhor do que isto, somente com vegetação, o que poderia confundir o algoritmo de altimetria. A metodologia eliminou sucessivamente os segmentos identificados inicialmente, acabando por eliminá-los completamente (ver Figuras 93 e 94).

Este último experimento, na realidade, não apresentou este resultado aleatoriamente. Toda a metodologia foi ajustada não só para que isto acontecesse, mas também outros resultados discutidos anteriormente, pois não se atinge um resultado independentemente de outro ou outros.

4.18 AVALIAÇÃO DOS FILTROS

O Quadro 11 apresenta uma relação de todos os experimentos efetuados, informando a quantidade de polígonos obtidos após o processamento em cada fase.

QUADRO 11 - CAPACIDADE DE FILTRAGEM

EXPERIMENTO	RECORTE / FAIXA	Q U A N T I D A D E D E S E G M E N T O S						
		SEGMENTAÇÃO	COM PONTO LASER	FILTRO VERDE	FILTRO ALTIMÉTRICO	DOUGLAS- PEUCKER	FUSÃO	VETORIZAÇÕES
1	1/3	265	160	127	31	2	1	1
2	2/3	128	80	55	15	2	1	1
3	2/5	128	85	59	16	2	1	1
4	3/5	236	169	113	30	1	1	1
5	4/8	5921	3919	3280	896	80	49	44
6	5/8	372	273	221	37	4	3	3
7	6/5	302	219	178	28	2	1	1
8	7/8	252	171	138	26	3	1	1
9	8/8	842	633	534	139	13	2	2
10	9/8	5132	3515	2855	1129	78	28	11
11	10/5	1366	945	769	233	11	5	5
12	11/5	5051	3448	2827	669	64	42	40
13	12/3	1605	1019	815	211	20	13	13
14	13/5	918	577	481	104	9	4	3
15	14/5	1188	720	592	253	17	5	5
16	14/8	1188	733	605	268	20	5	5
17	15/5	1303	977	630	271	0	0	0

O algoritmo de deslocamento pela média, neste contexto responsável pela segmentação por cores de imagens, provou que é capaz de distinguir com qualidade as variações de cores dentro das mesmas, sendo considerado imprescindível. Este fato pode ser bem aproveitado sob inúmeras outras formas pela comunidade fotogramétrica.

As sombras nas imagens constituem armadilhas para muitos algoritmos, inclusive os aqui desenvolvidos. Recomenda-se adotar um limiar de luminosidade, abaixo do qual, outros procedimentos de análise da imagem sejam acionados. Isto possibilitaria o reconhecimento de bordas de edificações, vistas pelos seres humanos, mas imperceptíveis aos algoritmos que não tomam este cuidado. Muitas técnicas são estudadas sob o título de restauração de imagens, com emprego freqüente da transformada de Fourier, sem falar nas pesquisas específicas de procedimentos para diminuição de sombras.

Verifica-se que uma grande quantidade de polígonos é desprezada (32%), após a segmentação, porque não contem nenhum ponto de varredura LASER para o cálculo de sua altitude média (ver coluna sob o título "COM PONTO LASER"). Pode-se pensar em usar as altitude interpoladas, e não desperdiçar estes segmentos, mas a verdade é que estas regiões são realmente muito pequenas, e não trazem grande contribuição para o processo.

O filtro VERDE, não é muito poderoso, tendo causado diminuição dos segmentos existentes igual a 19% (a mais fraca atuação dentre todos os filtros). Por outro lado, o procedimento se encontra dentro dos objetivos propostos, isto é, só elimina um dado segmento se a probabilidade de existência de vegetação for alta (tons verdes bem definidos). Acredita-se que este filtro tenha cumprido eficazmente seu papel.

Para se melhorar este filtro pode-se pensar não tanto na simples adição de reconhecimento de novos tons de verde (talvez mais escuros), mas principalmente no acréscimo de conhecimento de percepção de vizinhança. Uma identificação positiva para verde, em uma região, pode ser sucedida por uma análise de todos os segmentos vizinhos, admitindo-se, desta feita, uma tolerância maior para tons de verde. O espaço de cores CIELUV, embora não perfeitamente isotrópico, mostra uniformidade adequada para este manuseio.

Quanto ao filtro altimétrico, impressionou pela qualidade das decisões tomadas (classificação entre regiões altas e baixas), concluindo-se que a lógica de seus

procedimentos foi muito acertada. Como resultado, nos experimentos efetuados, diminuiu a quantidade de segmentos existentes em cerca de 70%, com bastante eficácia. É claro que nem sempre as decisões deste procedimento foram acertadas, mas, sob condições adequadas (edificações isoladas), com quantidade razoável de dados de varredura LASER circundando bem toda a edificação, os resultados apresentados foram bons.

Torna-se claro que quanto maior a densidade de informação altimétrica, tanto maior a eficácia deste procedimento. Deve-se lembrar que, nos experimentos efetuados, a relação de pontos de varredura LASER sobre pontos de imagem ficou abaixo de 10%.

Uma informação existente nos pontos de varredura LASER, que não foi aproveitada, é a localização dos pontos com diferenças significativas entre os primeiro e último pulsos. São poucos pontos na borda de uma edificação (ou vegetação), mas isto é informação adicional. Outra ferramenta que pode contribuir é a identificação dos pontos LASER próximos de desnível, pela borda superior (empregado para gerar as Figuras 91 e 92).

O filtro altimétrico pode tirar proveito das sugestões acima mencionadas para tratamento de sombras, tons de verde, e dados da varredura LASER. Este filtro já analisa inerentemente toda a sua vizinhança, mas a adição de mais conhecimento nunca deve ser descartada. A extensão de análise de vizinhança aumenta a quantidade de informação empregada nas classificações, devendo ocasionar um aumento consistente no percentual de exclusão de segmentos indesejáveis.

O algoritmo de Douglas-Peucker, usado com diversas tolerâncias, para diferentes finalidades, demonstrou mais uma vez sua capacidade para traçar contornos de edificações. A atuação, como filtro discriminador de segmentos válidos ou não, foi enorme (92% de eliminações), muito embora a maior contribuição tenha vindo das micro-regiões, o que acarretou uma limpeza visual.

Uma das dificuldades deste algoritmo, quando da integração com o processo de ajustamento de retas, e cômputo de coordenadas de intersecções entre retas

consecutivas, é a criação de pontas, eventualmente muito distantes do polígono original (às vezes até fora da imagem). Isto acabou sendo resolvido, de forma geral, pela diminuição progressiva, em escala geométrica, da tolerância para a suavização de polígonos. Infelizmente esta medida implica aumento da quantidade de segmentos de reta para o traçado do contorno das edificações.

O emprego do algoritmo de Douglas-Peucker para localizar feições retilíneas presentes em uma imagem (após o segmentador) constitui uma ferramenta muito valiosa para a automatização de procedimentos fotogramétricos.

O processo de fusão de regiões vizinhas, realizado dentre as que persistiram através de todos os procedimentos anteriores, é complexo, sob o ponto de vista de programação. A diminuição de segmentos foi da ordem de 50%, significando que, em média, cada dois segmentos deram origem a um novo segmento resultante da integração. Os procedimentos foram corrigidos diversas vezes, sendo finalmente acertados.

Muita dúvida existiu sobre se o a fusão de polígonos devia vir antes ou depois do filtro de Douglas-Peucker. Os resultados apontaram para uma melhoria em alguns casos e piora em outros. A sugestão é a elaboração de um filtro conjunto, com mais conhecimento, fazendo-se a fusão antes, se a quantidade de feições retas do conjunto alterado assim aumentar, e depois em caso contrário. Esta regra evitaria eliminações indesejáveis de segmentos em fases intermediárias, fatos que aconteceram nos diversos experimentos.

Finalmente, no processo de vetorização, via ajuste geométrico, mais alguns polígonos acabaram sendo eliminados (cerca de 15%), por causa justamente da dificuldade de traçar os contornos (sem intersecções válidas).

A etapa de vetorização emprega o algoritmo de Douglas-Peucker para a generalização do traçado do contorno de uma edificação. Dependendo da generalização, podem acontecer intersecções de segmentos de reta em locais muito distantes de qualquer vértice do polígono original (algumas vezes até saindo do domínio da imagem). Nestes casos, adotou-se uma diminuição progressiva de

tolerância, até que a localização de todas as intersecções estejam próximas do polígono. Esta medida implica, eventualmente, na eliminação do polígono. Como sugestão pode-se pensar na adoção do algoritmo de Douglas-Peucker com tolerância reduzida apenas nos locais onde se precisa, e não em todo o conjunto, como hoje, ou seja, a generalização seria a adequada para cada caso.

A etapa de vetorização pode ganhar muito adicionando-se mais conhecimento aos seus algoritmos, visando-se aspectos geométricos das edificações encontradas: por exemplo, os segmentos de reta, componentes de um polígono, podem ser analisados sob o enfoque de eventual continuidade ou colinearidade com outros segmentos de reta do mesmo polígono (arestas parcialmente ocultas); e vértices ocultos podem ter sua localização deduzida.

Os diversos limiares adotados nos filtros propostos neste trabalho, hoje fixos, podem ser alterados para variáveis calculadas automaticamente conforme a escala de trabalho e/ou áreas das regiões segmentadas.

Algumas sugestões foram apresentadas aqui. Que não se interprete estas sugestões como sinal de que este trabalho não contemplou adequadamente o objetivo proposto. A busca da melhoria, na automatização, não tem fim. Dia a dia, novos testes vêm sendo feitos, incorporando seus algoritmos, eventualmente, à sistemática apresentada aqui, com a geração de novas sugestões. As sugestões aqui apresentadas são as que, no momento da escrita deste trabalho, estavam sendo cogitadas. Mais importante, a implementação das sugestões não implica necessariamente em melhoria de resultados (melhores contornos para as edificações).

4.19 ANÁLISE QUANTITATIVA DOS RESULTADOS

A avaliação da qualidade fotogramétrica dos resultados obtidos foi feita selecionando-se alguns pontos, dentre aqueles cujas vetorizações apresentaram correção visual de traçados. Tendo em vista esta orientação, esta análise tem mais por objetivo verificar a correção dos procedimentos fotogramétricos.

Uma amostra com setenta e um (71) pontos, distribuídos pela imagem, foi observada. O processamento final da vetorização fornece as coordenadas de terreno de todos os seus pontos, polígono por polígono. Para se comparar tais coordenadas executou-se uma monorestituição manual sobre as mesmas feições.

QUADRO 12 - EFETIVIDADE DE ACERTOS

EXPERIMENTO	TOTAL DE PONTOS CONSIDERADOS	PONTOS BONS
1	4	4
2	4	4
3	4	4
4	8	3
5	238	84
6	12	9
7	8	4
8	4	1
9	8	3
10	86	35
11	19	6
12	180	46
13	40	13
14	10	3
15	18	5
16	18	2
TOTAIS	661	226

Admitindo-se a monorestituição manual como referência, os desvios encontrados apresentaram as médias próximas de zero. As médias amostrais são:

$$\begin{aligned}\Delta E &= 0,093 \\ \Delta N &= -0,048 \\ \Delta H &= -0,192\end{aligned}\tag{88}$$

Os desvios padrões também foram estimados:

$$\begin{aligned}\hat{s}_E &= 0,498 \\ \hat{s}_N &= 0,552 \\ \hat{s}_H &= 0,628\end{aligned}\tag{89}$$

Aplicando-se o teste de Kolmogorov-Smirnov para grandes amostras (mais que quarenta pontos) constata-se facilmente que os resultados encontrados pela metodologia desenvolvida apresentam distribuição estatística semelhante à dos resultados da monorestituição manual, como se tivessem sido extraídos de uma mesma população.

Estendendo-se os resultados da amostra para todas as medidas, segue-se que aproximadamente 68,26% das observações apresentarão uma discrepância da ordem de 0,5m (1 σ), em cada direção, e 95,45% da ordem de 1,0m (2 σ).

Procurou-se avaliar a efetividade de localização de pontos relevantes descritores do contorno das edificações, baseando-se nos experimentos efetuados. Para tanto, inspecionou-se todas as imagens, computando-se os pontos localizados corretamente, visualmente falando. Os resultados são apresentados no Quadro 12, totalizando uma média aproximada igual a 34% (226/661) de acertos.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho versou sobre a extração automática de contornos de edificações a partir de imagens tomadas por câmara digital de pequeno formato (não fotogramétrica) e dados de varredura LASER. As pesquisas centraram-se na diferenciação dos padrões de cor da imagem, buscando-se com isto equiparação aos procedimentos humanos. Para a avaliação deve se atentar ao automatismo de todos os procedimentos propostos, realizados sem intervenção humana.

Cedo, percebeu-se a necessidade de duas ferramentas indispensáveis: uma envolvendo a pesquisa rápida de pontos da varredura LASER, com a proposição de classificação por regiões planimétricas destes pontos, em sistemática simples e eficiente; outra envolvendo a introdução de erros sistemáticos, em câmaras digitais não fotogramétricas, demonstrando a obrigatoriedade de uso de rotinas iterativas, com a proposição do método iterativo de Newton-Raphson para resolução de sistemas de equações.

Os experimentos foram bem sucedidos, comprovando que a metodologia proposta é capaz de distinguir edificações em ambientes urbanos, com casas geminadas, onde a varredura LASER, por si só, não é capaz de fornecer elementos para a classificação.

Outra vantagem evidenciada nos experimentos é a capacidade de detecção da linha de quebra presente no topo de algumas edificações, informação inexistente (diretamente) nas varreduras LASER. Esta característica é muito importante nos trabalhos de reconstrução tridimensional das edificações, tópico de grande interesse em Fotogrametria, mas não deste trabalho.

Desenvolveram-se diversos algoritmos para manuseio das informações disponíveis em ambos meios digitais (fontes empregadas). A sistemática apresentada aqui retratou o que de melhor se conseguiu ao longo dos trabalhos, enfatizando-se robustez e simplicidade nos procedimentos. Muito ainda pode ser feito, mas este é um serviço sem fim, reconhecendo-se, assim, a grande dificuldade existente na

consecução do objetivo almejado.

Os procedimentos propostos apresentaram um grande potencial, sendo infindável a gama de experimentos que se podem fazer com os mesmos. O filtro para tons de verde, no espaço de cores CIELUV, demonstrou sua capacidade de reconhecimento dos tons exigidos, sem gerar confusão com outras cores. A isotropia do espaço de cores mostrou-se suficiente.

O filtro altimétrico, baseando-se em um pequeno conjunto de regras lógicas, respondeu com coerência e grande eficiência, desempenhando papel relevante na conexão entre segmentação e dados de varredura LASER, dependendo fortemente deste último.

O filtro baseado no algoritmo de Douglas-Peucker mostrou uma boa habilidade na distinção de feições retilíneas dentro de uma imagem, pós-segmentadas pelo algoritmo de deslocamento pela média, sendo capaz de dotar a Fotogrametria com uma arma muito poderosa no manuseio automático de imagens.

A implementação da metodologia, sob o ponto de vista pragmático de programação desenvolvida, constituiu uma biblioteca poderosa de ferramentas, podendo originar múltiplas pesquisas de âmbito internacional. Sempre se poderá adicionar, a este conjunto, mais capacidade de realização da extração automática ou semi-automática de contornos de edificações, aumentando o volume de rotinas especializadas.

Como desvantagem da metodologia mostrada pode-se citar a baixa performance obtida no traçado das edificações, ensejando diversas alterações que poderão ou não melhorar os resultados. Entretanto, não se deve esquecer que todos os experimentos foram efetuados em cima de dados reais, incluindo situações de grande dificuldade, em áreas urbanas com alta densidade de edificações, bastante vegetação, e sombras. As edificações existentes em alguns recortes, dentre os experimentados, podem apresentar problemas de inconsistência entre si, se restituídas por operadores diferentes, ou com pouca experiência. Em edificações isoladas, sem sombras ou árvores pelas imediações da cobertura da mesma, os resultados foram excelentes.

Ainda como desvantagem, os algoritmos apresentados dependem fortemente da etapa de segmentação. Se houver alguma segmentação errada, isto é, misturando-se regiões de topo de edificação com solo vizinho à edificação, como ocorreu com frequência nos experimentos, os demais algoritmos não tem condições de corrigir, ocasionando distorções na vetorização final. Outra mostra disto aparece nos casos de supersegmentação, onde muitas micro-regiões são eliminadas, gerando inconsistências. Alguns destes problemas poderão ser removidos fazendo-se uma análise prévia das altitudes existentes em um determinado segmento.

A automatização, tão sonhada pelos pesquisadores, ainda não fornece resultados iguais aos de um operador humano, em procedimentos manuais. Tendo em vista o conhecido grau de dificuldade no desenvolvimento de algoritmos totalmente automáticos, os pesquisadores têm mudado de orientação, preferindo os processos semi-automáticos. Outra vantagem desta preferência é que as ferramentas vêm melhorando gradativamente, sempre sob o auxílio do homem, mas minimizando cada vez mais esta ajuda.

Para a continuidade de pesquisas correlatas a este trabalho recomenda-se:

- a) Realizar estudos sobre tratamento de sombras, diminuindo os efeitos causados por sua presença em processos automáticos ou semi-automáticos;
- b) Desenvolver algoritmos de manipulação de contornos de edificações, melhorando a sua apresentação final, quando necessária, via incorporação de diretivas geométricas inteligentes, que saibam lidar com toda sorte de possibilidades presentes em trabalhos de vetorização de polígonos (ex.: vértices, arestas, e intersecções ocultas, linhas interrompidas, etc);
- c) Realizar estudos sobre algoritmos de geração de DTM a partir do DSM provido por uma varredura LASER;
- d) Incorporar aos procedimentos desenvolvidos informações sobre edificações detectadas pelo modelo digital de superfície normalizado (varredura LASER), propiciando mais robustez a esta ou aquela

metodologia;

- e) Realizar estudos sobre segmentação de imagem colorida empregando o espaço 4dimensional CIELUV mais altitude LASER (ou gradiente de altitude).

REFERÊNCIAS

ACKERMANN, F.; KRZYSZEK, P. **MATCH-T: Automatic Mensuration of Digital Elevation Models**. Presented paper to the 3rd Technical Seminar of the Sociedad Espanola de Cartografia Fotogrametria y Teledeteccion, 1991.

ACKERMANN, F. **Airborne Laser Scanning for Elevation Models**. GIM, Geomatics Info Magazine. v. 10, n. 10, 1996. p. 24-25.

ACKERMANN, F. **Airborne Laser Scanning – Present Status and Future Expectations**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. v. 54 (1), 1999. p. 64-67.

ADOBE. **Color Models: CIE, CIELAB, CIELUV, CIEXYZ, HSB/HLS, Main, Munsell and RGB/CMY**. Disponível em: <http://support.techguides/color/colormodels/>www.adobe.com. Acesso em: 07 fev. 2003.

ANDRADE, J. B. **Photogrammetric Refraction**. Ohio, 1977. Thesis (Doctor of Philosophy) – Ohio State University, 117p.

ANDRADE, J. B.; OLIVAS, M. A. A. **Calibração de Câmaras Aerofotogramétricas**. Boletim da UFPR, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, n. 26, p. 01-39, Curitiba, 1981.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. SBEE, 1998. ISBN 85-86180-07-6.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. SBEE, 2003, 2. ed. ISBN 85-86180-28-9.

ANDRADE, R. R. **Mensurações Dendrométricas com Câmeras Digitais Calibradas**. Dissertação de Mestrado apresentada no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da UFPR, 2001.

AXELSSON, P. **Integrated Sensors for Platform Orientation and Topographic Data Acquisition**. Proceedings of the Symposium on Digital Photogrammetry, Istanbul, Turkey, 1998. p. 1-11.

AXELSSON, P. **Processing of Laser Scanner Data – Algorithms and Applications**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 54 (1), 1999. p. 138-147.

BAILER, W.; SCHALLAUER, P.; HARALDSSON, H. B.; REHATSCHEK, H. **Optimized Mean Shift Algorithm for Color Segmentation in Image Sequences**. Proc. Conference on Image and Video Communications and Processing, IS&T/SPIE Electronic Imaging, San Jose, CA, USA, Jan. 2005.

BAILLARD, C.; ZISSERMAN, A. **Automatic Reconstruction of Piecewise Planar Models from Multiple Views**. In.: Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1999. p. 559-565.

BAILLARD, C.; SCHMID, C.; ZISSERMAN, A. FITZGIBBON, A. **Automatic Line Matching and 3D Reconstruction of Buildings from Multiple Views**. In.: IAPRS, v. 32, Part 3-2W5, 1999.

BALTSAVIAS, E. P. **A Comparison between Photogrammetry and Laser Scanning**. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**. v. 54 (1), 1999a. p. 83-94.

BALTSAVIAS, E. P. **Airborne Laser Scanning: Existing Systems and Firms and Other Resources**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. v. 54 (1), 1999b. p. 164-198.

BALTSAVIAS, E. P.; GRÜN, A.; VANGOOL, L. **Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Satellite Images (III)**. Balkema Publishers, Netherlands, eds., 2001.

BRADSKI, G. R.; THRUN, S. **Lecture 11: Segmentation and Grouping**. Notas de aula da Universidade de Stanford. Disponível em: <http://robots.stanford.edu/cs223b04/CS%20223-B%20L11%20Segmentation.ppt>, 2003. Acesso em: 08 jan. 2006.

BRAUN, C.; KOLBE, T. H.; LANG, F.; SCHICKLER, W.; STEINHAGE, V.; CREMERS, A. B.; FÖRSTNER, W.; PLÜMER, L. **Models for Photogrammetric Building Reconstruction**. Computer & Graphics 19(1), p. 109-118, 1995.

BRENNER, C; HAALA, N. **Rapid Acquisition of Virtual Reality City Models from Multiple Data Sources**. In.: H. Chikatsu and E. Shimizu (ed.), IAPRS v.32 Part 5, 1998. p. 323-330.

BRENNER, C. **Erfassung von 3D-Stadtmodellen**. In: Fritsch, D., Brenner, C., Haala, N., and Walter, V., eds., Tutorium Phowo 99: Algorithmen und ihre Automatisierung in der photogrammetrischen Datenauswertung, Stuttgart, Germany. Institute for Photogrammetry at Stuttgart University, 1999.

BRENNER, C. **Building Reconstruction from Laser Scanning and Images**. Institute of Cartography and Geoinformatics, University of Hannover, Germany, 2003.

BROWN, D. G. **An Advanced Plate Reduction for Photogrammetric Cameras**. Report, Air Force Cambridge Research Laboratories, 1964. p. 64-40.

BROWN, D. G. **Decentering Distortion and the Definitive Calibration of Metric Cameras**. s.l., American Society of Photogrammetry, 1965.

BROWN, D. G. **Decentering Distortion of Lenses**. Photogrammetric Engineering, 32(3):444, May 1966.

BRUNN, A. **Techniques for Automatic Building Extraction**. In: Third Course in Digital Photogrammetry, Bonn, Germany. Institute for Photogrammetry at Bonn University and Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, 1998.

BUMBACA, F.; SMITH, K. C. **Design and Implementation of a Colour Vision Model for Computer Vision Applications**. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, v. 39, p. 226-245, 1987.

CANNY, J. F. **Finding Edges and Lines**. Tech Report 720. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 1983.

CHENG, Y. **Mean Shift, Mode Seeking, and Clustering**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 17, n. 8, 1995. p. 790-799.

COMANICIU, D.; MEER, P. **Robust Analysis of Feature Spaces: Color Image Segmentation**. In Proceedings IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997.

COMANICIU, D.; MEER, P. **Distribution Free Decomposition of Multivariate Data**. Pattern Analysis & Applications, 1999a (2), p. 22-30.

COMANICIU, D.; MEER, P. **Mean Shift Analysis and Applications**. In Proceedings IEEE International Conference on Computer Vision, 1999b.

COMANICIU, D.; MEER, P. **Mean Shift: A Robust Approach Toward Feature Space Analysis**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002. v. 24, n. 5, p. 603-619.

CONRADY, A. E. **Decentered Lens System**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 79:384-90, 1919.

CSATHÓ, B.; SCHENK, T.; LEE, D.-C; FILIN, S. **Inclusion of Multispectral Data into Object Recognition**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. v. 32 (7-4-3W6), 1999. p. 53-60.

DAVIS JR., C. A. **Uso de Vetores em GIS**. Fator GIS 4(21), p. 22-23, 1997.

DAVIS JR., C. A. **Simplificação de Poligonais**. Disponível em: http://www.pbh.gov.br/prodabel/cde/publicacoes/2000/davis7_2000.pdf, 2000. Acesso em: 03 nov. 2003.

DELARA, Jr. R. **Calibração de Câmaras Digitais Não Métricas de Pequeno Formato Utilizando o Pixel como Unidade no Espaço-Imagem**. Seminário apresentado no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR. Setembro, 2003.

DOUGLAS, D. H.; PEUCKER, T. K. **Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Line or Its Caricature**. The Canadian Cartographer. v. 10 (2), 1973.

DUDA, R. O.; HART, P. E. **Pattern Classification and Scene Analysis**. John Wiley & Sons, New York, 1973.

DUDA, R. O.; HART, P. E.; STORK, D. G. **Pattern Classification**. Wiley, 2. ed., 2001.

ENGLERT, R. **Learning Model Knowledge for 3D Building Reconstruction**. Doctor Thesis, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Institute of Computer Science III, Bonn, Germany, 1998.

FAUGERAS, O. **Three-Dimensional Computer Vision**. MIT Press, 1994.

FISCHER, A.; KOLBE, T. H.; LANG, F.; CREMERS, A.; FÖRSTNER, W.; PLÜMER, L.; STEINHAGE, V. **Extracting Buildings from Aerial Images using Hierarchical Aggregation in 2D and 3D**. *Computer Vision and Image Understanding*. 72(2), p. 195-203, 1998.

FÖRSTNER, W. **3D-City Models: Automatic and Semi-Automatic Acquisition Methods**. In.: D. Fritsch and R. Spiller, eds, *Photogrammetric Week 99*, Wichmann Verlag, 1999. p. 291-303.

FRASER, B; MURPHY, C.; BUNTING, F. **Real World Color Management**. Second Edition. Estados Unidos: Peachpit Press, 2005. 582p.

FRITSCH, D.; KILIAN, J. **Filtering and Calibration of Laser Scanner Measurements**. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. v. 30 (3), 1994. p. 227-234.

FRITSCH, D. **Virtual Cities and Landscape Models – What Has Photogrammetry to Offer?**. In: Fritsch, D., Spiller, R. (Eds.), *Photogrammetric Week '99*. Wichmann, Heidelberg, 1999. p. 3-14.

FUKUNAGA, K.; HOSTETLER, L. **The Estimation of the Gradient of a Density Function with Applications in Pattern Recognition**. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1975. v. 21, n. 1, p. 32-40.

GALO, M. **Calibração e Aplicação de Câmaras Digitais**. Curitiba, 1993. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR.

GEORGESCU, B.; CHRISTOUDIAS, C. M. **Edge Detection and Image Segmentation (EDISON) System, version 1.1**. Disponível em: <<http://www.caip.rutgers.edu/riul/>>, 2002. Acesso em: 08 jan. 2006.

GEORGESCU, B.; SHIMSHONI, I.; MEER, P. **Mean Shift Based Clustering in High Dimensions: A Texture Classification Example**. In International Conference on Computer Vision (ICCV03), p. 456-463, 2003.

GRANDIS, Luigina De. **Theory and Use of Color**. Translated by John Gilbert. New York: Harry N. Abrams, Inc., 1986. 159 p. ISBN 0-8109-2317-3.

GRIMSON, W. E. L. **Object Recognition by Computer**. Series in Artificial Intelligence. MIT Press, Cambridge, Mass, 1990.

GRÜN, A.; KÜBLER, O.; AGOURIS, P. **Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (I)**. Birkhäuser, Basel, eds., 1995.

GRÜN, A.; BALTSAVIAS, E.; HENRICSSON, O. **Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)**. Birkhäuser, Basel, eds., 1997.

GRÜN, A.; DAN, H. **TOBAGO a Topology Builder for the Automated Generation of Building Models**. In.: A. Grün, E. Baltsavias and O. Henricsson, Automatic Extraction of Man-made Objects from Aerial and Space Images (II). Birkhäuser, Basel, eds., 1997. p. 149-160.

GRÜN, A.; WANG, X. **CC-Modeler: A Topology Generator for 3-D City Models**. In.: D. Fritsch, M. Englich and M. Sester, eds, IAPRS, Vol. 32 Part 4, Stuttgart, 1998. p. 188-196.

GÜLCH, E.; MÜLLER, H.; LÄBE, T.; RAGIA, L. **On the Performance of Semi-Automatic Building Extraction**. In.: ISPRS CommIII Symposium, Columbus, Ohio, 1998.

GÜLCH, E.; MÜLLER, H.; LÄBE, T. **Integration of Automatic Processes into Semi-Automatic Building Extraction**. In.: IAPRS, v. 32 Part 3-2W5, München, 1999.

HAALA, N. **Detection of Buildings by Fusion of Range and Image Data**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. v. 30 (3), 1994. p. 341-346.

HAALA, N. **Gebäuderekonstruktion durch Kombination von Bild- und Höhendaten**. Doctor Thesis, Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, N. 460, München, 1996.

HAALA, N.; ANDERS, K.-H. **Acquisition of 3D Urban Models by Analysis of Aerial Images, Digital Surface Models and Existing 2D Building Information**. In: McKeown Jr., D.M., McGlone, J.C., Jamet, O. (Eds.), Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision III. Proceedings SPIE, v. 3072, 1997. p. 212-222.

HAALA, N.; BRENNER, C.; ANDERS, K.-H. **Generation of 3D City Models from Digital Surface Models and 2D GIS**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 32 (3-4W2), 1997. p. 68-75.

HAALA, N. **Combining Multiple Data Sources for Urban Data Acquisition**. In: Fritsch, D., Spiller, R. (Eds.), Photogrammetric Week '99. Wichmann, Heidelberg, 1999. p. 329-339.

HABIB, A. F.; GHANMA, M.; MORGAN, M.; MITISHITA, E. **Integration of Laser and Photogrammetric Data for Calibration Purposes**. XX ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, PS WG II/2 Systems for SAR and LIDAR Processing, 12-23 July 2004.

HEIKKILÄ, J.; SILVÉN, O. **A Four-Step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction**. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR97), San Juan, Puerto Rico, 1997, p. 1106-1112.

HENRICSSON, O. **Analysis of Image Structures using Color Attributes and Similarity Relations**. PhD Thesis, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, Mitteilungen n. 59, 1996.

HENRICSSON, O.; BALTSAVIAS, E. **3-D Building Reconstruction with ARUBA: A Qualitative and Quantitative Evaluation**. In: A. Grün, E. Baltsavias and O. Henricsson (eds), Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II), Birkhäuser, Basel, p. 65-76, 1997.

HOUGH, P. V. C. **Method and Means for Recognizing Complex Patterns**. U. S. Patent 3069654 (1962).

ILLINGWORTH, J.; KITTLER, J. **A survey of the Hough Transform**. Computer Vision, Graphics and Image Processing, v. 44, p. 87-116, 1988.

JAIN, A. K.; DUBES, R. C. **Algorithms for Clustering Data**. Englewood Cliff, NJ: Prentice Hall, 1988.

JAIN, A. K.; FLYNN, P. J. **Three-Dimensional Object Recognition Systems**. Elsevier, eds., 1993.

JAIN, R.; KASTURI, R.; SCHUNCK, B. G. **Machine Vision**. McGraw-Hill, Inc. Singapore, 1995.

JEYAPALAN, K. **Mobile Digital Cameras for As-Built Surveys of Roadside Features**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 70 (3), March 2004, p. 301-312.

KOEHL, M. **Topologic Models for Geometric Reconstruction**. In: Baltavias, E., Eckstein, W., Gülch, E., Hahn, M., Stallmann, D., Tempfli, K., and Welch, R., eds., Proceedings ISPRS Commission III/IV Workshop on 3D Reconstruction and Modelling of Topographic Objects, Vol. XXXII/3-4W2 of International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, p. 189-195, Stuttgart, Germany, 1997.

KRAUS, K.; PFEIFER, N. **Determination of Terrain Models in Wooded Areas with Airborne Laser Scanner Data**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 53 (4), 1998. p. 193-203.

KRZYSZEK, P.; ACKERMANN, F. **New Investigations into the Practical Performance of Automatic DEM Generation**. Proc. ACSM/ASPRS Annual Convention, Charlotte, NC, v. 2, 1995. p. 488-500.

LOPES, J. M. B. **Cor e Luz**. Computação Gráfica. Disponível em <<http://www.ulbra.tche.br/~franzfigueroa/Cor.pdf>>, 2003. Acesso em: 11 out. 2005.

MAKAROVIC, B. **Digital Mono-Plotters**. I.T.C. Journal, v. 1, p. 101-122, 1973.

MÄNTYLÄ, M. **An Introduction to Solid Modeling**. Principles of Computer Science. Computer Science Press, Maryland, U.S.A., 1988.

MAYER, H. **Automatic Object Extraction from Aerial Imagery – A Survey Focusing on Buildings**. CVIU, v. 74, n. 2, 1999. p. 138-149.

MCINTOSH, K.; KRUPNIK, A. **Integration of Laser-Derived DSMs and Matched Image Edges for Generating an Accurate Surface Model**. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. v. 56, 2002. p. 167-176.

MELEN, T. **Geometrical Modelling and Calibration of Video Cameras for Underwater Navigation**. Trondheim, Noruega, 1994. Thesis (Philosophy Doctor). Norges Tekniske Hgskole, Institutt for Teknisk Kybernetikk.

MERCHANT, D. **Analytical Photogrammetry Theory and Practice Part I**. Department of Geodetic Science. The Ohio State University. Columbus, Ohio, 1979.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. John Wiley & Sons, Inc. New York, 2001.

MITISHITA, E. A. **Monorestituição Digital de Aerofotos, Associada com Sistema de Computação Gráfica C.A.D., para fins de Mapeamento na Área Florestal**. Curitiba, 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

MITISHITA, E. A.; OLIVAS, M. A. A. **Calibração de Câmaras Aerofotogramétricas a partir de Aerofotos Digitalizadas**. Boletim de Ciências Geodésicas, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2001, v. 7 (1), p. 64-76.

MITISHITA, E. A.; SILVA, V. F.; SIKORSKI, J. **Desenvolvimento de Técnicas de Mapeamento Fotogramétrico com Base em Imagens Digitais tomadas com Câmara de Vídeo e Helicóptero**. Série em Ciências Geodésicas, 30 Anos da Pós-Graduação em Ciências Geodésicas no Brasil, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2001, v. 1, p. 181-198.

MONIWA, H. **Analytical Photogrammetric System with Self-Calibration and its Applications**. Fredericton, N.B., 1977. Thesis (Doctor of Philosophy) – Department of Surveying Engineering – University of New Brunswick, 107p.

MÜLLER, H. **Experiences with Semiautomatic Building Extraction**. In: Third Course in Digital Photogrammetry, Bonn, Germany. Institute for Photogrammetry at Bonn University and Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, 1998.

PAPARODITIS, N.; MAILLET, G.; TAILLANDIER, F.; JIBRINI, H. JUNG, F.; GUIGUES, L.; BOLDO, D. **Multi-image 3D Feature and DSM Extraction for Change Detection and Building Reconstruction**. In: E. Baltsavias, A. Grun, and L. VanGool (eds), Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Satellite Images (III), Balkema Publishers, Netherlands, p. 217-230, 2001.

PAVLIDIS, T. **Algorithms for Graphics and Image Processing**. Computer Science Press, 1982. ISBN 0-914894-65-X.

PRATT, W. K. **Digital Image Processing**. Wiley Interscience, 2. ed., 1991.

PRESS, W. H.; FLANNERY, B. P.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T. **Numerical Recipes in Pascal Example Book**. Cambridge University Press, 1989. ISBN 0521376750.

RAMER, U. **An Iterative Procedure for the Polygonal Approximation of Plane Curves**. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, v. 1, p. 244-256, 1972.

REISS, M. L. **Restituição Fotogramétrica Flexível de Imagens à Curta Distância: Estudo de Métodos e Desenvolvimento de Protótipo**. Presidente Prudente, 2002. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação de Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista.

SAHAR, L.; KRUPNIK, A. **Semiautomatic Extraction of Building Outlines from Large-Scale Aerial Images**. PERS, v. 65, n. 4, 1999. p. 459-465.

SAHOO, P. K.; SOLTANI, S.; WONG, A. K. C. **A Survey of Thresholding Techniques**. Computer Vision, Graphics and Image Processing, v. 41, p. 233-260, 1988.

SCARBOROUGH, J. B. **Numerical Mathematical Analysis**. 4. ed. Baltimore: The Johns Hopkins Press, 1958.

SCHENK, T. **Digital Photogrammetry - Volume I**. TerraScience, Laurelville, Ohio, 1999, 428p.

SEUL, M.; O'GORMAN, L.; SAMMON, M. J. **Practical Algorithms for Image Analysis: Description, Examples, and Code**. Cambridge University Press, 2001. ISBN 0-521-66065-3.

SHUFELT, J. A. **Performance Evaluation and Analysis of Monocular Building Extraction from Aerial Imagery**. IEEE Transactions On PAMI, Vol. 21, N. 4, 1999. p. 311-326.

SILVERMAN, B. W. **Density Estimation for Statistics and Data Analysis**. London, Chapman and Hall, 1986.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985. 454p.

TASI – Technical Advisory Service for Images. **An Overview of Color Management**. Disponível em: <http://www.tasi.ac.uk/advice/managing/pdf/colour_manage.pdf>, 2004. Acesso em: 15 jul. 2005.

TOTH, C.; GREJNER-BRZEZINSKA, D. **Improved DEM Extraction Techniques – Combining LIDAR Data with Direct Digital GPS/INS Orientated Imagery**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. v. 32 (2-5-3/W10), 6A-4, 1999. p. 1-7.

VELLOSO, M. **Sobre os Sistemas de Cor e Outras Observações**. Disponível em: <http://www.mvelloso.trix.net/pdf/08_colorimetria_marcia.pdf>, 2004. Acesso em 29 set. 2005.

VOSSelman, G. **Building Reconstruction Using Planar Faces in Very High Density Height Data**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 32 (3-2W5), 1999. p. 87-92.

VOSSelman, G.; SUVEG, I. **Map Based Building Reconstruction from Laser Data and Images**. In: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Satellite Images (III), E. P. Baltsavias, A. Gruen, L. Van Gool, Eds., Lisse, The Netherlands: Swets & Zeitlinger Publishers, 2001. p. 231-239.

WAND, M. P.; JONES, M. **Kernel Smoothing**. Chapman & Hall, 1995.

WEEKS, A. R. **Fundamentals of Electronic Image Processing**. IEEE Press, New York, 1996.

WYSZECKI, G. **Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae**. Wiley, New York, 1982.

X-RITE. **The Color Guide and Glossary**. Disponível em: http://www.xrite.com/documents/literature/en/L11_029_color_guide_en.pdf. Acesso em: 03 set. 2004.