

Integração de dados LiDAR e orto-imagens CIR na extracção de Modelos Digitais de Terreno de zonas urbanas: resultados preliminares

Gil Gonçalves^{1,2} e Luísa Gomes Pereira^{3,4}

¹ Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra (INESCC) Rua Antero de Quental, 199 3000-033 Coimbra

² Departamento de Matemática, Universidade de Coimbra, Apartado 3008, 3001-454 Coimbra, Portugal

³ Centro de Investigação em Ciências Geo-Espaciais (CICGE), Universidade do Porto, Departamento de Matemática Aplicada, Rua do Campo Alegre nº 687 4169-007 Porto, Portugal

⁴ Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Águeda, Universidade de Aveiro, Rua Comandante Pinho e Freitas, nº 28, 3750-127 Águeda

(gil@mat.uc.pt; luisapereira@ua.pt)

RESUMO

A extracção de Modelos Digitais de Terreno (MDT) em zonas urbanas a partir de Modelos Digitais de Superfície (MDS) é ainda um problema com sucesso limitado devido ao facto da operação de filtragem, ao utilizar apenas a informação geométrica contida no MDS, não permitir distinguir eficazmente todos os objectos situados acima da superfície topográfica que define o MDT. Para ultrapassar os problemas propõe-se uma nova metodologia que, pela integração dos dados obtidos por varrimento aéreo com laser (LiDAR) com orto-imagens CIR (*Color Infra-Red*, ou ainda falsa cor) de alta resolução, permite a extracção de informação precisa e fiável do terreno e dos objectos considerados não pertencentes ao MDT (edifícios e vegetação alta). Os resultados obtidos mostram que em zonas urbanas complexas a metodologia proposta tem um desempenho superior à metodologia convencional.

Palavras chave: LiDAR, Orto-imagens CIR, Integração de dados, MDT, MDS.

1. Introdução

Actualmente, os sistemas de varrimento laser (terrestres e aéreos) são uma tecnologia de Detecção Remota incontornável, pois permitem adquirir de uma forma rápida e precisa, informação 3D de zonas urbanas. Esta informação, juntamente com a informação obtida a partir de imagens aéreas de alta resolução, nomeadamente imagens CIR, permite obter modelos 3D urbanos imprescindíveis em várias aplicações tais como: o planeamento urbano, as telecomunicações, monitorização ambiental, cartografia de riscos naturais (cartas de risco de cheias, cartas de ruído, etc.), tráfego e segurança. Neste contexto, a extracção automática de objectos naturais (por exemplo a vegetação) e artificiais (por exemplo o edificado) a partir de dados obtidos por varrimento aéreo com laser (LiDAR) e/ou imagens aéreas é objecto de uma investigação bastante activa devido à sua importância em modelação urbana.

Uma das aplicações dos Modelos Digitais de Terreno (MDT) em que estamos particularmente interessados é a modelação de cheias urbanas. Em geral, os modelos hidráulicos 2D são frequentemente parametrizados tendo por base um MDT que é utilizado como modelo de batimetria e sobre o qual se calculam os escoamentos superficiais. Como o escoamento superficial é afectado não apenas pelo relevo mas também pelos objectos que nele se encontram, tais como edifícios, vegetação, e vias, estes elementos são introduzidos no modelo hidráulico como coeficientes de fricção. Em zonas urbanas, os MDT são habitualmente extraídos a partir de Modelos Digitais de Superfície (MDS) por detecção e eliminação dos objectos que não pertencem ao terreno (filtragem). Por sua vez estes MDS podem ser obtidos, entre outras técnicas, por correlação automática de imagens, por LiDAR, ou por uma combinação das duas técnicas.

No contexto da extracção de MDT, a utilização única de imagens aéreas é ainda um problema com sucesso limitado, pois a extracção quer automática quer manual de edifícios sofre ainda de alguns problemas nomeadamente relacionados com o contraste entre os edifícios e o background e com a existência de informação espectral e textural muito complexa à qual se adiciona muitas vezes oclusões e sombras. No caso da fonte de dados ser apenas constituída pela informação geométrica da nuvem de pontos LiDAR, a definição dos lados dos edifícios é pouco precisa devido à resolução e padrão de amostragem do laser e à

resolução do varrimento, o que faz com que os lados sejam representados na nuvem de pontos com um número insuficiente de pontos.

Apesar da vasta bibliografia existente sobre temas relacionados com o assunto em estudo neste artigo, como por exemplo a detecção de edifícios (Brenner 2005; Rottensteiner et al. 2005; Sohn e Dowman, 2007; Zhang et al. 2007), poucos autores se dedicaram à extração de MDT em zonas urbanas utilizando dados LiDAR e orto-imagens (Champion e Boldo 2005; Dell'Acqua et al. 2001). Neste contexto, destacamos as metodologias propostas por Chen et al. (2007) e por Rottensteiner et al. (2003), por nos parecerem as mais promissoras para atingirmos os nossos objectivos e se adequarem tanto à natureza dos dados de que dispomos como às especificidades da área de estudo.

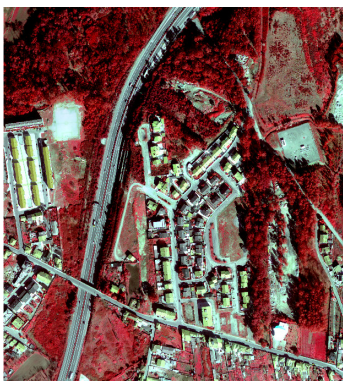
Assim, a metodologia proposta para extrair o MDT teve em consideração tanto o tipo de dados disponíveis como a sua resolução. Nessas condições, para a integração dos dados LiDAR e das orto-imagens CIR foram desenvolvidos e testados os seguintes procedimentos:

- filtragem morfológica progressiva do MDS;
- segmentação do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN);
- segmentação da textura da altitude;
- integração de informação e produção de MDT;
- interpolação do MDT.

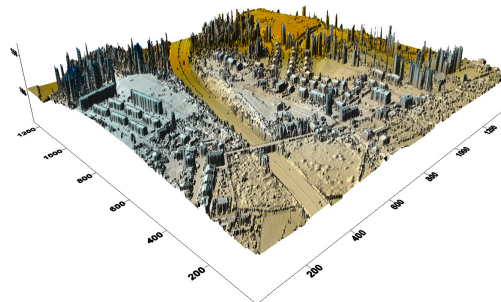
2. Produção de MDT pela integração de dados LiDAR e imagens CIR

2.1 Área de estudo e dados

Os dados utilizados para a realização deste trabalho foram obtidos no contexto de um projecto de investigação financiado pela Fundação para Ciência e Tecnologia (FCT) com a referência POCI/CTE-GEX/60353/2004 e intitulado “Modelação e Classificação da Superfície Terrestre pela Integração de Imagens Multi-Espectrais e Modelos Digitais da Superfície Terrestre”. Eles consistem num MDS obtido por LiDAR correspondente ao último retorno e imagens CIR adquiridas no mesmo voo (Figura 1). O MDS tem o formato de uma grelha de $1 \times 1 \text{ m}^2$ e as imagens CIR um pixel de 50 cm. A área de estudo, com uma extensão de $5 \times 5 \text{ Km}^2$, situa-se na zona peri-urbana da cidade de Gaia. Ela tem um relevo moderado e contém zonas densamente urbanizadas e zonas rurais distribuídas de uma forma pouco organizada e bastante heterogénea em termos de objectos na sua superfície (eucaliptos, vegetação baixa, edifícios e vias de comunicação). Para se compatibilizar a resolução das imagens CIR e dos dados LiDAR, o MDS foi interpolado para 50 cm utilizando uma interpolação bicúbica.



a)



b)

Figura 1 – Imagem CIR e parte do MDS (resolução de 50cm) da zona de estudo (unidades em pixels).

2.2 Metodologia

A metodologia utilizada para a produção de MDT pela integração de dados LiDAR e imagens CIR engloba as seguintes cinco fases:

- filtragem morfológica progressiva do MDS;
- segmentação do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN);
- segmentação da textura da altitude;
- integração de informação e produção do MDT
- interpolação do MDT.

O processo é iterativo na medida em que se constrói progressivamente o MDT utilizando para isso uma abertura morfológica com janela cujo tamanho cresce também progressivamente em cada iteração. O output das três primeiras fases é integrado no processo de filtragem progressiva, constituindo assim a chamada fase de integração de informação cujo output será utilizado novamente na primeira fase. Com os pixels classificados em terreno e não-terreno, a construção final do MDT é feita por interpolação. A figura 2 ilustra a metodologia proposta.

Na implementação desta metodologia recorreu-se às linguagens C/C++ e *MatLab*. As partes de código feitas em C/C++ foram integradas no ambiente de desenvolvimento e visualização fornecido pelo *MatLab* através de *Mexfiles*.

As diversas fases listadas acima são apresentadas em mais detalhe no que se segue.

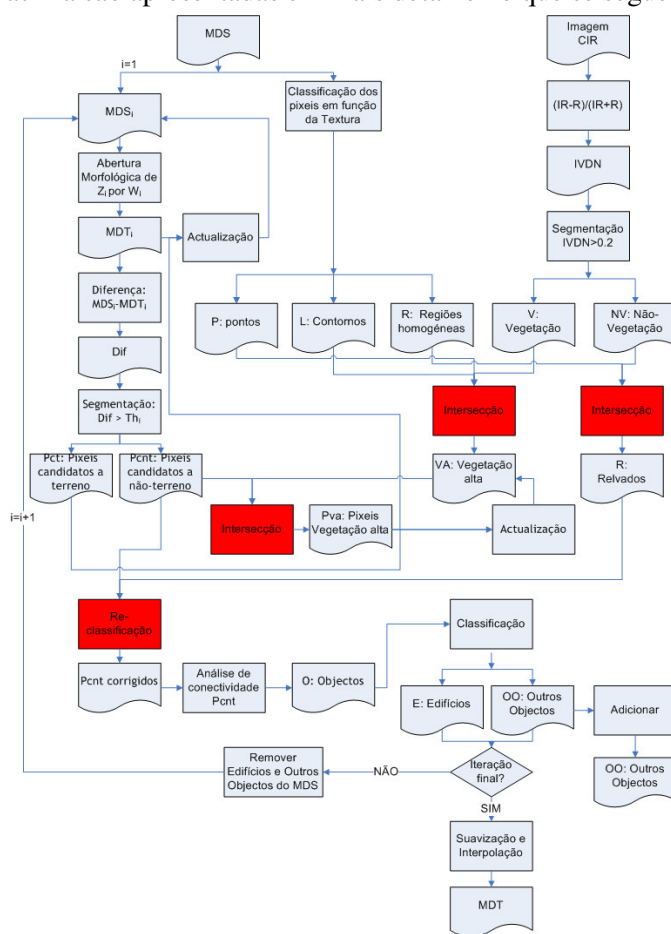


Figura 2: Fluxograma da metodologia proposta.

2.2.1 Filtragem morfológica progressiva do MDS

Partindo do princípio de que os objectos não pertencentes ao MDT são mais altos do que a superfície topográfica envolvente, é possível utilizar a morfologia matemática para se obter uma superfície isenta de

objectos que tenham dimensões menores do que as do elemento estruturante W . De facto, utilizando uma operação de erosão sobre um pixel p da imagem z (ou seja, o MDS),

$$\bar{z} = [\varepsilon_w(z)](p) = \min_{w \in W} (p + w) \quad (1)$$

ir-se-á remover do MDS os objectos com dimensões inferiores à do elemento estruturante e não pertencentes ao MDT. De seguida, utilizando uma operação de dilatação com o mesmo elemento estruturante, sobre a imagem anterior,

$$\bar{\bar{z}} = [\delta_w(\bar{z})](p) = \max_{w \in W} (p + w) \quad (2)$$

recupera-se a superfície do MDT.

A erosão seguida da dilatação é designada por abertura morfológica. A diferença (Δz_i) entre a imagem inicial (z) e a imagem que resulta do processo de abertura (\bar{z}), e a selecção dos valores maiores ou iguais a um limiar, isto é,

$$\Delta z_i \geq Th_i \quad (3)$$

permite segmentar a superfície topográfica e identificar os pixels (ou objectos) que tenham uma altura superior a um determinado valor Th_i .

Para se eliminar a informação dos objectos não pertencentes ao MDT na imagem resultante de abertura é necessário escolher o tamanho do elemento estruturante W de tal forma que este contenha os objectos que se pretende remover (edifícios ou massa contínua de vegetação alta). Como estes objectos podem ser de vários tamanhos é habitual escolher tamanhos progressivos do elemento estruturante (w_i) em função do tamanho mínimo (d_{\min}) e máximo (d_{\max}) dos objectos que se pretende remover (Zhang, 2003, Chen 2007) :

$$w_i = \begin{cases} d_{\min} + 2^i & \text{se } w_i < d_{\max} \\ d_{\max} & \text{se } w_i \geq d_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

Em cada iteração i , para se determinar se um dado ponto p_j , pertencente a uma dada célula k , é um ponto no terreno, a diferença das altitudes associadas à célula, e obtidas nessa iteração e na iteração anterior, conforme descrito acima, é comparada com um valor do limiar Th_i dado por:

$$Th_i = \begin{cases} dh_0 & \text{se } w_i \leq 3 \\ s(w_i - w_{i-1})c + dh_0 & \text{se } w_i > 3 \\ dh_{\max} & \text{se } Th_i > dh_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

Onde dh_0 é a diferença de altitude inicial que corresponde ao erro vertical das medições laser (0,2-0,3 m), s é o declive máximo da área que se pretende filtrar, c é o tamanho da célula e w_i é o tamanho do elemento estruturante (em número de células) na iteração i .

2.2.2 Índice de vegetação da diferença normalizada

O índice de vegetação da diferença normalizada (IVDN) é um índice bastante utilizado na discriminação entre o edificado e a vegetação, devido ao facto de as áreas com vegetação apresentarem reflectâncias

relativamente mais altas na banda do infravermelho (IR) do que na banda vermelha do visível (R). É definido por:

$$IVDN = \frac{(IR-R)}{(IR+R)}. \quad (6)$$

Valores altos de IVDN num dado objecto, significa que o objecto é composto por vegetação vigorosa.

2.2.3 Segmentação da textura das altitudes

A textura é um conceito muito utilizado na segmentação de imagens para detectar os contornos dos objectos em função da variabilidade espacial dos valores de intensidade dos pixels numa dada vizinhança. Aqui será utilizada para classificar cada pixel do MDS analisando se ele está situado numa região homogénea, numa linha ou num ponto. Para este efeito, utilizaremos a abordagem descrita por Förstner (1994) para a extracção de objectos em imagens, na qual se considera que uma imagem (I) é constituída por segmentos ou regiões homogéneas (R_i) delimitadas por contornos os quais, por sua vez, são definidos por linhas (L_j) ligadas entre si por pontos (P_k). Assim teremos:

$$I = \bigcup_{i=1}^{n_s} R_i + \bigcup_{j=1}^{n_L} L_j + \bigcup_{k=1}^{n_p} P_k \quad (7)$$

Para cada pixel é calculado o tensor:

$$N = \frac{1}{\sigma_{xy}^2} \cdot G_\sigma \otimes \begin{pmatrix} z_{xx}^2 + z_{yx}^2 & z_{xx} \cdot z_{xy} + z_{yy} \cdot z_{yx} \\ z_{xx} \cdot z_{xy} + z_{yy} \cdot z_{yx} & z_{xy}^2 + z_{yy}^2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

onde:

- σ_{xy}^2 é a variância dos elementos da matriz depois de lhes serem aplicados o filtro Gaussiano G_σ de variância σ^2 .
- $z_{xx}, z_{xy}, z_{yx}, z_{yy}$ são as segundas derivadas do MDS calculadas utilizando diferenças finitas de segunda ordem.

Utilizando os elementos de N pode-se definir dois parâmetros de textura designados por força de textura (ou grau de homogeneidade) R e direcção de textura D:

$$R = \text{tr}(N) \text{ e } D = \frac{4 \det(N)}{\text{tr}^2(N)} \quad (9)$$

Utilizando estas duas medidas, os pixels podem ser classificados em três classes: pixels situados em “regiões homogéneas”, pixels situados em “regiões linha” e pixels situados em “regiões ponto”. Para isso, começa-se por segmentar a matriz R utilizando um limiar R_{\min} . Um pixel estará situado numa região homogénea se $R \leq R_{\min}$. Note-se que como os elementos da matriz N são obtidos a partir das segundas derivadas do MDS estes estarão relacionados com a curvatura local do MDS. Assim, estes pixels homogéneos estarão situados nas vizinhanças de vectores normais à superfície homogénea e portanto na vizinhança de valores pequenos das segundas derivadas. Se $R > R_{\min}$, na vizinhança local de um dado pixel, definida pelo tamanho do filtro Gaussiano G_σ , existem variações significativas de N as quais não podem ser explicadas unicamente pelo ruído σ .

As regiões não-homogéneas são posteriormente analisadas em termos da direcção de textura D para se averiguar se as variações são isotrópicas ou não. Utilizando um limiar D_{\min} as regiões não homogéneas serão

segmentadas em regiões tipo ponto, se a variação é isotrópica isto é se $D > D_{\min}$. Se $D \leq D_{\min}$ os pixels estão situados em vizinhanças com grandes variações anisotrópicas dos vectores normais à superfície.

2.2.4 Integração de informação

A integração dos dois conjuntos de informação relativos aos dados LiDAR e às orto-imagens CIR faz-se basicamente nas etapas indicadas a vermelho na figura 2. Em cada etapa do processo iterativo vão sendo eliminados progressivamente os objectos localizados sobre a superfície topográfica, começando pelos objectos mais pequenos (árvores isoladas, automóveis) e terminando nos objectos maiores (edifícios, grupos compactos de árvores, etc). Em primeiro lugar, a classificação dos pixels em terreno e não-terreno resultantes do processo de filtragem é corrigida nos casos em que este classifica como não-terreno os pixels situados em zonas homogéneas e com IVDN superior a 0,2, ou seja nas áreas classificadas como relvados. De seguida, são re-classificados os pixels que foram classificados como terreno pelo processo de filtragem e que pertençam à máscara de vegetação alta. Finalmente, com os restantes pixels são determinados objectos por análise de conectividade do resultado da segmentação obtida por uma simples diferença entre o MDS e o MDT produzido pela abertura morfológica do MDT da iteração $i-1$. Estes objectos são classificados em edifícios e em outros objectos utilizando a regra de decisão seguinte:

- Se 80% dos pixels que formam o objecto forem do tipo R e 80% dos pixels que formam a sua fronteira forem do tipo L ou P então o objecto é classificado como Edifício;
- Caso contrário, o objecto é classificado como Outros Objectos.

2.2.5 Interpolação

Em cada iteração do filtro morfológico é feita uma classificação de cada objecto composto por um conjunto conexo de pixels (conectividade N4 ou N8) satisfazendo a equação (3). Desta classificação resultam duas máscaras: a do edificado e a de outros objectos altos. Estas duas máscaras juntamente com a máscara da vegetação alta, formam a máscara dos pixels não-terreno e são actualizadas em cada iteração do filtro e, no final do procedimento de filtragem e classificação são utilizadas para eliminar os pixels/células do MDS inicial que não pertencem à superfície topográfica, ou seja o MDT. Os hiatos (a preto nas figuras 5(a) e 5(b)) resultantes deste processo de eliminação podem ser preenchidos utilizando um método de interpolação.

Neste trabalho foram utilizados três métodos para a reconstrução final do MDT:

- A interpolação linear numa TIN construída com as células classificadas como terreno.
- A resolução, para cada pixel (i,j) pertencente à máscara não-terreno, da função harmónica:

$$z_{i,j-1} + z_{i,j+1} + z_{i-1,j} + z_{i+1,j} = 4z_{i,j}$$

- A minimização do funcional de energia convexo

$$\min_{u \in K} \left\{ \int_{\Omega} |\nabla u(x)| dx + \lambda \int_{\Omega \setminus \mathcal{D}} |u(x) - f(x)| dx \right\}$$

onde Ω e \mathcal{D} são dois subconjuntos fechados de \mathbb{S}^2 , $f : \Omega \rightarrow \mathbb{S}$ é a função que representa o MDS, $u : \Omega \rightarrow \mathbb{S}$ a função que representa o MDT e λ um parâmetro que regula as propriedades (interpoladora ou aproximadora) da função u . O domínio \mathcal{D} será neste caso a máscara binária representando os pixels não-terreno e $K = \{u : \Omega \rightarrow \mathbb{S}, u(x) < f(x), \forall x \in \Omega\}$

A escolha do melhor interpolador será objecto de uma futura investigação. Neste artigo, optou-se pela interpolação linear numa TIN por ser um método simples de implementar e dar bons resultados, em termos qualitativos, nas zonas do edificado.

3. Resultados e discussão

As figuras 3(a) e 3(b) mostram, respectivamente, a segmentação do MDS em função da textura e do IVDN. A máscara binária ilustrada na figura 3(c) (designada por R na figura 2) representa adequadamente os relvados e resulta do cruzamento das regiões homogéneas (regiões R na figura 3(a)) com a segmentação dos dados IVDN ilustrados na figura 3(b) para um limiar IVDN igual a 0,2. Os pixels desta máscara devem fazer parte do MDT. A máscara binária da figura 3(d) (designada por VA na figura 2) representa a vegetação alta e resulta do cruzamento das regiões não homogéneas (regiões L e P) com a segmentação da variável IVDN para um limiar de 0,2. Esta máscara que inicialmente não está correcta pois as copas das árvores não estão devidamente ortorectificadas, vai sendo actualizada durante o processo de filtragem desenvolvido.

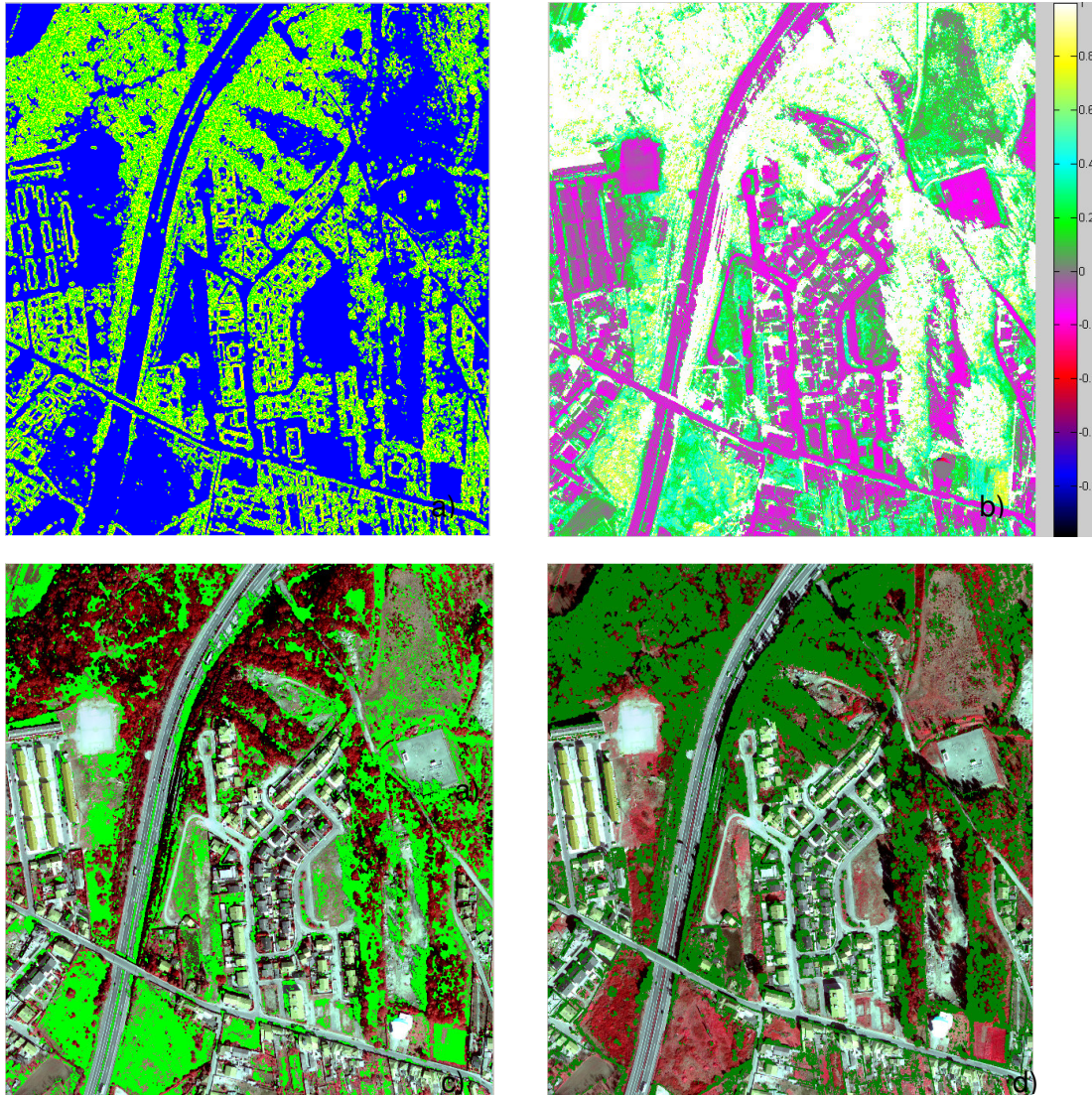


Figura 3: Informação utilizada na metodologia proposta: a) Informação da textura (azul regiões R, amarelo regiões L e verde regiões P); b) Informação do IVDN; c) Máscara de relvados; d) Máscara de vegetação alta.

As figuras 4(a) e 4(b) mostram o resultado da metodologia proposta para a produção de um MDT com dados LiDAR. Na figura 4(a) estão representados, com cores diferentes, os objectos que não fazem parte do MDT. A verde-escuro está representada a máscara final da vegetação corrigida automaticamente do efeito perspectivista. Na figura 4(b) mostra-se o MDT. Como se pode verificar ainda existem alguns pixels isolados que não devem fazer parte do MDT e que podem ser eliminados em pós-processamento.

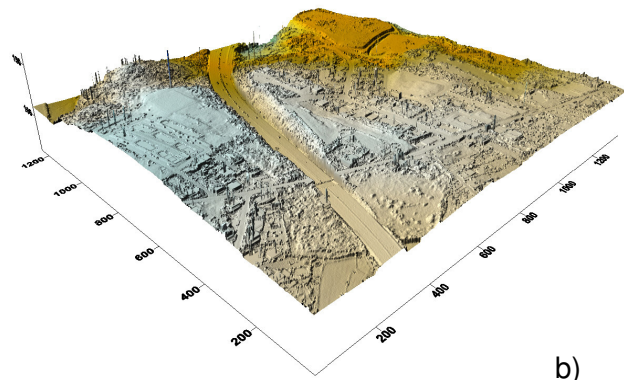


Figura 4: Resultados obtidos com a metodologia proposta: a) Classificação final do MDS (azul edifícios, amarelo outros objectos e verde-escuro vegetação alta); b) MDT final depois de terem sido removidos os objectos não pertencentes ao terreno.

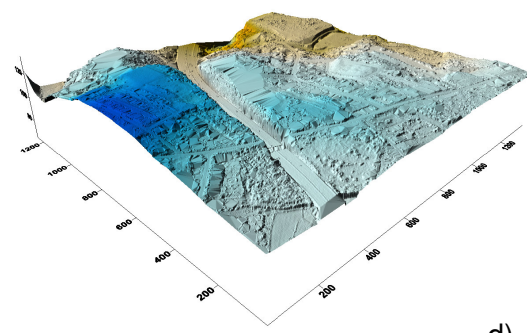
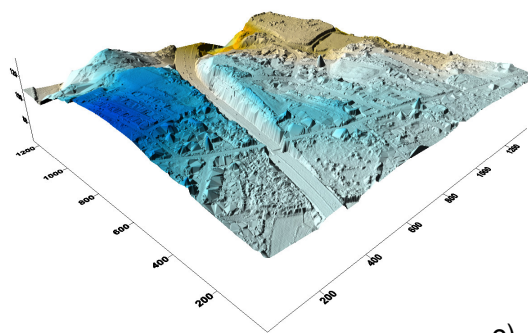


Figura 5: Comparação entre a metodologia proposta e o filtro proposto em Zhang et al. (2003). a-b) Classificação obtida com o filtro proposto e com o filtro de Zhang et al., respectivamente (pixels terreno a laranja e pixels não-terreno a preto); c-d) MDT obtidos com a metodologia proposta e com o filtro de Zhang et al., respectivamente.

Uma vez que no momento não existem dados de controlo foi decidido comparar visualmente os resultados obtidos com a metodologia proposta com aqueles obtidos com o filtro morfológico muito conhecido e proposto em Zhang et al. (2003).

Nas figuras 5 (a) e 5(b) ilustram-se a classificação dos pixeis em terreno e não-terreno obtida, respectivamente, com a metodologia proposta e com o filtro morfológico proposto em Zhang et al. (2003). Como se pode verificar nas figuras 5 (c) e 5 (d) o filtro proposto em Zhang et al. (2003) não preserva adequadamente a morfologia do terreno, destruindo grande parte do relevo existente na parte superior dos taludes das margens das vias de comunicação principal.

4. Conclusões

Neste artigo apresenta-se uma metodologia que pela integração de dados LiDAR e orto-imagens CIR visa classificar e filtrar, simultaneamente e num processo iterativo, os dados LiDAR com vista à extracção de informação pertinente sobre o relevo do terreno de zonas urbanas.

Os resultados, apesar de satisfatórios, podem ser melhorados considerando alguns melhoramentos tanto ao nível da classificação da textura, como do filtro morfológico e da informação introduzida relativamente à componente espectral das imagens CIR. Assim, relativamente a desenvolvimentos futuros prevê-se:

- A utilização das imagens aéreas e a sua orientação externa em vez das imagens ortorectificadas.
- O desenvolvimento de um método de segmentação da imagem mais robusto (por exemplo um baseado no conceito de *mean shift*);
- O desenvolvimento de um método de classificação não-paramétrico (por exemplo um SVM - *Support Vector Machines*) que permita a introdução de conhecimento adicional no procedimento;
- A análise da influência dos diferentes métodos de interpolação na reconstrução final do MDT e o desenvolvimento de uma metodologia robusta (adequada às características das diferentes áreas).

Referências Bibliográficas

- Brenner, C., 2005. Building reconstruction from images and laser scanning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6: 187-198.
- Champion, N., Boldo, D., 2006: A robust algorithm for estimating digital terrain models from digital surface models in dense urban areas. *PCV Photogrammetric Computer Vision*.
- Chen, Q., Gong, P., Baldocchi, D. and Xin, G., 2007. Filtering Airborne Laser Scanning Data with Morphological Methods. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 73, No. 2, pp. 175–185.
- Dell'Acqua, F., Gamba, P., Mainardi, A. 2001. Digital Terrain Models in dense urban areas. *IAPRS*, Vol. XXXIV –3/W4 Annapolis, MD, 22-24 October 2001. pp. 195-202.
- Forstner, W., 1994. A Framework for Low Level Feature Extraction, in: J.-O. Eklundh (Ed.): *Computer Vision - ECCV'94*, Vol. II. Springer LNCS 801, pp. 383-394.
- Morgan, M., and Tempfli K., 2000. Automatic building extraction from airborne laser scanning data. *Nas actas do 19 Congresso da ISPRS*, 33 (Parte 3B), Amsterdam, Holanda, pp:616-623.
- Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S. and Kubik, K., (2003). Building detection using LiDAR data and multispectral images. *Actas da Conferência da ASPRS em Digital Image Computing: Techniques and Applications*, DICTA, Sydney, Dezembro, vol. II, pp. 673–682.
- Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S. and Kubik, K. 2005. Using the Dempster–Shafer method for the fusion of LiDAR data and multi-spectral images for building detection. *Inf. Fusion*, vol. 6, no. 4, pp. 283–300.
- Sohn, G. and Dowman, I., 2007. Data fusion of high-resolution satellite imagery and LiDAR data for automatic building extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 62(1), pp: 43-63.
- Zhang, K., Chen, S., Whitman, D., Shyu, M., Yan, J., and Zhang, C., 2003. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LiDAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4), pp. 872–882.
- Zhang, K., Yan, J. and Chen, S.-C. 2006. Automatic construction of building footprints from airborne LiDAR data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 44, no. 9, Setembro, pp. 2523–2533.