

# TRATAMENTO DE DADOS LASER PARA RECONHECIMENTO DE BORDAS DE EDIFICAÇÕES

Alvaro Muriel Lima Machado <sup>1</sup>  
Edson A. Mitishita <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Paraná – UFPR – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – [alvaroml@ufpr.br](mailto:alvaroml@ufpr.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Paraná – UFPR – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – [mitishita@ufpr.br](mailto:mitishita@ufpr.br)

## RESUMO

A automatização no reconhecimento de feições fotogramétricas beneficia diversas áreas do conhecimento humano, sendo buscada com afinco pelos pesquisadores. Dentre as feições destacam-se as edificações, responsáveis por uma grande participação em qualquer planejamento urbano. Mas, apesar dos inúmeros esforços, a automatização no traçado dos contornos de edificações ainda não tem uma alternativa completamente satisfatória. Este trabalho apresenta uma tentativa de conquista deste traçado automático, mais com objetivo de compreender adequadamente as dificuldades nos diferentes procedimentos inerentes ao processo. A área alvo do trabalho situa-se dentro do campus da Universidade Federal do Paraná, no Centro Politécnico, combinando o emprego de tecnologias recentes como câmara digital de pequeno formato e não métrica, na ponta do espaço imagem, e varreduras com sistema *laser scanning*, na ponta do espaço objeto. A imagem foi tomada pela câmara Sony DSC-F717, pré-calibrada, em um vôo com altitude aproximada de 1650m. O levantamento *laser scanning* da mesma região foi realizado com o sistema OPTECH / INS GPS APPLANIX, pertencente ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC - UFPR). O trabalho explora os dados fornecidos pelo sistema *laser scanning*, sem se aproveitar de forma alguma das informações fotogramétricas, exceto pela integração final com objetivo de visualização. O algoritmo de simplificação de poligonais de Douglas-Peucker é utilizado sobre os dados oriundos do sistema *laser scanning*, classificados conforme sua obtenção original (por faixas). Um filtro detector de bordas nada mais é que um detector de descontinuidades, neste caso de altitudes, identificando diferenças altimétricas relevantes, e é aplicado sobre as poligonais simplificadas, na mesma ordem da varredura. Contando-se com a orientação da imagem trabalhada, os pontos pertencentes às bordas das edificações são, então, projetados sobre a imagem, com intuito de verificação de resultados.

**Palavras-chave:** Laser Scanner, Detecção de Edificações, Câmaras Digitais.

## BUILDING OUTLINES DETECTION FROM LASER SCANNING DATA

### ABSTRACT

*Automatic recognition of photogrammetric features benefits many areas of human knowledge, constituting a great challenge for the researchers. Among the features, the buildings are highlighted because of his majority participation in any urban planning. But, in spite of the countless efforts, automatization in the tracing of building outlines does not yet have a completely satisfactory option. This paper presents an attempt of this automatic detection, with the great goal of understanding adequately the inherent difficulties of this process. The test area is localized in the region of the campus of the Federal University of Parana, at the Polytechnic Centre. This methodology fuses recent technologies as non-metric small format digital cameras, in the tip of the image space, and laser scanning system, in the tip of the object space. The image analyzed was taken by a pre-calibrated Sony DSC-F717 camera, in a flight near 1650m of altitude. The laser scanning of the same region was accomplished by an OPTECH/INS GPS APPLANIX Laser Scanning system, belonging to the Technology Institute for the Development (LACTEC – UFPR). This work explores the data supplied by the laser scanning system, without the use of any photogrammetric information, except by the final integration with visualization goal. The Douglas-Peucker polygonal simplification algorithm is used to derive relevant data from the laser data, classified as its original acquisition (in bands). An edge detector filter equals an altitude discontinuity detector, in this case, identifying important altimetric differences, and it is applied on the data of the simplified polygonal, in the same order of its acquisition (the sweeping). Starting with the full orientation of the*

*analyzed image, the outline building points detected are projected against the image, with the purpose of results verification.*

**Keywords:** *Laser Scanner, Building Detection, Digital Câmeras.*

## 1. INTRODUÇÃO

A automatização no reconhecimento de feições fotogramétricas beneficia diversas áreas do conhecimento humano, sendo buscada com afincos pelos pesquisadores. Dentre as feições destacam-se, como as de maior interesse, as edificações, responsáveis por uma grande participação em qualquer planejamento urbano. Mas, apesar dos inúmeros esforços, a automatização no traçado dos contornos de edificações ainda não tem uma alternativa completamente satisfatória.

Este trabalho apresenta uma investigação deste traçado automático, mais com objetivo de compreender adequadamente as dificuldades existentes nos diferentes procedimentos inerentes ao processo. A área alvo do trabalho situa-se dentro do campus da Universidade Federal do Paraná, no Centro Politécnico, combinando o emprego de tecnologias recentes como câmara digital de pequeno formato e não métrica, na ponta do espaço imagem, e varreduras com sistema *laser scanning*, na ponta do espaço objeto. A imagem foi tomada pela câmara Sony DSC-F717, pré-calibrada, em um vôo com altitude aproximada de 1650m. O levantamento *laser scanning* da mesma região foi realizado com o sistema OPTECH / INS GPS APPLANIX, pertencente ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC - UFPR).

O presente trabalho explora os dados fornecidos pelo sistema *laser scanning*, sem se aproveitar de forma alguma das informações fotogramétricas, exceto pela integração final com objetivo de visualização. A razão de ser desta estratégia é que as pesquisas com imagens encontram-se mais adiantadas, provavelmente devido à maior antiguidade dos trabalhos. Muito embora ainda seja um processo a ser aprimorado, vários métodos para segmentação de imagens são descritos em GONZALEZ e WOODS (2000), ROSENFELD e KAK (1982), HORD (1982), MASCARENHAS e VELASCO (1989), PAVLIDIS (1982) e podem ser empregados no desenvolvimento de ferramentas para extração de feições.

Já com os sistemas de *laser scanning*, as pesquisas são mais recentes, existindo grandes dificuldades no tratamento dos dados provenientes deste sistema. Existem poucas aplicações capazes de manusear modelos 3D complexos, existindo ainda uma lacuna na demonstração sobre a capacidade total de tais informações. Dada a enorme massa de dados fornecidos pelo sistema de *laser scanning*, e seguindo o exemplo de VANCO (2002), torna-se necessário o desenvolvimento de rotinas rápidas de identificação de vizinhanças.

Um dos procedimentos desenvolvidos viabiliza a tarefa de identificação de vizinhanças, de forma extremamente simples, através de super-células com posicionamento planimétrico. De forma similar à segmentação de dados, o objetivo almejado para o agrupamento de dados, em uma super-célula, é o de identificação de regiões distintas, cada uma com determinada característica homogênea que a diferencie de sua vizinhança. As regiões, neste trabalho, são definidas pelo conjunto de pontos vizinhos planimetricamente, sendo que nenhum ponto pode pertencer a mais que uma região.

Buscando-se uma estratégia popular e de fácil implementação para a detecção de descontinuidades no Modelo Digital de Superfície (DSM), optou-se pelo algoritmo de simplificação de poligonais de Douglas-Peucker, utilizando-o sobre os dados oriundos do sistema *laser scanning*, classificados conforme sua obtenção original (por faixas). Este algoritmo diminuiu substancialmente os pontos de uma faixa, restando somente os essenciais, dentro do limiar de distância usado. Verifica-se que a simplificação de poligonais salienta os pontos de borda, facilitando a filtragem detectora de bordas posterior. Contando-se com a orientação da imagem trabalhada, os pontos pertencentes às bordas das edificações são, então, projetados sobre a imagem, com intuito de verificação dos resultados.

## 2. METODOLOGIA

Para a consecução dos objetivos selecionou-se uma imagem dentro de um bloco de imagens tomadas com a câmara digital Sony DSC-F717 de pequeno formato, não métrica, de propriedade da Agritec. A câmara apresenta resolução de 5,2Mb, com CCD de dimensões 2560 x 1920 pixels. O vôo, para a tomada das fotos, foi realizado no dia 27/06/2003, por volta das 14h30, sobre o campus da Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, a uma altura aproximada de 1650m, e recobrimo uma área aproximada de 1km<sup>2</sup>. A imagem selecionada, apresentada na figura 1, apresenta várias edificações, campos e árvores, além de pontos de controle pré-sinalizados, sendo identificada como DSC04197.JPG.

O levantamento *laser scanner* da mesma região do Centro Politécnico foi realizado com o sistema OPTECH / INS GPS APPLANIX, pertencente ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento

(LACTEC - UFPR). O LACTEC disponibilizou um arquivo contendo as coordenadas X, Y, Z, e a intensidade do primeiro pulso refletido, outro arquivo com idêntico conteúdo referente ao último pulso refletido, e mais uma imagem de intensidade, em formato TIF, obtida por interpolação (grade regular com 0,40m de espaçamento). O levantamento *laser scanner* cobriu uma área de 7,2 km<sup>2</sup>.



Figura 1: Imagem DSC04197.JPG

A câmara digital empregada, de propriedade da empresa Agritec, foi calibrada por MACHADO et al. (2003), em três oportunidades (25/02/2003, 10/03/2003, 01/04/2003). Os parâmetros da última calibração (mais recente) são mostrados no quadro 1, sendo utilizados neste trabalho.

Quadro 1: Parâmetros de calibração da câmara digital, em pixels (Fonte: MACHADO, 2003)

Câmara	DSC-F717
Resolução	2560x1920
Dimensões do CCD	8,8mm X 6,6mm
c	10,070 mm
x0	-0,241 mm
y0	-0,148 mm
k1	-2,19176077E-03 mm <sup>-2</sup>
k2	2,61966735E-05 mm <sup>-4</sup>
k3	0,000 mm <sup>-6</sup>
P1	-1,12278699E-04 mm <sup>-1</sup>
P2	5,67626757E-05 mm <sup>-1</sup>

c = distância focal, em pixels;

x0, y0 = coordenadas do ponto principal, em pixels;

k1, k2, k3 = parâmetros de correção de distorção radial;

P1, P2 = parâmetros de correção de distorção descentrada.

Para a continuidade dos trabalhos executou-se as orientações interior e exterior da imagem selecionada, com objetivo de interligação com os pontos 3D provenientes do laser scanner.

O manuseio da massa de dados 3D dos pontos gerados pela varredura do laser scanner requer cuidado especial no que se refere à estrutura de dados utilizada para sua operação. Isto ocorre devido ao grande volume de informações existentes, com conseqüente necessidade de rapidez para seu acesso. A estrutura de dados utilizada é detalhada no item 2.2, seguindo-se pela explanação sobre o algoritmo empregado para a segmentação dos contornos das edificações.

## 2.1. ORIENTAÇÕES INTERIOR E EXTERIOR

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. A imagem digital, tomada pela câmara Sony DSC-F717, apresenta dimensões de 2560 por 1920 pixels. Como não existem marcas fiduciais, assumiu-se um centro fiducial, origem do referencial fiducial, situado exatamente no centro geométrico da imagem.

Utilizou-se o programa Adobe Photoshop para a realização de leituras de coordenadas de pontos na imagem. Este programa considera, após seleção de preferências de sistema de coordenadas em pixels, a origem no canto superior esquerdo da imagem no pixel com coordenadas 0,0. Por conseguinte o pixel no canto inferior direito será o pixel com coordenadas 2559, 1919.

A transformação afim geral no plano, responsável pela mudança de coordenadas entre o referencial de imagem e o referencial fiducial, tem seus parâmetros determinados sem nenhum ajustamento, pois se trata de uma mera conversão matemática de coordenadas, não existindo a necessidade de observações de pontos para tal finalidade.

A transformação afim geral no plano tem a forma

$$\begin{aligned}x_f &= a_1 * Col_i + a_2 * Lin_i + a_3 \\y_f &= b_1 * Col_i + b_2 * Lin_i + b_3\end{aligned}\quad (01)$$

onde  $x_f$  e  $y_f$  são as novas coordenadas das observações realizadas, no sistema fiducial;  $Col_i$  e  $Lin_i$  representam as colunas e linhas respectivamente, ou sejam, as coordenadas de imagem das observações;  $a_i$  e  $b_i$  são os parâmetros da transformação. Observe-se que  $0,0034375 \text{ mm/pixel} = 8,8\text{mm}/2560\text{pixels} = 6,6\text{mm}/1920\text{pixels}$ . Os parâmetros são

$$\begin{aligned}a_1 &= 0,0034375; a_2 = 0; a_3 = -\left(\frac{2560-1}{2}\right) * 0,0034375 \\b_1 &= 0; b_2 = -0,0034375; b_3 = \left(\frac{1920-1}{2}\right) * 0,0034375\end{aligned}\quad (02)$$

e a transformação afim geral no plano, para conversão de coordenadas de imagem para o referencial fiducial, é expressa pelas equações

$$\begin{aligned}x_f &= 0,0034375 * Col_i - 4,39828125 \\y_f &= -0,0034375 * Lin_i + 3,29828125\end{aligned}\quad (03)$$

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.

$$\begin{bmatrix}x_{err} \\y_{err}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}x_f \\y_f\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}x_o \\y_o\end{bmatrix}\quad (04)$$

onde  $x_{err}$  e  $y_{err}$  representam as coordenadas fotogramétricas de observações transladadas do ponto fiducial para o centro de perspectiva (Ver ANDRADE, 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 ( $k_1, k_2, k_3$ ), e da distorção descentrada ( $P_1, P_2$ ). O modelo matemático empregado para as correções destes erros sistemáticos é amplamente difundido na literatura:

$$\begin{bmatrix}x_{corr} \\y_{corr}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}x_{err} \\y_{err}\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\delta_{xr} \\ \delta_{yr}\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\delta_{xd} \\ \delta_{yd}\end{bmatrix}\quad (05)$$

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

As correções da equação (05) são calculadas através de:

$$\delta_{xr} = (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \cdot x_{err}$$

$$\delta_{yr} = (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \cdot y_{err}$$
(06)

$$\delta_{xd} = P_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot x_{err}^2) + 2 \cdot P_2 \cdot x_{err} \cdot y_{err}$$

$$\delta_{yd} = P_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot y_{err}^2) + 2 \cdot P_1 \cdot x_{err} \cdot y_{err}$$
(07)

onde

$\delta_{xr}$  e  $\delta_{yr}$  = componentes x e y da distorção radial simétrica;

$\delta_{xd}$  e  $\delta_{yd}$  = componentes x e y da distorção descentrada;

$r = \sqrt{x_{err}^2 + y_{err}^2}$  = distância do ponto de coordenadas  $x_{err}$  e  $y_{err}$  ao ponto principal.

Um aspecto muito importante que se deve chamar a atenção é o de que todas as duas 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 duas 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.

Para a realização da orientação exterior observaram-se 16 pontos relativamente bem distribuídos por toda a imagem e de fácil observação, quer na imagem de intensidade dos pontos *laser scanner*, quer na fotografia. A observação foi feita utilizando-se o programa Envi 3.4.

Procurando-se eliminar os erros contidos na imagem de intensidade, devido à sua geração por interpolação, buscou-se no conjunto de pontos, do arquivo de último pulso do *laser scanner*, os vizinhos mais próximos dos pontos observados. A altitude Z também foi armazenada. Os resultados aparecem no quadro 2.

Quadro 2: Vizinhos mais próximos aos observados

Ponto	E(m)	N(m)	Z(m)	Coluna	Linha
1	677.386,95	7.183.641,43	908,19	1264,25	132,75
2	677.372,25	7.183.603,91	909,19	1148,50	20,50
3	677.471,42	7.183.996,41	911,56	2409,00	943,00
4	677.440,79	7.183.986,15	907,39	2404,00	814,00
5	677.450,17	7.183.883,07	914,95	2033,00	700,25
6	677.438,69	7.183.854,49	914,71	1958,00	622,00
7	677.722,75	7.183.706,03	914,55	1010,00	1443,75
8	677.729,38	7.183.696,88	920,16	964,00	1456,50
9	677.595,13	7.183.572,40	914,33	712,75	771,00
10	677.386,37	7.183.866,33	905,56	2065,25	451,00
11	677.492,82	7.183.818,05	913,65	1755,50	760,00
12	677.335,81	7.183.897,92	900,24	2244,00	322,00
13	677.293,77	7.183.914,33	900,27	2356,50	204,00
14	677.765,49	7.183.623,88	918,42	648,75	1474,25
15	677.534,94	7.183.370,31	917,54	81,00	275,00
16	677.867,26	7.183.528,78	923,33	172,50	1684,50

A ponderação do sistema de equações advém das precisões dos pontos fotogramétricos observados (utilizou-se 1 pixel) e das precisões das coordenadas dos pontos de apoio (utilizou-se 0,5m). A convergência do sistema, composto pelas equações de colinearidade, mais equações de inunção de posição de todos os 16 pontos, e resolvido pelo método paramétrico, foi rápida, com apenas 8 iterações. Os resultados obtidos para os parâmetros de orientação exterior se encontram listados no quadro 3.

Quadro 3: Parâmetros da imagem com suas precisões

Kappa	1,9509416196 ± 0,0015069891
Phi	-0,0286298258 ± 0,0088711161
Omega	-0,0034786766 ± 0,0072393140
Xo (m)	677.579,5705044278 ± 6,8663196159
Yo (m)	7.183.714,5781560660 ± 5,6388191020
Zo (m)	1.654,2029529593 ± 1,2145833269

## 2.2. ESTRUTURA DE DADOS DAS COORDENADAS DOS PONTOS

A formidável massa de dados das coordenadas 3D dos pontos gerados pelo sistema *laser scanner* precisa ser acessada rapidamente, tendo em vista a repetitividade de busca dos pontos nos algoritmos. Para se superar esta dificuldade, dividiu-se a informação dos pontos em agrupamentos de pontos espacialmente vizinhos. Para o presente caso, em que os pontos foram obtidos através de uma seleção prévia por área, os limites estipulados para todos os pontos foram (677.473, 7.183.313), (677.222, 7.183.946), (677.696, 7.184.143), e (677.955, 7.183.501). Para se agrupar, os intervalos delimitados pelos limites mínimo e máximo de abcissas (677.222 e 677.955), e pelos limites mínimo e máximo de ordenadas (7.183.313 e 7.184.143), foram divididos em 100 partes cada um, totalizando 100x100 agrupamentos de pontos espacialmente vizinhos. Conseqüentemente, as 100 subdivisões nas abcissas medem 7,33m cada uma, e as 100 subdivisões nas ordenadas medem 8,30m cada uma, determinando uma área de  $7,33 \times 8,30 = 60,839\text{m}^2$  por agrupamento, com uma média de  $981.462/10000 = 98,15$  pontos por agrupamento (“cluster”). Está claro que se poderia empregar outra quantidade de agrupamentos, diferente de 100x100, mas é o que foi utilizado neste trabalho.

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

$$\begin{aligned}\Delta_x &= (E_{M\acute{a}x} - E_{M\acute{i}n}) / K_x \\ \Delta_y &= (N_{M\acute{a}x} - N_{M\acute{i}n}) / K_y\end{aligned}\quad (08)$$

onde  $E_{M\acute{a}x}$ ,  $E_{M\acute{i}n}$ ,  $N_{M\acute{a}x}$ ,  $N_{M\acute{i}n}$  representam respectivamente as abcissas máxima e mínima, e ordenadas máxima e mínima do conjunto de pontos estudado.  $K_x$  e  $K_y$  representam respectivamente 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 (iguais a 100).

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. Se ainda houver necessidade de melhorias pode-se empregar algoritmos velozes de classificação encontrados na literatura de informática, o que não foi feito no presente caso.

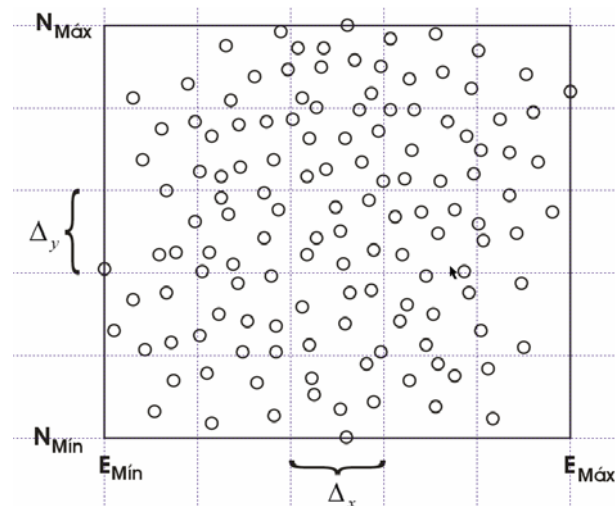


Figura 2: Agrupamento de pontos (nesta figura  $K_x = K_y = 5$ )

Para se saber a identificação do grupo, ao qual um determinado ponto pertence, é fácil

$$\begin{aligned}C &= \text{Trunc}((X - E_{M\acute{i}n}) / \Delta_x) + 1 \\ L &= \text{Trunc}((Y - N_{M\acute{i}n}) / \Delta_y) + 1\end{aligned}\quad (09)$$

onde  $C$ ,  $L$  definem a coluna e a linha da grade (neste caso um número que varia de 1 a 100);  $\text{Trunc}$  é uma função que converte números reais para números inteiros (função necessária conforme a linguagem de programação utilizada);  $X$  e  $Y$  representam a abcissa e a ordenada (coordenadas planimétricas) do ponto analisado;  $E_{M\acute{i}n}$  e  $N_{M\acute{i}n}$  são respectivamente a abcissa mínima e ordenada mínima do conjunto de pontos estudado (os mesmos empregados na equação anterior);  $\Delta_x$  e  $\Delta_y$  são os tamanhos dos

intervalos, conforme definidos na equação anterior. Está claro 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 abordagem simples necessita de apenas 8 bytes (dois números inteiros com 4 bytes cada) vezes 100x100 agrupamentos (quantidade de agrupamentos adotado), 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 *laser scanner*. A figura 2 ilustra a abordagem empregada. Qualquer pesquisa que precise ser feita usa um agrupamento central (o agrupamento do ponto de referência, determinado a partir de suas coordenadas planimétricas) e, eventualmente, no máximo mais 8 agrupamentos vizinhos ao agrupamento central mencionado.

Para melhorar ainda mais o acesso a todos estes pontos, pode-se armazenar todos eles na memória principal do computador. Esta sistemática utiliza, aproximadamente, 1.000.000 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.

### 2.3. DETECÇÃO DE BORDAS

Os dados provenientes da varredura a *laser*, em sua seqüência original, vêm na mesma ordem em que são coletados, por faixas, varrendo o terreno uniformemente em formato zig-zag. Entendido isto, fez-se uma simplificação utilizando-se o algoritmo de DOUGLAS e PEUCKER (1973), originalmente DUDA e HART (1973), analisando todos os pontos existentes segundo sua seqüência original. O objetivo é o de destacar os pontos mais importantes, na mesma ordem em que eles são coletados. O resultado deste algoritmo é aclamado pela literatura como sendo o que mais respeita as características das linhas cartográficas.

Para se usar o algoritmo Douglas-Peucker (função de duas variáveis) empregou-se a distância espacial (três dimensões) entre os pontos considerados como uma das variáveis. A outra variável ficou sendo a distância do ponto analisado à reta no espaço. Esta caracterização cria um tubo cilíndrico no espaço unindo os pontos relevantes da varredura a *laser*. O limiar utilizado foi de 0,25m, garantindo um diâmetro de tubo de 0,5m (2 x 0,25m).

Baseando-se na imagem de intensidade georeferenciada do *laser scanner*, e utilizando-se o programa ENVI 3.4, obteve-se as coordenadas aproximadas dos cantos limites da imagem escolhida, expressas no sistema SAD-69. As coordenadas aproximadas dos cantos, observados no sentido horário, começando-se pelo canto superior esquerdo, foram: (677.473, 7.183.313), (677.222, 7.183.946), (677.696, 7.184.143), e (677.955, 7.183.501). A partir destas coordenadas, e através de um programa desenvolvido, efetuou-se um corte na nuvem de pontos fornecidos pelo *laser scanner*. O arquivo utilizado foi o do último pulso, tendo em vista que representa melhor a superfície desejada, isto é, elimina tanto quanto possível as árvores. O arquivo do último pulso, contendo inicialmente 8.152.920 pontos, ficou no final com 981.462 pontos (coordenadas 3D), permitindo melhor manuseio da informação. A área recortada, segundo as coordenadas acima, é de 353.812,5m<sup>2</sup>, obtido através da fórmula geral

$$\text{Área} = \frac{\sum_{i=1}^4 (x_i \cdot y_{i+1} - x_{i+1} \cdot y_i)}{2}, \text{ fazendo-se } x_5 = x_1 \text{ e } y_5 = y_1. \quad (10)$$

Com esta área pode-se calcular a densidade de pixels por m<sup>2</sup>, resultando:

imagem (2560 x 1920 pixels)	13,89 pixels/m <sup>2</sup>
laser scanner (981.462 pontos)	2,77 pontos/ m <sup>2</sup>

Estes resultados demonstram que a densidade de pixels por metro quadrado é maior na imagem, indicando a viabilidade de melhoria da acurácia dos dados laser utilizando feições nas imagens.

A aplicação do algoritmo de simplificação de poligonais foi realizada por faixas, conforme a ordem de fornecimento dos pontos laser scanner, uma faixa de cada vez. Muito embora nem todas as faixas contivessem pontos em quantidade substancial, na região da imagem estudada, todas as faixas foram processadas com a intenção de coletar a maior quantidade possível de pontos para a parte final dos algoritmos.

Para a detecção de bordas empregou-se um algoritmo simples que resultou bastante eficaz e eficiente. O algoritmo pode ser utilizado antes ou depois da simplificação de poligonais de Douglas-Peucker. O princípio básico é o de separar todo ponto que apresente diferença de altitude para maior (adotou-se 2m) com relação aos seus vizinhos, quer o vizinho anterior, quer o posterior. Tendo em vista esta estratégia escolhida, a quantidade de vizinhos e ordem (anterior e posterior), o processamento deve ser realizado sobre os dados originais, com a ordem de varredura ou de coleta dos pontos oriundos do laser preservada.

Quadro 4: Douglas-Peucker, por faixa, com limiar = 0,25m

Faixas	Total de Pontos	Área Escolhida	Bordas (2m)	Douglas-Peucker (0,25m)	Bordas (2m)após Douglas-Peucker
1	1226470	42817	174	2835	195
2	1200023	203519	10578	41628	11144
3	1208854	465103	32530	129097	34774
4	1169379	187526	13965	56840	14455
5	1084890	11426	276	989	286
6	1421815	486945	35543	139000	37293

O quadro 4 mostra a quantidade de pontos obtidos no processo. Como pode ser observado, a aplicação do algoritmo de Douglas-Peucker, previamente, melhora a quantidade de pontos detectados como borda, em todas as faixas processadas. Tal fato se dá provavelmente pelo destaque de pontos, mais especificamente nas bordas, onde o algoritmo de simplificação de poligonais é capaz de remover algum ponto intermediário (seja como exemplo um eco da parede lateral de uma edificação), fazendo eventualmente com que um ponto de borda que não fosse detectável pelo limiar de 2m, passe a ser detectado.

Os pontos obtidos após o processo de simplificação de poligonais de Douglas-Peucker ainda não se mostram adequados para a visualização, tendo em vista que existem muitos ruídos, principalmente em regiões com vegetação. Nestas regiões ocorrem muitos pontos que são entendidos como bordas, segundo as rotinas executadas até aqui. O sistema de *laser scanning* detecta pontos no topo das árvores e também no solo, não sendo diferenciados pelo pré-processamento dos dados, porque ocorrem em regiões próximas, mas não no mesmo ponto.

Na tentativa de se eliminar os pontos nas vegetações, sem a exclusão dos pontos nas bordas das edificações, concebeu-se um filtro que deixa passar, preferencialmente, somente os pontos mais ou menos alinhados, segundo uma direção qualquer, com os seus vizinhos.

O procedimento é aplicado para todos os pontos de bordas detectados, unindo-se todos os arquivos de faixas, previamente, com o objetivo de adensar os pontos. Os pontos processados e conectados a algum segmento de reta são marcados, evitando sua reutilização. Então, para todo ponto procura-se seus vizinhos, utilizando-se de um expediente simples para a identificação do próximo ponto a ser conectado ao segmento. Seleciona-se o ponto a ser interligado como sendo aquele que apresenta a maior razão entre a sua distância (provável ponto a ser conectado) ao primeiro ponto do segmento, e a somatória das distâncias entre os diversos pontos do segmento. Evidentemente não se pode esquecer também de controlar a altitude dos pontos conectados, devendo se situar em um limiar pequeno, ou seja, de mesma altitude aproximada.

## 2.4. VISUALIZAÇÃO FINAL DAS BORDAS DETECTADAS

A partir das bordas detectadas pelos processos anteriores, e com a orientação da imagem selecionada obtida, aplicam-se os procedimentos fotogramétricos usuais para a visualização destes pontos sobre a imagem trabalhada. Estes procedimentos englobam as equações de colinearidade, a partir de um ponto com coordenadas 3D conhecidas no espaço objeto, determinando-se coordenadas bidimensionais no sistema fotogramétrico. Estas coordenadas, para se constituírem em coordenadas de imagem, necessitam a introdução dos erros sistemáticos existentes na imagem selecionada, e conhecidos por consequência da calibração da câmara digital.

As figuras 3 e 4 apresentam parte de área da imagem original com os pontos oriundos do laser projetados sobre a mesma, verificando-se claramente as bordas das edificações detectadas. Infelizmente existem ainda muitos pontos de vegetação não eliminados de todo. O que se observa ainda, é o efeito indesejável que, ao se filtrar as vegetações, alguns pontos bordas de edificações desaparecem simultaneamente.

Esta pesquisa pode continuar, tendo em vista a não utilização das informações fotogramétricas para a etapa de refinamento, consistindo nos demais processos necessários à extração (detecção de contorno, afinamento, rotulação, ajustamento). O refinamento é responsável pela determinação dos melhores pixels que representem as feições.



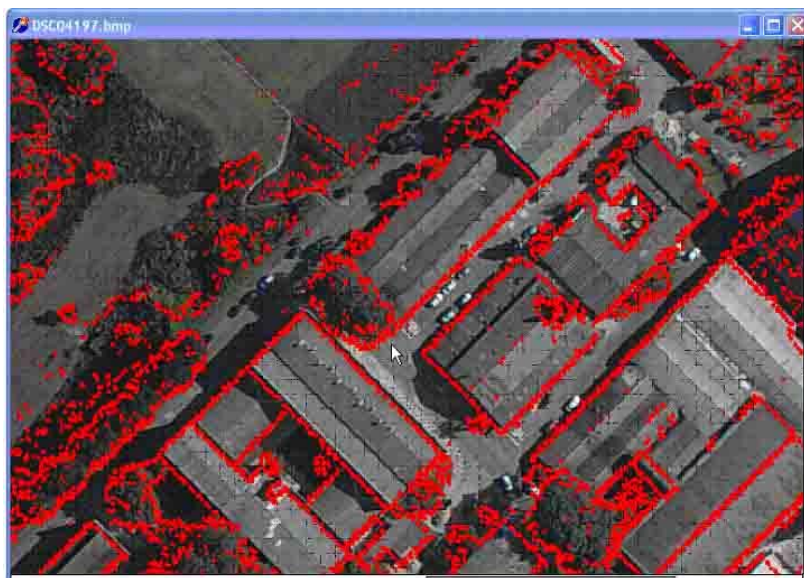


Figura 3: Prédios do Centro Politécnico com pontos de bordas de edificações detectados

Segundo GATO (2000), após a segmentação de uma imagem ou região, é necessário classificar os dados obtidos segundo uma estrutura adequada para que o processo de extração de feições seja concluído. Uma das formas de se realizar essa tarefa é pelo processo de conexão, responsável pela interligação de todos os pixels pertencentes a uma mesma borda, constituindo, assim, uma única feição.

A transformada de Hough tem se constituído em uma ferramenta de uso comum em Visão Artificial, desde a última década. Esta transformada permite a localização de formas parametrizáveis como linhas, círculos, elipses, etc, em imagens digitais. Outros algoritmos de conexão existentes, mais focalizados no espaço imagem, são o método de varredura e rotulação ZHOU et al. (1989), e TOMMASELLI (1999). No espaço objeto, com os dados laser, o cálculo das componentes principais tem sido empregado para se distinguir a direção das bordas, como em VANCO (2002).

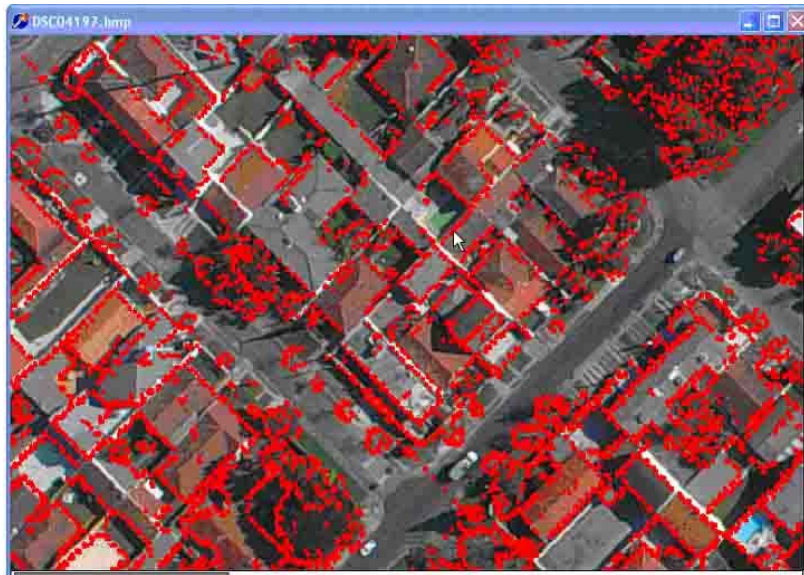


Figura 4: Pontos de bordas em área urbana

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo empregado tem como vantagem a rapidez, não se abalando com a quantidade de pontos processados. Mais ainda, vai executando uma filtragem passo a passo, garantindo cada vez menos pontos para as etapas consecutivas. A abordagem utilizada foi a de detecção de bordas, sem crescimento de regiões, nem triangulações de Delaunay. Sabe-se que existe grande restrição contra os métodos baseados em Voronoi/Delaunay, principalmente porque eles são lentos e, com os recursos atuais de computação, encontram dificuldades no manuseio de grandes quantidades de pontos, sem falar na suscetibilidade a erros numéricos.

Os resultados podem ser considerados bons. O tratamento dos dados laser foi excelente, garantindo rapidez e eficiência no processamento, tudo à custa de estruturas de dados relativamente simples. Os pontos laser detectados identificam as bordas das edificações. Todas as edificações foram contempladas. O problema é que nem só edificações apareceram, que é o caso das vegetações.

Um aspecto importante a ser considerado é que todos os algoritmos empregados trabalharam sobre a base de dados laser, isto é, no espaço objeto, sem consideração de espécie alguma no espaço imagem. A imagem digital serviu apenas para a visualização do processo adotado, com seus resultados.

Pode-se continuar com a pesquisa, detectando-se feições no espaço imagem, e relacionando-se com as obtidas no espaço objeto. Em defesa desta abordagem pode-se dizer que a vista humana trabalha como um *range finder*, identificando a profundidade dos objetos observados, mas também trabalha como uma câmara digital colorida, com a percepção das cores do universo. O processamento no cérebro efetua os relacionamentos necessários, existindo grande dificuldade na compreensão detalhada deste mecanismo de forma que se possa convertê-lo em rotinas computacionais.

As imagens, embora tomadas por câmara digital não métrica, podem contribuir enormemente para a melhoria da qualidade dos pontos de borda detectados pelo sistema de *laser scanning*. Esta conclusão advém da densidade de pixels (quantidade de pixels por metro quadrado) que é cerca de seis vezes maior nas imagens, propiciando melhor identificação. A calibração da câmara digital permite a correção da maior parte das distorções fotogramétricas, disponibilizando sua utilização sem restrições. A fusão dos pontos detectados no espaço objeto, com as feições vistas nas imagens, é plenamente satisfatória.

Várias ferramentas de manipulação dos dados oriundos do *laser* foram geradas, nem todas comentadas aqui devido à natureza de rotinas auxiliares. Estratégias amplamente empregadas na literatura, como grafos, foram de certa forma aplicadas neste trabalho, muito embora não de forma explícita. A triangulação de Delaunay não foi utilizada, não havendo impacto negativo na produção dos algoritmos. Entretanto ainda é cedo para se afirmar que se pode prescindir totalmente da triangulação de Delaunay.

Como recomendação para a melhoria deste trabalho pode-se colocar a implementação de algoritmos de conexão das bordas detectadas. Uma técnica bastante interessante consiste na determinação dos autovalores e autovetores de uma vizinhança, com o objetivo de avaliar a direção geral de um conjunto de pontos. Se houver bastante diferença entre os autovalores, com um porcentual elevado para a primeira componente principal, isto significa que a direção dos pontos de borda é quase uniforme, indicando uma grande possibilidade de se ter um segmento de reta, que pode ser traduzido para um contorno de edificação. Este fato não se observa nas vegetações.

Outra recomendação importante, de domínio conquistado, é a implementação de ajustamento de reta aos pontos detectados como bordas. Trata-se de selecionar a melhor reta que passa pelos pontos de borda. Esta etapa conclui com a determinação da intercessão dos segmentos de retas ajustados, objetivando-se a definição real dos contornos das edificações.

#### 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, J. BITTENCOURT; OLIVAS, MARY A. AZEVEDO. **Calibração de Câmaras Aerofotogramétricas**. Boletim da UFPR, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, N°26, p.01-39, Curitiba, 1981.
- 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 10(2), p. 112-122, 1973.
- DUDA, R.; HART, P. **Pattern Classification and Scene Analysis**. John Wiley & Sons, New York, 1973.
- GATO, H. E. R. **Uma Abordagem Semi-Automática para Extração de Feições por Crescimento de Regiões em Imagens Digitais**. Presidente Prudente, 2000. 91p. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas. FCT-Unesp, 2000.
- GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E. **Processamento de Imagens Digitais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.
- HORD, R. M. **Digital Image Processing of Remotely Sense Data**. New York: Academic Press, 1982.
- MACHADO, ALVARO M.L. et al. **Verificação da Estabilidade Geométrica dos Parâmetros de Calibração de uma Câmara Digital de Pequeno Formato SONY DSC-F717**. Série em Ciências Geodésicas, Novos Desenvolvimentos em Ciências Geodésicas, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003, Vol. 3, pp.292-309.
- MASCARENHAS, N. A.; VELASCO, F. R. D. **Processamento de Imagens**. 2.ed. São José dos Campos: MCT-INPE, 1989.
- PAVLIDIS, T. **Algorithms for Graphics and Image Processing**. Rockville: Computer Science Press, 1982.
- ROSENFELD, A.; KAK, A. C. **Digital Picture Processing**. 2.ed. London: Academic Press, 1982.
- TOMMASELLI, A. M. G. **Extração Automática de Feições Lineares em Imagens Digitais para Aplicações Cartográficas**. Relatório de bolsa de produtividade em pesquisa CNPQ, p.41, 1999.

VANCO, M. **A Direct Approach for the Segmentation of Unorganized Points and Recognition of Simple Algebraic Surfaces**. Tese de Doutorado, University of Technology Chemnitz, 2002.

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