DESAFIOS NA EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE CONTORNOS DE EDIFICAÇÕES USANDO DADOS LIDAR AEROTRANSPORTADO

Renato César dos Santos [1], Maurício Galo [1,2]

[1] Universidade Estadual Paulista - UNESP, Departamento de Cartografia
[2] Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC)
Rua Roberto Simonsen, 305, Centro Educacional, Presidente Prudente, São Paulo, Brasil, renato.cesar@unesp.br; mauricio.galo@unesp.br

RESUMO

Esse artigo tem como principal objetivo discutir alguns dos desafios encontrados na extração automática de contornos de edificações sobre dados LiDAR obtidos a partir de plataformas aerotransportadas. Com este propósito foram realizados experimentos destinados à extração automática dos contornos por meio do algoritmo *alpha-shape* adaptativo, o qual é robusto à variação abrupta de densidade. Os experimentos foram realizados considerando dados reais adquiridos em uma área urbana. Os resultados obtidos indicam a influência da densidade de amostragem e da oclusão na qualidade do contorno final. De modo geral, a acurácia final é mais afetada por problemas de oclusão, os quais podem ser causados por objetos antrópicos e/ou árvores altas localizados próximos aos telhados.

Palavras-chave **—** Extração de contornos, algoritmo alpha-shape, dados LiDAR, fotogrametria, sensoriamento remoto.

ABSTRACT

This paper aims to discuss and introduce challenges in automatic boundary extraction from airborne LiDAR data. Based on this aim, experiments were conducted to automatically extract contours using the adaptative alpha-shape algorithm, which is robust to abrupt density variation. The experiments were performed considering real data. Obtained results indicated the impact of sampling density and occlusion on the contour quality. In general, the final accuracy is more affected by occlusion problems that can be caused by man-made objects and/or tall trees located close to the roofs.

Key words **—** *Boundary extraction, alpha-shape algorithm, LiDAR data, photogrammetry, remote sensing.*

1. INTRODUÇÃO

Os contornos de edificações podem ser utilizados para diferentes aplicações como planejamento urbano, atualização de sistemas de informação geográfica (SIG), geração de modelos tridimensionais de edificações, identificação de mudanças em ambientes urbanos, dentre outras.

A obtenção dos contornos pode ser realizada por meio de medições *in situ*, onde o operador humano vai a campo e obtém os vértices das edificações usando técnicas topográficas/geodésicas, e na sequência realiza a geração do polígono usando um programa CAD (*Computer-Aided Design*), por exemplo. Alternativamente, imagens obtidas por plataformas aéreas e orbitais podem ser usadas como fonte da informação. Nesse caso, o bloco de imagens deve ser triangulado sendo a extração do contorno realizada por meio de restituição fotogramétrica usando visualização estereoscópica. Outra possibilidade é realizar a vetorização a partir de uma ortoimagem. Além dessas alternativas a delimitação do contorno pode ser diretamente realizada a partir da nuvem de pontos obtidas por um sistema LiDAR aerotransportado.

Apesar de serem amplamente aplicados por prefeituras e empresas que atuam na área de levantamentos, os procedimentos mencionados requerem uma alta interversão humana e são morosos. Nesse sentido, além dos custos associados a cada uma das alternativas, algumas técnicas se tornam inviáveis para municípios com grande extensão urbana e que necessitam de uma atualização contínua. Para contornar essa limitação, vários autores têm explorado o desenvolvimento de abordagens semi-automática/automática, as quais aplicam modelos matemáticos sobre dados remotos, tais como imagens aéreas, orbitais e obtidas por UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), e dados LiDAR.

Os dados obtidos por um sistema LiDAR aerotransportado possuem algumas vantagens quando comparado com a fotogrametria convencional. Uma delas é que as coordenadas tridimensionais são determinadas de maneira direta, não sendo necessário um processo de correspondência de imagens que usualmente é afetado quando se consideram regiões homogêneas e padrões repetitivos. Além disso, os dados obtidos não são influenciados por fatores de iluminação, uma vez que o LiDAR é um sistema ativo. Por outro lado, dependendo da densidade da amostragem nem todos os pontos de bordas de edificações são amostrados por estes sistemas.

No contexto da extração automática de contornos usando dados LiDAR aerotransportado, o conceito do *convex hull* é amplamente aplicado. Em Sampath e Shan [1] é proposto o uso do *convex hull* modificado, restringindo a vizinhança de busca. Com isso, o método permite a extração de segmentos

côncavos. No entanto, as abordagens baseadas no *convex hull* são limitadas à extração de contornos externos. Para contornar esse problema, o algoritmo *alpha-shape* pode ser explorado. Esse algoritmo é executado no espaço 2D e consiste na seleção dos pontos de bordas considerando o parâmetro α [2]. De acordo com Santos et al. [3], o principal desafio do uso do algoritmo *alpha-shape* está relacionado à seleção de um valor ótimo para o parâmetro α. De forma geral, o valor de α é depende da densidade de pontos e sua variação, bem como do nível de detalhamento desejado.

Na literatura, várias abordagens estimam um valor fixo para α considerando o espaçamento médio dos pontos amostrados. Algumas estratégias utilizam um fator k ($k>1$), o qual é multiplicado pelo valor do espaçamento médio [4]–[6]. No entanto, o uso de um valor fixo pode não ser uma boa escolha, uma vez que a densidade de pontos pode variar ao longo da nuvem de pontos. Desta forma, torna-se interessante adotar uma abordagem adaptativa. Li et al. [7] tentam minimizar esse problema usando dois valores para α. Esse método gera dois contornos para cada edificação, sendo necessário uma etapa adicional para combinar os contornos e obter o resultado final. Santos et al. [8] propuseram a estimação de um parâmetro α para cada edificação, possibilitando minimizar a variação de densidade ao longo da nuvem. Já Santos et al. [9] desenvolveram o método denominado *alpha-shape* adaptativo, onde o parâmetro α é estimado localmente para cada segmento de borda. Esse método se mostrou robusto tanto a variações de densidade ao longo da nuvem quanto a variações dentro da edificação. Apesar dos resultados promissores, o método pode falhar em situações que ocorrem variações abruptas da densidade. Com o intuito de contornar essa limitação, Santos et al. [3] desenvolveram uma abordagem, na qual é feita a combinação de diferentes estratégias para a estimação de α.

Apesar dos avanços, a extração automática de contornos ainda é um assunto em aberto. Isso se deve ao alto grau de complexidade do ambiente urbano, e ao processo de amostragem dos dados LiDAR. Diante disso, esse trabalho tem como objetivo descrever e exemplificar alguns desafios ainda existentes na extração automática de contornos por meio do uso de dados obtidos por sistemas LiDAR aerotransportados.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo e conjunto de dados

Nos experimentos foram selecionadas edificações localizadas na região urbana do município de Presidente Prudente, São Paulo, Brasil. Para tanto, utilizou-se o conjunto de dados LiDAR aerotransportado disponível no *Unesp Photogrammetric Dataset*, o qual disponibiliza nuvens de pontos adquiridas em três diferentes alturas de voo [10]. A aquisição dos dados foi executada pela empresa Sensormap Geotecnologia em 2014, e disponibilizada para acesso público em 2019 por [10] (https://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/unespdataset/home/).

Além dos dados LiDAR, este *dataset* é composto por imagens aéreas, parâmetros de orientação exterior e pontos de apoio.

As nuvens de pontos LiDAR foram obtidas com altura média de voo de 1300 m, 900 m e 550 m, resultando nas densidades médias de 3 pts/m^2, 6 pts/m^2 e 12 pts/m^2, respectivamente. O sistema de varredura a LASER usado na aquisição foi o RIEGL LMS-Q680i, o qual possui um ângulo de cobertura de 60° e utiliza um espelho de varredura do tipo polígono de rotação. Além disso, o sistema tem a capacidade de armazenar múltiplos retornos.

2.2. Extração automática de contornos robusto à variação de densidade

A extração dos contornos foi executada usando o método proposto por Santos et al. [3]. Na Figura 1 é apresentado o fluxograma do método de extração de contornos. Os dados de entrada correspondem aos pontos LiDAR amostrados sobre o telhado da edificação, enquanto que a saída refere-se ao contorno extraído por meio do algoritmo *alpha-shape*. O conjunto de pontos de telhados podem ser obtidos usando alguma técnica de classificação ou software de processamento de dados LiDAR.

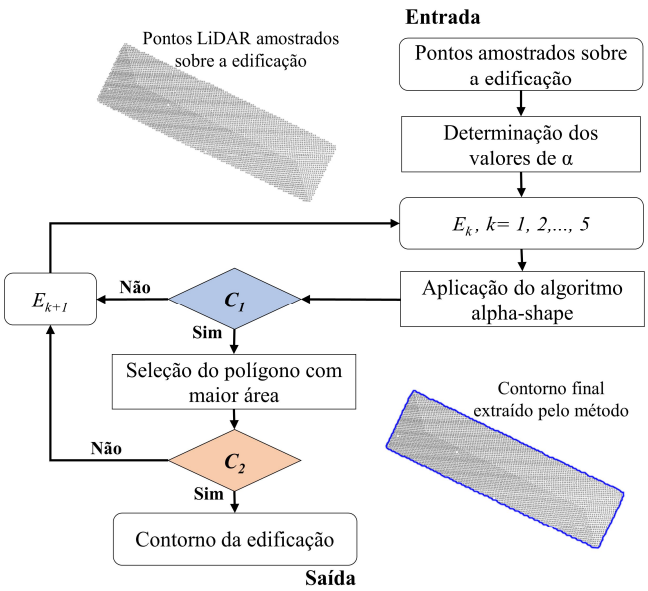


Figura 1. Fluxograma do método de extração de contornos proposto por Santos et al. [3].

A ideia desse método consiste em aplicar de forma sequencial diferentes estratégias (E_k) para seleção do valor do parâmetro α. No total são consideradas cinco estratégias para a estimação do valor de α. Na sequência é apresentada uma breve descrição de cada uma das abordagens.

Estratégia 1 (E_1): Para cada aresta da triangulação de *delaunay* é estimado um valor adaptativo de α. Dados dois pontos de vértices p_i e p_j que compõem uma aresta, o

parâmetro adaptativo $\alpha_{i,j}$ é calculado por meio da média aritmética do espaçamento médio relacionado aos vértices (Equação 1). Para mais detalhes consultar Santos et al.[9].

$$\alpha_{i,j} = \frac{(e^{i}_{med} + e^{j}_{med})}{2} \quad (1)$$

onde e^{i}_{med} e e^{j}_{med} correspondem ao espaçamento médio relacionado aos pontos de vértice p_i e p_j, respectivamente.

Estratégias 2, 3 e 4 (E_2, E_3 e E_4): Um valor fixo de α é estimado para cada edificação baseado no espaçamento médio dos pontos amostrados sobre a edificação de interesse (e_{med_edif}). Nesse sentido, os seguintes valores $\alpha_{edif} = c\ e_{med_edif}$ com $c = 1, 2, 3$ são adotados para as estratégias E_2, E_3 e E_4, respectivamente.

Estratégia 5 (E_5): É adotado $\alpha \rightarrow +\infty$, ou seja, o contorno extraído coincide com o fecho convexo.

3. RESULTADOS

Nessa seção são apresentados os resultados da aplicação do método de extração automática de contornos proposto por Santos et al. [3]. Para a realização dos experimentos foram selecionadas edificações cuja extração é afetada por fatores decorrentes do processo de aquisição e/ou complexidade das edificações.

Na Figura 2, a edificação de interesse foi amostrada por três voos com diferentes alturas, gerando conjuntos com densidade média de 3 pts/m², 6 pts/m² e 12 pts/m². Nessa figura são mostrados os conjuntos de pontos de telhado e os contornos extraídos (Figura 2a-c), bem como a projeção dos contornos sobre a imagem aérea (Figura 2d-f).

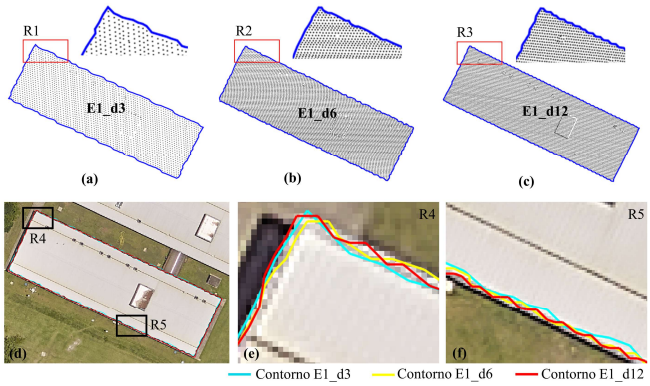


Figura 2. Contornos extraídos sobre conjuntos dados com diferentes densidades: 3 pts/m² (a), 6 pts/m² (b) e 12 pts/m² (c). Contornos projetados sobre a imagem aérea (d-f).

A Figura 3 contém duas edificações curvas, sendo a maior delas parcialmente oclusa por pequenas paredes/muretas, como destacado (setas em ciano) na Figura 3c. Na Figura 4 são apresentados os contornos extraídos e os de referência para as edificações, sendo destacadas duas regiões de oclusão.

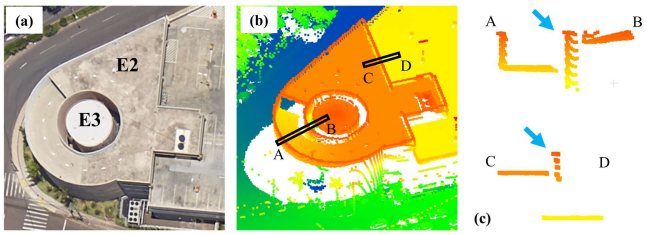


Figura 3. Oclusão provocada por objeto antrópico próximo a edificação. Imagem aérea (a), pontos LiDAR coloridos de acordo com a altura (b), perfis dos segmentos destacados (c).

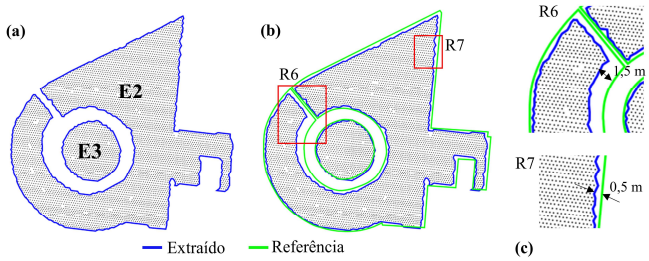


Figura 4. Pontos LiDAR amostrados sobre a edificação e contorno extraído (a). Contorno extraído (azul) e de referência (verde) (b). Recortes R6 e R7, destacando as regiões de oclusão.

Na Figura 5 são mostradas edificações que sofrem oclusão devido à presença de árvores localizadas próximas ao telhado. Na edificação E4 a árvore provoca uma oclusão na parte inferior da edificação, tendo uma extensão aproximada de 6,5 m. Na edificação E5 a oclusão ocorre próximo à quina superior esquerda e se estende até o meio do segmento, tendo uma extensão aproximada de 20 m. Na Figura 5 são apresentados os contornos extraídos e de referência, bem como as imagens áreas correspondentes.

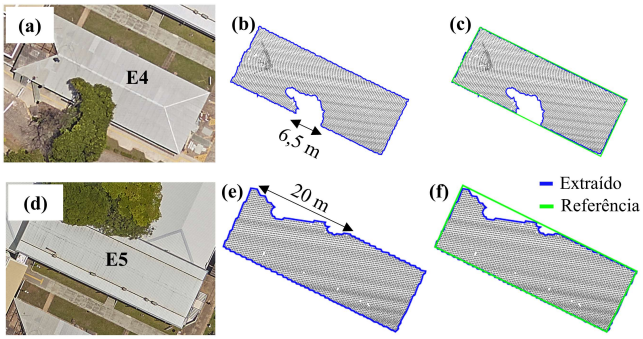


Figura 5. Oclusão provocada por vegetação localizada próxima as edificações. Imagem aérea (a). Pontos LiDAR amostrados sobre os telhados juntamente com o contorno extraído e de referência para edificações E4 (b, c) e E5 (e, f).

Na Tabela 1 são apresentados os valores de área relacionados aos contornos de referência (A_R) e extraído (A_E), a diferença de área ($A_D = A_R - A_E$), e os parâmetros de qualidade: erro relativo em área ($E_{R.A}$) e métrica F_{score}. O contorno de referência foi gerado manualmente por meio de restituição fotogramétrica.

ID	A_R (m^2)	A_E (m^2)	A_D (m^2)	E_R (%)	F_{score} (%)
E1_d3	786,2	775,2	11	1,4	98,3
E1_d6	786,2	780,8	5,4	0,6	98,4
E1_d12	786,2	786,5	-0,2	0	98,5
E2	723,9	630,0	93,9	14,8	93,0
E3	78,2	76,9	1,4	1,3	96,1
E4	454,0	422,0	32,0	7,6	95,8
E5	383,0	347,7	35,4	10	94,9

Tabela 1. Valores da área de referência e extraída, e parâmetros de qualidade.

4. DISCUSSÃO

Analisando os resultados relacionados à edificação 1 (E1), nota-se que a densidade da amostragem tem influência direta na extração dos contornos. Na Figura 2 (d-f) é possível ver as discrepâncias entre os contornos obtidos para os três diferentes conjuntos. Visualmente é possível observar que o contorno extraído sobre o conjunto com maior densidade (12 pts/m^2) está ligeiramente mais próximo da borda real da edificação. Ao comparar os valores da diferença de área (A_D), erro relativo ($E_{R.A}$) e F_{score}, pode-se confirmar essa tendência. O contorno extraído sobre o conjunto de maior densidade (12 pts/m^2) possui uma maior proximidade com o contorno de referência, seguido dos contornos obtidos sobre conjuntos com 6 pts/m^2 e 3 pts/m^2, respectivamente.

A edificação E2 foi parcialmente oclusa por pequenas paredes/muretas localizadas próximas às bordas do telhado (Figura 3). Nos recortes R6 e R7 destacados na Figura 4 é possível verificar a diferença entre o contorno extraído e o de referência. Comparando os recortes, nota-se que em R1 ocorreu uma maior discrepância devido à parede próxima possuir maior altura (destacada pela seta ciano na Figura 3b) e consequentemente provocar uma maior oclusão. A influência da oclusão também pode ser verificada ao analisar os parâmetros de qualidade. A edificação E2, afetada por oclusão, apresentou erro relativo de 14,8% e F_{score} de 93%. Já a edificação E3, não afetada por oclusão, apresentou erro relativo de 1,3 % e 96,1%. Esses resultados indicam a influência negativa da oclusão de objetos antrópicos no contexto da extração automática de contornos.

Na Figura 5 são exemplificados dois casos de oclusão devido à presença de árvores próximas ao telhado. Nota-se que a amostragem é diretamente afetada, ocorrendo a perda de informação da área abaixo da vegetação. Além disso, observa-se que a magnitude da discrepância entre o contorno extraído e de referência está diretamente relacionada com a dimensão da oclusão. Nos casos ilustrados, a edificação E4 apresentou erro relativo de 7,6% contra 10% da edificação E5. Esses resultados apontam para a limitação da extração automática em casos de presença de árvores altas que estão próximas ou sobre os telhados.

5. CONCLUSÕES

Esse trabalho teve o intuito de discutir alguns desafios ainda encontrados na extração automática de contornos de edificações usando dados LiDAR aerotransportado. Em geral, as limitações dos métodos estão relacionadas à dois principais fatores. O primeiro se refere às características do conjunto de dados, tais como: amostragem discreta e a densidade da amostragem. O segundo fator tem relação com a complexidade do ambiente urbano e das edificações, onde é comum a oclusão parcial ou completa dos telhados devido a objetos antrópicos e árvores altas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte do Dep. de Cartografia e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) da Unesp/FCT; à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (Proc. 2019/05268-8 e 2020/12481-7) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Proc. 308474/2019-8).

REFERÊNCIAS

[1] A. Sampath e J. Shan, "Building Boundary Tracing and Regularization from Airborne LiDAR Point Clouds", *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, vol. 73, nº 7, p. 805–812, jul. 2007, doi: 10.14358/PERS.73.7.805.

[2] H. Edelsbrunner, D. Kirkpatrick, e R. Seidel, "On the Shape of a Set of Points in the Plane", *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 29, nº 4, p. 551–559, jul. 1983, doi: 10.1109/TIT.1983.1056714.

[3] R. C. dos Santos, G. G. Pessoa, A. C. Carrilho, e M. Galo, "Automatic Building Boundary Extraction from Airborne LiDAR Data Robust to Density Variation", *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.*, p. 1–5, 2020, doi: 10.1109/LGRS.2020.3031397.

[4] S. Wei, "Building Boundary Extraction Based on LiDAR Point Clouds Data", *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, vol. 37, p. 157–161, 2008.

[5] A. Jochem, B. Höfle, M. Rutzinger, e N. Pfeifer, "Automatic Roof Plane Detection and Analysis in Airborne LiDAR Point Clouds for Solar Potential Assessment", *Sensors*, vol. 9, nº 7, p. 5241–5262, jul. 2009, doi: 10.3390/s90705241.

[6] W. Shen, J. Zhang, e F. Yuan, "A New Algorithm of Building Boundary Extraction Based on LiDAR Data", *in 2011 19th International Conference on Geoinformatics*, Shanghai, China, jun. 2011, p. 1–4. doi: 10.1109/GeoInformatics.2011.5981049.

[7] Y. Li, G. Gao, B. Cao, L. Zhong, e Y. Liu, "Building Boundaries Extraction from Point Clouds Using Dual-threshold Alpha Shapes", *in 2015 23rd International Conference on Geoinformatics*, Wuhan, China, jun. 2015, p. 1–4. doi: 10.1109/geoinformatics.2015.7378619.

[8] R. C. dos Santos, M. Galo, e A. C. Carrilho, "Building Boundary Extraction from LiDAR Data Using a Local Estimated Parameter for Alpha Shape Algorithm", *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, vol. XLII–1, p. 127–132, set. 2018, doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-1-127-2018.

[9] R. C. dos Santos, M. Galo, e A. C. Carrilho, "Extraction of Building Roof Boundaries from LiDAR Data Using an Adaptive Alpha-Shape Algorithm", *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.*, vol. 16, nº 8, p. 1289–1293, ago. 2019, doi: 10.1109/LGRS.2019.2894098.

[10] A. M. G. Tommaselli, M. Galo, T. T. dos Reis, R. da S. Ruy, M. V. A. de Moraes, e W. V. Matricardi, "Development and Assessment of a Data Set Containing Frame Images and Dense Airborne Laser Scanning Point Clouds", *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.*, vol. 15, nº 2, p. 192–196, fev. 2018, doi: 10.1109/LGRS.2017.2779559.