

# Identificação e reconstrução 3D de objectos numa malha urbana através de nuvens de pontos georeferenciados

Rodrigo Garcia<sup>1</sup>, Mauro Farracha<sup>1</sup>, José Dionísio<sup>2</sup>, Alexandre Bernardino<sup>3</sup>, João Paulo Costeira<sup>3</sup>

Instituto de Sistemas e Robótica<sup>1,3</sup>, IDMEC<sup>2</sup>

Instituto Superior Técnico

Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa

{rjsdg,mdfa}@mega.ist.utl.pt<sup>1</sup>, jdionisio@ist.utl.pt<sup>2</sup>, {alex,jpc}@isr.ist.utl.pt<sup>3</sup>

---

## Resumo

*Este artigo descreve algumas técnicas utilizadas no âmbito da detecção e reconstrução tridimensional de objectos numa malha urbana através de uma nuvem de pontos georeferenciados. Os dados de entrada foram obtidos através de varrimento laser sobre a baixa da cidade de Lisboa e são apresentados numa malha rectangular de 1m<sup>2</sup>. Dada a especificidade dos dados, o trabalho desenvolvido focou primordialmente a detecção de objectos a partir da construção do DSM (Digital Surface Model). Uma vez determinados os limites dos objectos (maioritariamente edifícios), através da estimação de parâmetros característicos, como por exemplo o gradiente de altura, foi gerado o pipeline de reconstrução dos mesmos e consequente processamento tendo em vista a sua visualização em ambientes virtuais interactivos.*

## Palavras Chave

*Varrimento Laser, DSM, Crescimento de Regiões, “Best Fit Ellipse”, Reconstrução 3D, Ambientes Virtuais Interactivos, Visualização em tempo real*

---

## 1. INTRODUÇÃO

Durante os últimos anos, o aumento da necessidade de projecto e planeamento de áreas urbanas e a sua consequente actualização, levou a esforços de investigação com o objectivo de construir ferramentas automáticas ou semi-automáticas para a aquisição e validação de dados cadastrais. Uma das áreas com interesse nestas ferramentas é por exemplo a do Urbanismo, que pretende saber o que na realidade existe em determinado espaço urbano e qual o impacte que poderia ter uma modificação neste [9].

A automação da criação de modelos de cidades, requeridos por muitos utilizadores de sistemas de informação geográfica, juntamente com os levantamentos da componente fotométrica, permitiu nos últimos anos, a validação de algoritmos para aproximações 3D, como por exemplo, o agrupamento de características retiradas pela análise de múltiplas imagens aéreas de pontos com informação sobre o solo. Devido à sua vantagem como uma técnica activa para a determinação de pontos 3D, o varrimento laser aéreo tornou-se assim uma fonte de informação importante para a criação de modelos altimétricos complexos.

É neste contexto que se descreve o trabalho realizado, no sentido de desenvolver uma metodologia de análise deste tipo de dados e que proporcione a reconstrução de uma cena virtual 3D com capacidade de edição interactiva, visualização fotorealista e navegação em tempo real.

## 2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema a resolver consiste em diversas fases sequenciais fundamentais: em primeiro lugar a construção de um *pipeline* que permita avaliar, identificar, segmentar e visualizar um cenário 3D que melhor represente a área urbana correspondente aos dados recolhidos a partir de dados altimétricos do solo, obtidos por varrimento laser. Finalmente, uma vez obtido o novo modelo, pretende-se desenvolver uma aplicação que permita a sua comparação com modelos previamente existentes, quer sejam 2D (áreas de implantação) ou 3D *bounding boxes* com os valores de cêrcea).

## 3. ESTADO DE ARTE

Exposto o problema, realizou-se uma pesquisa para analisar com maior profundidade o trabalho já desenvolvido nesta área. De entre os vários métodos que

abordaram o problema da detecção e reconstrução de objectos a partir de pontos altimétricos, destacam-se um par de contribuições pela sua complementar abordagem.

Antes de mais, uma ressalva para explicitar as siglas DSM (*Digital Surface Model*) e DTM (*Digital Terrain Model*). O DSM, ou modelo digital da superfície, é a representação para os pontos originais obtidos a partir de varrimento laser, é indexado por  $x$  e  $y$  contendo os valores em  $z$  para cada par  $(x,y)$  (Fig. 1). Pode ver-se que as áreas com um tom mais claro são os pontos com altura maior. O DTM tem o mesmo esquema de representação do DSM mas corresponde ao modelo digital da elevação do terreno do DSM.



Fig. 1: Exemplo de um DSM representado em tons de cinzento

Em relação ao levantamento bibliográfico efectuado, foram escolhidas como referência inicial os trabalhos de *Ansgar Brunn* e *Uwe Weidner* 1998 [8], por serem frequentemente citados, terem desenvolvido trabalho relevante e recente, e baseado em princípios básicos de processamento de DSMs (*Digital Surface Models*) e DTMs (*Digital Terrain Models*). A forma como descreveram a sua investigação pode subdividir-se nas três fases convencionais, como de seguida se apresenta:

- detecção de características padrão (DSM)
- segmentação do domínio (DSM)
- reconstrução 2D e 3D

mas os métodos utilizados em cada fase demonstram pressupostos diferentes.

Em primeiro lugar, geram o DSM normalizado consistindo na diferença entre o DTM e DSM da mesma área urbana. Se imaginarmos uma área urbana contendo edifícios no vale e no pico de uma montanha, e se gerarmos o DSM normalizado, então o valor da elevação da montanha será retirada e os edifícios encontrar-se-ão, conseqüentemente, ao mesmo nível. Este processo facilita o processamento da fase seguinte, a segmentação.

A mesma equipa realizou uma segmentação binária relativamente à altura, obtendo assim os objectos com altura significativa utilizando um "threshold" (Fig. 2). Desta segmentação vários segmentos são escolhidos como possíveis representações de edifícios (segmentos baseados em altura local). O problema desta escolha é o

facto de existir vegetação e que influencia negativamente a segmentação dos edifícios. A solução adoptada passou por calcular a rugosidade da superfície através da variância das normais à superfície, grau de curvatura local a um ponto e gradientes (Fig. 3). As áreas detectadas são isoladas e são subtraídas ao DSM normalizado (Fig. 4).



Fig. 2: Resultado da segmentação do DSM da Fig. 1



Fig. 3: Segmentação após o cálculo das rugosidades do DSM



Fig. 4: Aspecto visual do mapa de diferenças

Agora a segmentação binária descrita pode ser realizada novamente e todos os segmentos são fidedignos aquando da sua selecção para descreverem edifícios. O problema desta segmentação é efectivamente a utilização de um "threshold" fixo já que obriga a um processo iterativo. A possível solução apresentada para este caso pelos mesmos autores é a utilização de redes Bayesianas.

As redes Bayesianas não efectuem a segmentação através de um "threshold" fixo mas sim com a utilização de características. Para cada ponto é calculada a probabilidade de ele pertencer a um edifício através do valor da característica em análise. Pode entender-se como uma característica a altura do ponto, a curvatura local, o gradiente nesse ponto, ou outros conceitos que permitam caracterizar pontos. A rede é construída e são calculados os nós com maior probabilidade e que através de métodos precisos de cálculo podem ser agrupados por semelhança. A grande desvantagem desta solução é o enorme tempo de cálculo para o processamento da rede.

Finalmente, aproximamo-nos da terceira fase convencional: após a detecção dos segmentos que descrevem os edifícios, há que desenvolver os algoritmos de reconstrução 3D. Para tal, a mesma equipa utiliza modelos prismáticos e paramétricos de edifícios e o trabalho consiste em analisar os segmentos detectados na primeira fase e com eles estimar os parâmetros dos modelos. Estes modelos não contêm parâmetros para os telhados dos edifícios e basicamente o método utilizado baseia-se na estimação dos superfícies planares através dos pontos do DSM normalizado. Os planos são intersectados e é obtido o modelo aproximado do telhado.

È neste ponto que começam realmente a ser interessantes as diversas abordagens em cada uma das fases.

A primeira variação fundamental surge numa aplicação apresentada por *Steinle e Vöggtte* [7] que falam sobre a detecção de mudanças estruturais em edifícios após um desastre natural, no caso, um terramoto. Neste cenário, são obtidos dois modelos da área urbana, antes do desastre e pós desastre. É realizada então uma comparação e são identificados os edifícios com maior risco de abaterem e provocarem danos adicionais. No seu trabalho identificam a possibilidade de reconhecimento de objectos a partir de cinco análises distintas: sinal espectral, altura acima do chão, altura da textura, vectores normais e pela forma e contorno dos objectos:

Sinal espectral - apenas o método que utiliza o sinal espectral não recorre ao DSM e é reconhecido pela equipa de trabalho como o melhor método para o reconhecimento de objectos;

Altura acima do chão - semelhante ao apresentado anteriormente por *Brunn e Weidner* [8];

Altura da textura - utilizando os métodos de definição da altura da textura de *Maas* [1][2][3]. São suficientemente

precisos para conseguir separar a vegetação de edifícios e conseguir detectar estes últimos;

Vectores normais - consiste em detectar no DSM áreas homogéneas, ou seja, numa área plana os vectores normais são semelhantes enquanto que numa área de vegetação os vectores normais variam bastante, formando uma área bastante heterogénea relativamente à direcção dos vectores normais.

Forma e contorno de objectos [4][5] - os pontos são ligados através de uma rede triangular e pequenos triângulos são formados e juntos. Posteriormente é realizada uma suavização que permite obter o modelo estimado do edifício. Para a sua reconstrução 3D, é estimada a altura do edifício, são estimadas as superfícies planares 3D dos telhados a partir dos pontos do objecto detectado e são intersectados estes planos para obtenção do modelo final.

#### 4. IMPLEMENTAÇÃO

Como já foi referido, é comum utilizar a seguinte sequência de processamento de nuvens de pontos altimétricos: construção do DSM a partir dos pontos obtidos pelo laser, geração de uma primeira segmentação binária para separar os objectos de interesse, remoção selectiva de vegetação e, finalmente, a reconstrução geométrica, prismática ou 3D. Neste trabalho adopta-se esta orientação, todavia, apresentam-se variações relevantes ao objecto de estudo e implementação neste trabalho. Com especial relevo, destacam-se:

- a) a segmentação binária através de um algoritmo de crescimento de regiões ou "Region Growing" que admite elevações do terreno, logo dispensando a utilização do DTM para a segmentação inicial;
- b) após a obtenção das regiões de interesse pelo método exposto em a), estimam-se as paredes dos edifícios através da implementação do algoritmo "Best Fit Ellipse" que reduz a computação feita em relação aos algoritmos da secção 2;
- c) para a detecção da vegetação, introduz-se nova componente inovadora: alguns conceitos matemáticos como a Entropia e a Variância dos vectores normais.

As várias abordagens serão objecto de estudo e exemplificação nas secções seguintes.

##### 4.1 Caso de estudo: baixa de Lisboa

O DSM (Digital Surface Model) é a base de partida para o desenvolvimento deste trabalho, com o objectivo de processar o modelo DSM, detectar os objectos nele contido e a reconstruir um cenário com superfícies planares minimizando o erro por superfície (Fig. 5).

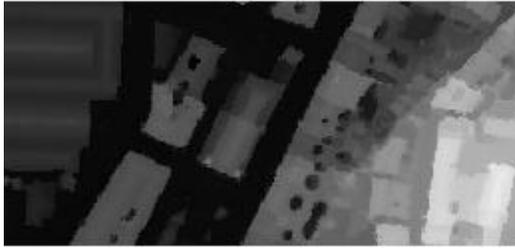


Fig. 5: Exemplo do DSM parcial da baixa de Lisboa (os tons brancos são os que contêm as alturas mais altas e os tons mais escuros as alturas mais baixas)

O ruído inerente á aquisição de dados, não perceptível pela visualização a olho nú da nuvem de pontos, aparece explícito aquando da sua representação em mapa de alturas (Fig. 6).

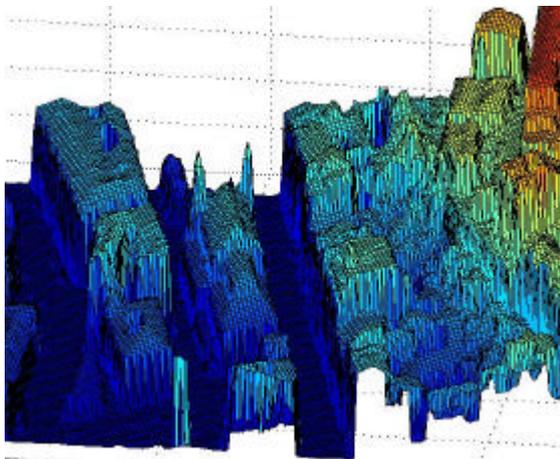


Fig. 6: Representação parcial do mapa de alturas da baixa de Lisboa

O trabalho desenvolvido neste contexto pode ser representado da seguinte forma (Fig. 7):

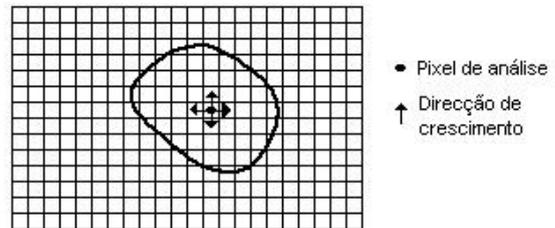


Fig. 7: Etapas do processamento do DSM

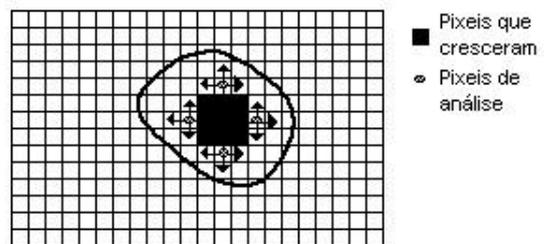
A primeira fase, consiste em utilizar o DSM para detectar regiões nele contidas que sejam homogêneas em alguma característica. Neste caso foram usados métodos com características particulares para detectar estas regiões, como por exemplo, áreas de altura semelhante, com gradientes semelhantes, com ângulos de gradientes semelhantes, entre outros.

O algoritmo base utilizado é o “Region Growing” que analisa o DSM e baseado ora nos gradientes, ora no ângulo destes, ou na altura, compara ponto a ponto e reúne os pontos em grupos que tenham estas características em comum. Esta é uma aproximação “bottom up” que reúne pontos até que todos pertençam a alguma região. Imagine-se que o cenário da Fig. 8 representa uma região ainda não detectada por este algoritmo. A linha limite preta representa a região que se quer obter no final e os pixels no seu interior têm em comum uma mesma característica, por exemplo, a altura. O algoritmo consiste em partir de um ponto de análise e comparar em ciclo os seus pontos vizinhos. Caso os seus vizinhos tenham a característica de análise em comum são adicionados à região em crescimento. As setas indicam quais os vizinhos a analisar e quais as direcções de crescimento:

1) Início do crescimento da região



2) Passo do crescimento



3) Resultado Final

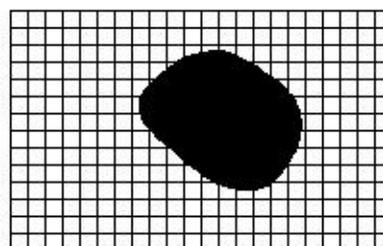


Fig. 8: Resultados gráfico de “Region Growing”

No final obtêm-se regiões que se podem identificar como os objectos principais validados. A Fig. 9 contém todos os objectos a branco que foram reconhecidos.

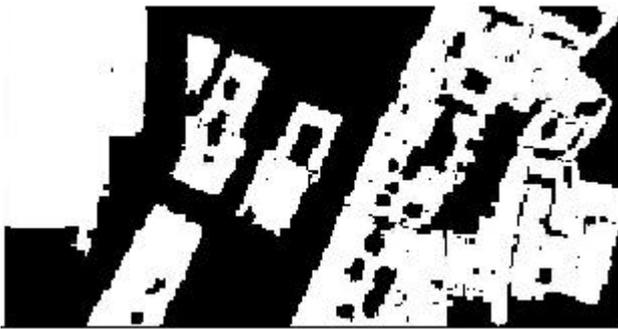


Fig. 9: Algoritmo “region growing” aplicada à baixa de Lisboa

Um caso particular, o “Region Growing” detecta o chão como um objecto, mas é fácil a sua remoção dos objectos eleitos. O facto das regiões brancas parecerem contínuas, pode causar a sensação de formarem uma única região mas, na verdade, o algoritmo garante que os objectos estão bem segmentados e individualizados.

O passo seguinte à detecção de regiões é a estimação de parâmetros das regiões. Este passo vai permitir estimar todos os parâmetros que no futuro serão estruturados para a fase de reconstrução, como por exemplo, quantas paredes tem o edifício, qual a sua altura, a forma do telhado, etc... Nesta fase de estimação, o primeiro passo efectuado foi a obtenção dos limites das regiões detectadas anteriormente com o intuito de poder para cada uma delas estimar as paredes laterais (Fig. 10).



Fig. 10: Exemplificativo gráfico para um dos cenários de estimação de parâmetros

Para obter estes limites fez-se uma aproximação à derivada do DSM para obter o máximo local do gradiente em cada ponto. Obtidos estes pontos limites o objectivo primário passa a ser a análise desses pontos e a sua segmentação tendo em vista a obtenção das linhas das paredes. Estas linhas serão estimadas não só em direcção e comprimento mas também em altura (relativa aos pontos limite que fazem parte da linha estimada).

A solução criada para conseguir, a partir de um conjunto de pontos, a sua subdivisão em grupos que estejam aproximadamente na mesma linha, é o algoritmo “Best Fit

Ellipse”. Este algoritmo consiste na estimação de uma elipse envolvente aos pontos e que tenha um dos seus eixos o mais pequeno possível. Assim, quando um ponto faz com que o eixo salte de um valor muito pequeno para um valor maior, a linha é quebrada e continua-se a estimar uma nova elipse com os pontos seguintes.

Imagine-se um conjunto de pontos  $x,y$  do plano cujos extremos mais distantes são  $(x1,y1), (x2,y2)$  (Fig. 11).

O “Best Fit Ellipse” calcula a maior distância  $d$  que tem de haver para a elipse conseguir envolver todos os pontos  $(x,y)$  entre  $(x1,y1)$  e  $(x2,y2)$ . Para cada ponto deste tipo e através das seguintes formulas, deduzidas a partir da Fig. 11, pode calcular-se o valor da distância  $d$ :

$$b^2 = (a^2 d^2 \sin^2 \tau) / (a^2 - d^2 \cos^2 \tau)$$

$$\cos \tau = (a^2 + d^2 - f^2) / (2ad)$$

$$x_0 = (x_1 + x_2) / 2$$

$$y_0 = (y_1 + y_2) / 2$$

$$a = [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]^{1/2} / 2$$

$$e = \text{atan}[(y_2 - y_1) / (x_2 - x_1)]$$

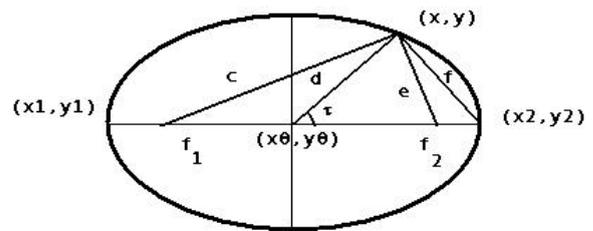


Fig. 11: Representação gráfica do “best fit ellipse”

Legenda:  $(x_0, y_0)$  é o centro da elipse,  $f1$  e  $f2$  os focos da mesma.

Caso exista algum ponto entre  $(x1,y1)$  e  $(x2,y2)$  que obrigue  $d$  a ser maior que um valor  $T$  ( $T \sim 2$ ), então estaremos perante o caso de quebra de linha ou seja, provavelmente será um canto de edifício e, desta forma, é possível começar a definir uma parede. Quando uma parede é detectada através deste algoritmo, estima-se também a sua altura média, comprimento e direcção, tendo em vista a sua reconstrução posterior em 3D. O resultado de uma estimação com este algoritmo a um grupo de pontos limite de uma região está representado na Fig. 12.

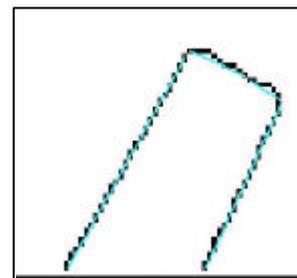


Fig. 12: Representação gráfica dos resultados do método da elipse para formação do perímetro do edifício

Como se trata essencialmente de objectos em áreas urbanas, o objectivo primordial foca agora os edifícios que ocupam as maiores áreas em volume. Assim, no futuro, haverá vantagens em aperfeiçoar esta estimação de parâmetros só para regiões deste tipo.

Em relação à componente vegetação, foram implementados algoritmos que calculam os vectores normais dos pontos do DSM e através destes a variância (Fig. 13) e entropia (Fig. 14) para posterior refinamento da segmentação das regiões detectadas (p.ex., vegetação onde a variância e entropia têm valores muito elevados).



Fig. 13: Representação gráfica de resultados para o espectro de variâncias

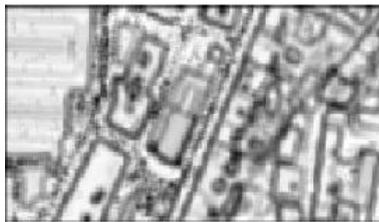


Fig. 14: Representação gráfica de resultados para o espectro de entropia

A entropia é aplicada sobre as componentes Z do vectores normais à superfície, obtendo-se as matrizes das componentes x, y e z. Aplicando a entropia para esta última componente é calculado, segundo uma janela de NxN pixels sobre a matriz da componente Z, um histograma de diferenças de valores presentes. Normalizando este histograma obtêm-se as probabilidades de cada valor. A entropia de uma região é calculada segundo a seguinte formula:

$$E = \sum_i -P(h_i) \times \log(P(h_i))$$

onde  $h_i$  são os valores do histograma da janela. Estes pontos poderão ser removidos do DSM para melhorar a qualidade de estimação dos parâmetros.

Finalmente, no seguimento do organograma, falta apenas a fase de estruturação dos parâmetros. Pretende-se construir uma hierarquia de objectos e atributos estruturada e compatível com os requisitos para futura visualização em tempo real. A hierarquia é construída a partir da fase de estimação de parâmetros e pode representar-se da seguinte forma (Fig. 15).

No início deste trabalho pensou-se em estruturar as regiões homogêneas em bairros, ruas, etc..., mas após análise e obtenção dos primeiros resultados constatou-se que não seria fácil arranjar padrões de regiões. Às diferenças devido às reais diferenças altimétricas há a somar o ruído que foi introduzido aquando da obtenção por varrimento laser dos pontos originais. Este ruído introduz erros que influenciam os algoritmos e não facilitam a padronização por grupos de regiões (Fig. 16).

A hierarquia apresentada é alterada sempre que o grupo necessite de estimar mais algum parâmetro de um edifício em particular. Como podemos ver o resultado de toda a fase de detecção serão planos 3D bem definidos que a fase de reconstrução se limitará a representar no ecrã (Fig. 17).

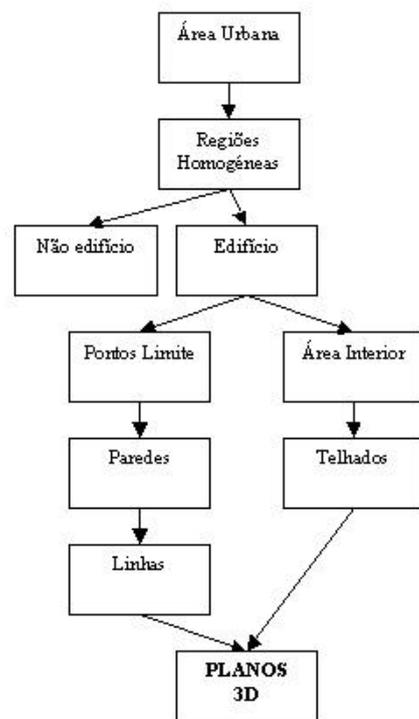


Fig. 15: Organograma dos procedimentos para reconstrução tridimensional



Fig. 16: Representação pré-prismática

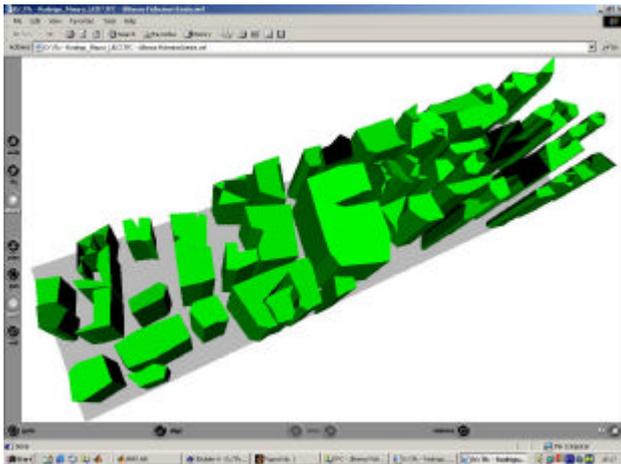


Fig. 17: Representação 3D constituída somente por superfícies planares

## 5. CONCLUSÕES

Os resumos dos artigos apresentados são a referência em relação ao *pipeline* convencional e contribuíram para a compreensão do problema e introdução dos conceitos gerais desta área.

Além do aperfeiçoamento dos algoritmos apresentados para a estimação dos parâmetros apresentados, o grupo ainda tem de implementar a parte de estimação de telhados e definição dos parâmetros em planos 3D para a reconstrução. Este processo está ainda em fase de processamento e não será incluído neste artigo. Todavia, a estimação dos telhados será feita através da selecção dos pontos interiores das regiões detectadas. Esses pontos forneceram a possibilidade de estimar os planos que se ajustam mais ao perfil dos telhados. Após intersectar esses planos obtemos a forma final do telhado.

Conclui-se que grande parte do trabalho desenvolvido é centrado na vertente de detecção de objectos, ficando a reconstrução 3D muito dependente da qualidade dos resultados obtidos. É, pois, fundamental que uma das vertentes fortes deste artigo seja o aprofundamento de alguns destes algoritmos com as necessárias variações.

Continua ainda o processo de procura da melhor solução para detectar e representar realisticamente as entidades que correspondem à vegetação.

Um processo eficaz de reconhecimento de objectos permitirá uma mais exacta hierarquização do cenário 3D

(casas isoladas, quarteirões, bairros, entre outros) com a consequente vantagem na vertente edição ou navegação interactivas.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Vosselman G., Suveg I. *Map based building reconstruction from laser data and images*, Proceedings of Automatic Extraction of Man- Made Objects from Aerial and Space Images (III), Ascona 11 - 15 Junho 2001, Balkema Publishers, ISBN 9 589 252 6, pp. 231- 242
- [2] Vosselman G. *3D Building model reconstruction from point clouds and ground plans*, *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIV-3/W4:37-43, 2001
- [3] Vosselman G., Maas H. *Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data*, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54(2-3):153-163, 1999
- [4] Haala N., Brenner C. *Extraction of buildings and trees in urban environments*, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54(2-3):130-137, 1999
- [5] Haala N. *Combining Multiple Data Sources for Urban Data Acquisition*, *Institut für Photogrammetrie, Proc. Photogrammetrische Woche 1999, Fritsch/Spiller (Eds.)*
- [6] Rieger K, Reiter R. *Roads and buildings from laser scanner data within a forest enterprise*, *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXII
- [7] Steinle E., Vögtte T. *Automated extraction and reconstruction of buildings for disaster management*, E. Baltasvias et.al. (eds.): *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III)*, Swets & Zeitlinger, Lisse, The Netherlands, 2001, ISBN 90 5809 252 6, pp. 309 - 318
- [8] Brunn A., Weidner U. *Extracting Buildings from Digital Surface Models*, *IAPRS*, Vol. 32, Part 3-4W2, *3D Reconstruction and Modelling of Topographic Objects*, Stuttgart, September 17-19, 1997
- [9] Pimentel J., Batista N., Dionísio J. *Construção e gestão da complexidade de cenários urbanos 3D em ambientes virtuais imersivos*, *Actas 10º Encontro Português de Computação Gráfica*, ISCTE, 1-3 de Outubro, Lisboa, 2001.