

Revista Brasileira de Cartografia (2016), N° 68/7: 1257-1267
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

SEGMENTAÇÃO DE FACES DE TELHADOS DE EDIFÍCIOS EM DADOS DE VARREDURA A LASER USANDO O MÉTODO RANSAC

*Building Roof Face Segmentation in LASER Scanning Data
using the RANSAC Method*

Michelle Sayuri Yano¹ & Aluir Porfírio Dal Poz²

¹Universidade Estadual Paulista – UNESP
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900, Presidente Prudente/SP, Brasil
michelle.yano@gmail.com

²Universidade Estadual Paulista – UNESP
Departamento de Cartografia
Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900, Presidente Prudente/SP, Brasil
aluir@fct.unesp.br

Recebido em 17 de Maio, 2016/ Aceito em 11 de Junho, 2016
Received on May 17, 2016/ Accepted on June 11, 2016

RESUMO

Este trabalho propõe um método para a segmentação dos planos de telhados de edifícios presentes em dados de varredura a LASER, tendo por base técnicas de processamento de imagem e o método RANSAC. Primeiramente é realizado um pré-processamento da nuvem de pontos a fim de separar os pontos pertencentes a cada edifício. Após isso, o método RANSAC é utilizado para identificar conjuntos de pontos coplanares pertencentes às faces de telhados. O principal diferencial deste trabalho está no desenvolvimento de um método para a determinação automática dos limiares utilizados no método RANSAC na etapa de análise da consistência entre os dados e o modelo hipotético obtido. Como a segmentação via RANSAC pode gerar resultados fragmentados, um pós-processamento é necessário para a junção dos segmentos planares espacialmente próximos e paralelos. Neste trabalho isto é realizado através da determinação de limiares envolvendo a análise de proximidade e orientação. Dois experimentos foram realizados para avaliar o desempenho do método proposto. Em ambos experimentos a média dos valores de completeza e correção ficou acima de 90%, o que mostra que a metodologia proposta funciona adequadamente na segmentação dos planos de telhados, sem a necessidade da especificação de parâmetros durante a etapa de análise de consistência do método RANSAC.

Palavras chaves: Segmentação de Telhados, Dados de Varredura LASER, RANSAC.

ABSTRACT

This research proposes a method for segmentation of building roof planes in LASER scanning point cloud, which is based on image processing techniques and the RANSAC (RANdom SAMple Consensus) method. First, the point cloud is preprocessed for separating point sets that represent buildings. Second, a modified RANSAC method is applied to each building point set in order to detect sets of coplanar points that belong to building roof faces. The main contribution of this paper is the algorithm developed for the automatic determination of RANSAC thresholds used in the consistency analysis between the building points and the realized planar model. As the RANSAC segmentation

can produce fragmented results, a post-processing is usually necessary to merge the planar segments that are spatially close and approximately parallel. In this research, thresholds involving the proximity and orientation analysis are used to perform the post-processing. Two experiments were performed to evaluate the performance of the proposed method. In both experiments the mean values of completeness and correctness was above 90%, which shows that the proposed method works properly in roof planes segmentation, without the necessity of parameters specification during the stage of consistency analysis in RANSAC.

Keywords: Building Segmentation, LASER Scanning Data, RANSAC.

1. INTRODUÇÃO

Com os avanços tecnológicos da Fotogrametria, a comunidade científica vem demonstrando grande interesse nas áreas de extração e reconstrução tridimensional de edifícios a partir de dados remotos, uma vez que a atualização dessas informações é importante para diversas aplicações de SIG (Sistemas de Informações Geográficas) como o planejamento urbano, gestão de desastres (AWRANGJEB *et al.*, 2013) e identificação de sombras em áreas urbanas (FAZAN e DAL POZ, 2010).

Até meados da década de 1990, os dados disponíveis para a extração e reconstrução de edifícios eram as imagens aéreas de alta resolução. No entanto, no final dessa mesma década, novas fontes de dados passaram a ser utilizadas, destacando-se os dados de varredura a LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiance*). Essa nova fonte de dados se revelou mais eficaz em alguns aspectos, se comparado com as imagens aéreas. Quando se trata da obtenção de planos de telhados e sua orientação, os dados LASER apresentam melhores resultados, uma vez que as informações altimétricas são melhores nesse tipo de dado, enquanto que em imagens os planos de telhados são radiometricamente homogêneos, o que dificulta a obtenção de informação posicional densa ao longo deles com o uso de técnicas fotogramétricas. Entretanto, quando se trata da obtenção dos contornos de telhados, a integração entre dados LASER e imagens aéreas apresenta resultados mais refinados, como pode ser visto em Dal Poz (2014).

A reconstrução tridimensional de edifícios a partir de dados LASER pode ser realizada a partir de duas abordagens, denominadas *model-driven* e *data-driven* (TARSHA-KURDI *et al.*, 2008). O *model-driven* baseia-se na procura do modelo mais adequado entre modelos primitivos de edifícios existentes em uma biblioteca de

modelos. Os métodos baseados nessa abordagem consideram que uma primitiva de edifício pode ser descrita por um conjunto de parâmetros, o que implica no cálculo dos valores desses parâmetros para a construção tridimensional do modelo. Já o *data-driven* busca modelar cada parte da nuvem de pontos do edifício a fim de obter o melhor modelo poliédrico, fornecendo assim modelos mais universais. Nos métodos baseados nessa abordagem, a detecção dos planos dos telhados é uma operação crucial (TARSHA-KURDI *et al.*, 2008).

Diversos métodos são propostos para a realização da detecção de planos de telhados, como por exemplo, crescimento de regiões, Transformada de Hough 3D e RANSAC. Tarsha-Kurdi *et al.* (2007) apresentam um estudo e comparações entre os métodos de Transformada de Hough 3D e RANSAC, uma vez que o método de crescimento de regiões algumas vezes não é aplicado homogeneamente. Em termos de tempo de processamento e sensibilidade em relação às características da nuvem de pontos LASER, o estudo de Tarsha-Kurdi *et al.* (2007) mostrou que apesar da limitação encontrada em ambos os métodos, o algoritmo RANSAC é ainda mais eficiente que o outro.

Diversos autores tem apresentado o paradigma RANSAC como base para a detecção dos planos de telhados. Constantino e Angelini (2011) propõem um método automático para a extração de feições presentes em dados LASER. Primeiro os pontos de terreno são separados dos pontos de objetos altos através dos processos de filtragem e classificação, após isso, aplica-se o método RANSAC para detectar e extrair os planos de telhados de edifícios. No trabalho de Chen *et al.* (2012) é proposta a segmentação de telhados de edifícios em dados LASER a partir da separação dos pontos de terreno e não terreno através de filtros morfológicos, aplicação do método de crescimento de

regiões para separar os pontos de edifícios dos pontos de vegetação, e por fim, uso de um método RANSAC adaptado para aumentar a probabilidade de selecionar amostras de pontos de telhado que não foram detectadas anteriormente. Yan *et al.* (2012) apresentam um estudo da qualidade do algoritmo RANSAC para a segmentação dos planos de telhados em dado LASER. Os resultados desse estudo mostraram que os problemas do RANSAC básico podem ser melhorados, no entanto, ainda há muitas questões que precisam de um estudo aprofundado. Tsai e Chang (2014) propõem um método para a reconstrução de modelos 3D de edifícios utilizando o método RANSAC durante o processo de geração dos planos.

Nesse contexto, este trabalho propõe a detecção de segmentos de planos representando faces de telhados, tendo por base o método RANSAC. O principal diferencial deste trabalho está no desenvolvimento de um método para a determinação automática dos limiares utilizados no método RANSAC na etapa de análise da consistência entre os dados e o modelo hipotético obtido. Segundo Yan *et al.* (2012), a segmentação planar via RANSAC pode gerar os seguintes tipos de segmentos planares: planos não segmentados (planos que fazem parte de uma superfície plana, mas não são segmentados), superfícies super segmentadas (quando um plano é segmentado em dois ou mais planos), superfícies subsegmentadas (quando dois planos são classificados como sendo apenas um) e os planos espúrios. Dessa forma, este trabalho também propõe um pós-processamento para a junção dos planos super segmentados, através da determinação de limiares relacionados com o conceito de continuidade, envolvendo a análise de proximidade e orientação.

2. MÉTODO

O método proposto é dividido em três etapas principais: 1) O pré-processamento da nuvem de pontos LASER, que tem como objetivo a separação dos pontos pertencentes aos telhados dos demais pontos da nuvem de pontos LASER, bem como a separação da nuvem de pontos de cada telhado; 2) A segmentação das faces desses telhados através do método RASANC adaptado para o caso da feição “Plano”; e 3) O refinamento da segmentação realizada, com o intuito de juntar

fragmentos planares pertencentes às mesmas faces de telhado, proporcionando assim uma segmentação mais robusta.

2.1 Pré-processamento da nuvem de pontos LASER

Como dito anteriormente, a etapa de pré-processamento dos dados LASER tem como objetivo a separação dos pontos pertencentes aos telhados dos demais pontos da nuvem de pontos LASER, bem como a separação da nuvem de pontos de cada telhado. Com isso é possível evitar a busca exaustiva de segmentos de planos em toda a nuvem de pontos LASER, e possibilitar a análise separada de cada telhado. O que diminui significativamente o esforço computacional, e evita a junção de segmentos de telhados diferentes, mas coplanares.

Nesta etapa são utilizadas as nuvens de pontos LASER estruturadas de duas formas, malha regular e irregular. Primeiramente, nas duas malhas são aplicadas ferramentas de filtragem e classificação do aplicativo *LAStools*, com o objetivo de se obter somente os pontos pertencentes aos telhados. Para iniciar a filtragem, a ferramenta *LASground* é aplicada à nuvem de pontos LASER. Essa ferramenta gera uma malha irregular a partir da nuvem de pontos de entrada e, a partir disso, classifica os pontos em “terreno” e “não-terreno”. Em seguida, aplica-se a ferramenta *LASheight* para calcular a altura de cada ponto LASER acima da superfície do terreno. Essa ferramenta filtra os pontos classificados como “terreno” pelo *LASground*, gera um TIN formado por esses pontos de “terreno”, e calcula a elevação de cada ponto “não-terreno” em relação a esse TIN. A opção *replace_z* disponibilizada por essa ferramenta permite que as altitudes dos pontos sejam substituídas pelas alturas normalizadas calculadas, obtendo-se o denominado Modelo Digital de Superfície normalizado (MDSn) que representa no plano os objetos acima da superfície terrestre. O próximo passo é classificar as regiões altas através da ferramenta *LASclassify*. Essa ferramenta exige que os pontos de “terreno” já tenham sido identificados pelo *LASground* e que a altura normalizada de cada ponto já tenha sido calculada pelo *LASheight*. Essencialmente, a ferramenta procura classificar as regiões altas em edifício ou vegetação, através

da análise da altura, planaridade, e rugosidade de uma vizinhança. Por fim, o *LAStools* permite salvar os pontos separadamente segundo sua classificação, o que possibilita a obtenção da nuvem de pontos contendo somente os pontos das regiões de telhado.

Após isso, em relação à malha regular, é realizada a detecção das bordas desses telhados, e a vetorização e poligonização dessas bordas, gerando polígonos representando os contornos desses telhados. Para isso, o resultado do passo anterior é transformado em uma malha binária, atribuindo o valor 1 para pontos de telhado e o valor 0 para os demais pontos. Com isso, as máscaras de diferenciação de Canny (e) são suficientes para realizar, de forma simples e eficiente, a detecção dos *groundels* (termo utilizado em analogia ao termo pixel, denotando elemento de terreno – *ground elements* (HELAVA, 1988)) correspondentes às bordas desses telhados. Como os *groundels* de bordas não estão ordenados nos mapas de bordas obtidos no passo anterior, a ferramenta ‘gen_contour_region_xld’ do aplicativo Halcon é utilizada para vetorizar esses *groundels* via algoritmo de vetorização de contornos, resultando em listas ordenadas de *groundels* de borda. Em seguida, o algoritmo de poligonização por divisão recursiva é utilizado para substituir as listas ordenadas de *groundels*, obtidas pela vetorização, por polígonos representando os contornos dos telhados. Isso é realizado através da ferramenta ‘gen_polygons_xld’ também do aplicativo Halcon.

Esses polígonos são então utilizados para delimitar a região dos pontos de cada telhado obtidos a partir da malha irregular, e assim, proporcionar a nuvem de pontos separada de cada telhado. Isso é feito a partir de um programa implementado no aplicativo Matlab, o qual utiliza a ferramenta ‘inpolygon(X, Y, X_pol, Y_pol)’ para detectar os pontos que estão dentro de um dado polígono, e assim, obter a nuvem de pontos separada de cada telhado.

2.2 Segmentação inicial dos planos de telhados a partir do método RANSAC

A segmentação inicial dos planos de telhados dos edifícios obtidos na etapa de pré-processamento é realizada a partir do método RANSAC adaptado para o caso da feição

“Plano”. As 5 etapas do algoritmo RANSAC adaptado para o método proposto são descritas a seguir.

a) Seja o modelo hipotético “Plano” dado pela equação , que requer $n = 3$ observações para ser realizado e o conjunto P de todas as observações (nuvem de pontos LASER), tal que $\#P \geq n$.

b) Selecionar randomicamente um sub-conjunto SI com 3 pontos e determinar os três parâmetros do “Plano” (A, B, C) formado por esses 3 pontos. Cada ponto fornece uma equação, assim, a determinação dos parâmetros é realizada através da solução de um sistema linear com 3 equações e 3 incógnitas, a partir de algum método numérico de solução de sistemas lineares. No caso deste trabalho o método de Decomposição LU é utilizado para a solução do sistema.

c) Usar o “Plano” obtido para determinar o conjunto consenso SI^* , tal que SI^* contenha os pontos consistentes com esse “Plano”. Dois parâmetros são analisados para determinar se um ponto é consistente ou não com o “Plano”: distância e ângulo. E essa análise é feita baseando-se na ideia de que se o “Plano” estiver correto, o histograma gerado terá forma semelhante ao apresentado na Figura 1(a), com o pico à esquerda sendo correspondente aos pontos consistentes com o “Plano”. Caso contrário, se o “Plano” for incorreto, o histograma terá forma semelhante ao apresentado na Figura 1(b), onde esses picos não ocorrem. A seguir são apresentados os passos para a determinação dos parâmetros de distância e angular.

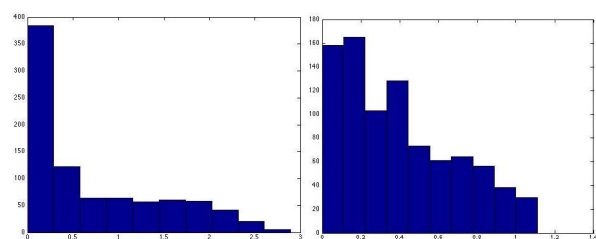


Fig. 1 – (a) “Plano” correto. (b) “Plano” incorreto.

Parâmetro de distância: a distância d entre o ponto e o “Plano” deve ser menor que um dado limiar. A determinação deste limiar é realizada de forma automática para cada edifício com base nos histogramas gerados a partir dos valores de distância entre os pontos e o “Plano”. Para isso, os seguintes passos são realizados:

- Calcular os valores de distância entre o “Plano” e todos os pontos.
- Construir um histograma com esses valores, com largura de classe iniciando em 15 cm, e incrementar de 2 em 2 cm até que a frequência da primeira classe seja 70% maior que da segunda classe. Se essa diferença de frequência não ocorrer até a largura de classe atingir 30 cm, significa que o “Plano” não está correto, e assim, outros 3 pontos são selecionados e retorna-se à Etapa 2 do algoritmo RANSAC.
- Por fim, se o “Plano” for correto, o limiar de distância para esse “Plano” será a largura da classe do último histograma.

Parâmetro angular: o ângulo θ entre vetor normal do ponto e o vetor normal ao “Plano” deve ser menor que um dado limiar. A determinação deste limiar também é realizada de forma automática para cada “Plano”, de maneira análoga ao limiar de distância, tendo como base os histogramas dos valores de diferença angular entre os vetores normais de cada ponto e do “Plano”. Para isso, os seguintes passos são realizados:

- Calcular os valores de diferença angular entre os vetores normais de cada ponto e do “Plano”
- Construir um histograma com esses valores, com largura de classe iniciando em 1° , e incrementar de 1° em 1° até que a frequência da primeira classe seja 70% maior que da segunda classe. Se essa diferença de frequência não ocorrer até a largura de classe atingir 10° , significa que o “Plano” não está correto, e assim, outros 3 pontos são selecionados e retorna-se à Etapa 2 do algoritmo RANSAC.
- Por fim, se o “Plano” for correto, o limiar de distância para esse “Plano” será a largura da classe do último histograma.

O vetor normal de cada ponto é obtido conforme os seguintes passos: 1) geração de um TIN da nuvem de pontos do telhado; 2) cálculo do vetor normal à cada face triangular do TIN; 3) cálculo do vetor normal de cada ponto (vértice do TIN) a partir da média dos vetores normais dos triângulos adjacentes a esse ponto.

d) Se $\#SI^*$ for maior que um limiar t , usar SI^* para restabelecer um novo “Plano”; ao contrário, se $\#SI^*$ for menor que o limiar t , selecionar um

novo subconjunto $S2$, tal que $\#S2 = n$, e voltar à Etapa 2.

e) Em caso de sucesso, eliminar o subconjunto consensual SI^* de P e repetir o processo acima até que não seja possível achar um novo plano na região; caso contrário, encerrar porque nenhum plano foi encontrado na região.

2.3 Refinamento da segmentação

O processo de segmentação realizado na etapa anterior pode produzir distintos segmentos referentes a um mesmo plano, dessa forma, é necessário detectar e conectar esses segmentos planares a fim de gerar uma segmentação mais completa. Essa ideia é caracterizada matematicamente via verificação dos seguintes limiares:

Limiar angular: as orientações dos segmentos planares em análise devem ser bem próximas. Em outras palavras, os vetores normais aos segmentos planares devem ser paralelos, a menos de um limiar. Esse limiar foi determinado empiricamente resultando no valor de 1° .

Limiar de separação planar na direção normal: se dois segmentos planares pertencem a uma mesma face de telhado, então a separação entre ambos na direção da normal não deve ser muito maior que a precisão vertical do posicionamento LASER (± 10 cm). Sendo assim, esse limiar foi estabelecido como sendo a precisão vertical do posicionamento LASER com uma tolerância de 50%, o que resultou em um limiar de 15 cm. A separação planar na direção normal é calculada a partir da distância entre um ponto qualquer de um segmento planar em relação ao outro segmento planar.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção são apresentados o material utilizado neste trabalho, a forma de análise dos experimentos e, por fim, a descrição dos experimentos realizados e análise dos resultados.

3.1 Material utilizado

Para a avaliação experimental da metodologia proposta, os seguintes dados foram utilizados:

- Nuvem de pontos LASER da região urbana de Presidente Prudente/SP, com densidade de média de 8 pontos/ m^2 ;
- Imagens aéreas da região urbana de Presidente

Prudente/SP, com GSD de 0,12 m.

- Para a implementação da metodologia proposta, os seguintes recursos de software foram utilizados:
- LAStools da Rapidlasso;
- Matlab da Math Works;
- C/CodeBlocks da The CodeBlocks Team;
- LPS (Leica Photogrammetry Suite) da Leica Geosystems;
- Microstation da Bentley.

3.2 Forma de análise dos resultados

Os resultados foram analisados qualitativa e quantitativamente. A análise qualitativa foi realizada a partir da inspeção visual dos polígonos de cada face extraída dos telhados, sobrepostos na imagem aérea com o auxílio do aplicativo LPS. A análise quantitativa foi feita através do cálculo dos parâmetros de completeza e correção, utilizando como referência os polígonos das faces extraídas manualmente a partir da restituição da imagem aérea do telhado, realizada através do aplicativo LPS. O parâmetro de completeza se refere à porcentagem da área de referência que foi extraída pelo método, e o parâmetro de correção está relacionado à quanto da área extraída está correta (FAZAN, 2014). A seguir são apresentadas as equações utilizadas para o cálculo da completeza e correção:

$$completeza = \frac{A_{E \cap R}}{A_R} 100\% \quad (1)$$

$$correção = \frac{A_{E \cap R}}{A_E} 100\% \quad (2)$$

onde:

- é a área do polígono resultante da intersecção entre os polígonos que descrevem os contornos das faces do telhado extraído e de referência;
- é a área do polígono correspondente ao contorno da face do telhado de referência;
- é a área do polígono correspondente ao contorno da face do telhado extraído.

3.3 Avaliação experimental

A validação experimental da metodologia proposta foi realizada a partir de dois experimentos com graus distintos de dificuldade. A seguir são apresentadas as descrições dos dois experimentos

e a discussão dos resultados obtidos.

3.3.1 Experimento 1

A área de estudo do Experimento 1 é composta por três edifícios. A Figura 2 apresenta a rotulação estabelecida para cada edifício e para cada face dos telhados. O Edifício 1 é composto por duas faces e possui formato retangular. O Edifício 2 possui quatro faces e também formato retangular. Por fim, o Edifício 3 é composto por 7 faces e possui a forma semelhante à letra “T”.

A Figura 3(a) apresenta a nuvem de pontos segmentada onde, para cada edifício, cada cor representa um conjunto de pontos coplanares identificados. É possível notar que o processo de segmentação deixou lacunas na nuvem de pontos segmentada. Essas lacunas se devem aos pontos amostrados sobre objetos no telhado ou anomalias na nuvem de pontos, cujos vetores normais não obedecem ao critério de paralelismo, e assim, não foram considerados pertencentes a algum plano. No Edifício 1 e Edifício 3, essas lacunas são causadas pela presença de antena e algum tipo de objeto sobre o telhado, como pode ser visto na Figura 3(b) e Figura 3(c) respectivamente.

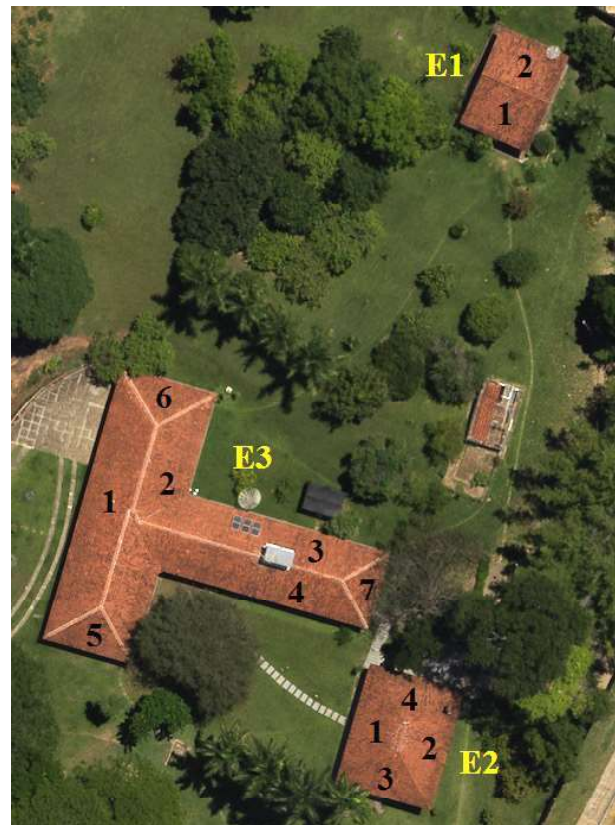
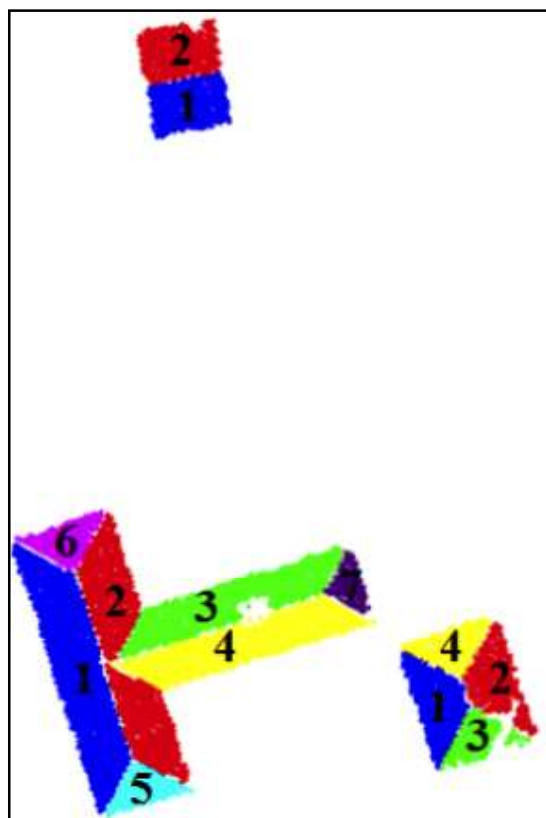


Fig. 2 – Imagem aérea da região de estudo do Experimento 1.

A Figura 4(a) apresenta os contornos de referência sobrepostos na imagem aérea. A Figura 4(b) mostra os contornos extraídos pelo método e sobrepostos na imagem aérea. A análise visual dos resultados a partir da Figura 4(b) mostra que todos os planos dos telhados foram segmentados com sucesso. Vale ressaltar que a geração dos polígonos a partir dos planos segmentados pelo método proposto, para a etapa de análise dos resultados, não levou em conta os espaços sem pontos LASER dos telhados.

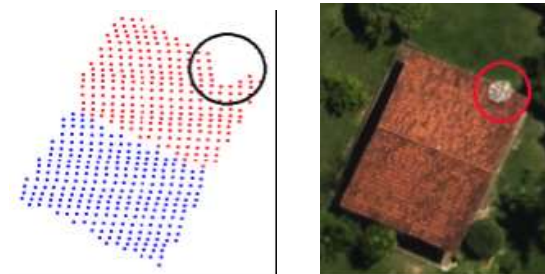
A análise numérica dos resultados a partir da Tabela 1 mostra que a segmentação das faces dos telhados foi realizada com sucesso pelo método proposto, com a média dos valores de completeza e correção acima de 90% para todos os casos.



(a)

Tabela 1: Parâmetros de completeza e correção do Experimento 1

Face	Edifício 1	
	Completeza (%)	Correção (%)
1	90,20	96,82
2	93,40	92,33
Média	91,80	94,57
Face	Edifício 2	
	Completeza (%)	Correção (%)
1	93,22	94,30
2	88,66	84,86
3	94,53	91,67
4	91,40	91,58
Média	91,95	90,60
Face	Edifício 3	
	Completeza (%)	Correção (%)
1	95,12	93,87
2	92,30	95,96
3	89,40	90,32
4	93,14	93,96
5	90,86	89,94
6	91,01	87,11
7	84,48	92,24
Média	90,90	91,91



(b)



(c)

Fig. 3 – (a) Nuvem de pontos segmentada. (b) Antena no Edifício 1. (c) Objeto retangular no Edifício 3.

No caso do Edifício 1, o menor valor de completeza ocorreu para a Face 1 com 90,20%, e como pode ser visto na Figura 4(b) a área extraída dessa face foi um pouco menor que a face do telhado de referência, justificando o valor mais baixo de completeza. O parâmetro de correção avalia o

quanto da área extraída está correta em relação à área de referência. Assim, como a área extraída da Face 1 foi menor que a área de referência, maior foi a chance da área extraída estar contida na área de referência, com isso o parâmetro de correção da Face 1 (96,82%) foi maior em relação à Face 2 (92,33%).

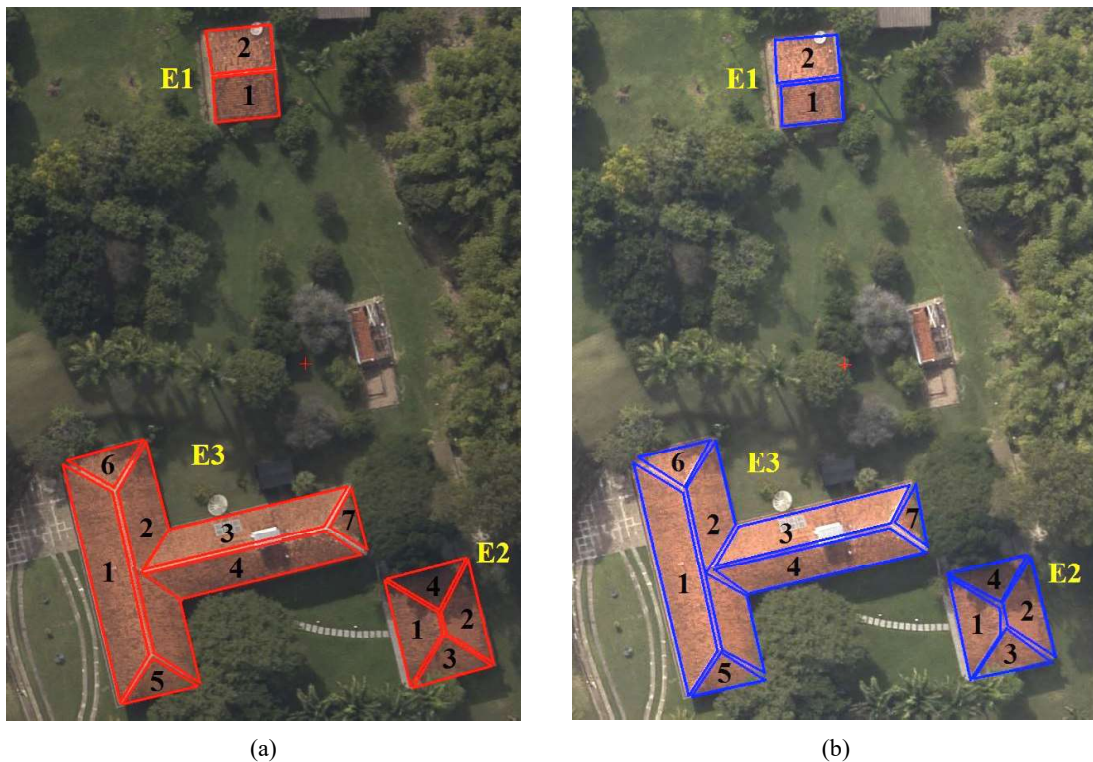


Fig. 4 – (a) Polígonos de referência sobrepostos na imagem aérea. (b) Polígonos extraídos pelo método e sobrepostos na imagem aérea.

No caso do Edifício 2, a Face 2 obteve o menor valor de completude (88,66%) e de correção (84,86%). Como pode ser observado na Figura 4(b), o lado da Face 2 que faz divisa com a Face 3 não foi segmentado corretamente, o que afetou os valores dos parâmetros.

No caso do Edifício 3 o menor valor de completude ocorreu na Face 7 (84,48%) e o menor valor de correção ocorreu na Face 6 (87,11%). Em ambos os casos isso ocorreu devido à presença de árvores cobrindo parte do telhado, o que prejudicou a restituição e segmentação das faces.

3.3.2 Experimento 2

A Figura 5 apresenta a área de estudo do Experimento 2, bem como a rotulação estabelecida para cada edifício e para cada face dos telhados. O Edifício 1 é composto por duas faces e possui forma semelhante à letra “H”. O Edifício 2 possui oito faces e formato retangular.

A Figura 6(a) apresenta a nuvem de pontos segmentada onde, para cada edifício, cada cor representa um conjunto de pontos coplanares identificados. Nessa amostra também é possível notar que o processo de segmentação deixou lacunas na nuvem de pontos segmentada. No

Edifício 1 essas lacunas ocorrem na parte inferior da Face 1 e na lateral da Face 2, e são decorrentes de pontos amostrados sobre árvores cobrindo parte do telhado. No Edifício 2 as lacunas ocorrem nas Faces 2 e 8, e são decorrentes de anomalias na nuvem de pontos LASER, as quais foram observadas na visualização tridimensional da nuvem de pontos, no entanto, não foram constatadas durante a visualização estereoscópica das imagens aéreas.

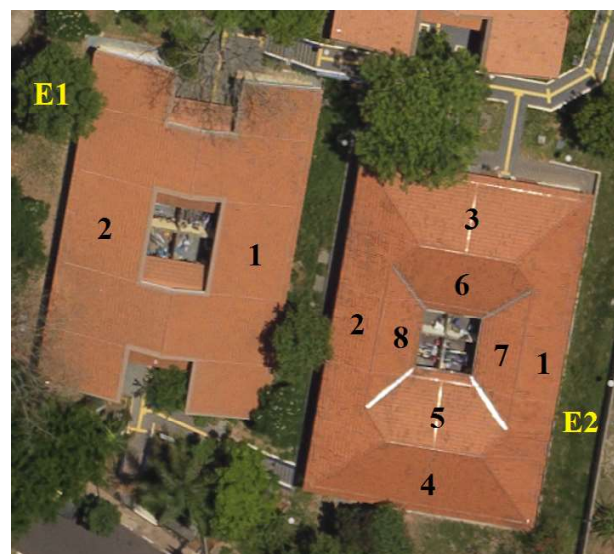


Fig. 5 – Imagem aérea da região de estudo do Experimento 2.

A Figura 6(b) apresenta os contornos de referência sobrepostos na imagem aérea, e a Figura 6(c) apresenta os contornos extraídos e sobrepostos na imagem aérea. Vale ressaltar que, com exceção da lacuna na parte inferior da Face 1 do Edifício 1, todas as outras lacunas não foram consideradas na etapa de geração dos polígonos para a análise dos resultados. A análise visual a partir da Figura 6(c) mostra que a segmentação dos planos dos telhados foi realizada com sucesso. No entanto, nota-se que as Faces 1 e 5 do Edifício 2 foram bastante afetadas pelas irregularidades dos vetores normais nos pontos de cumeeira e próximos a ela.

A análise numérica dos resultados (Tabela 2) mostra que os planos dos telhados foram segmentados com sucesso pelo método proposto. A média dos valores de completude e correção foram maiores que 90% para os dois edifícios.

No Edifício 1 as duas faces obtiveram valores de completude e correção altos e muito próximos, mesmo a Face 1 contendo lacuna na parte inferior e uma pequena falha na segmentação da parte superior, como por ser observado na Figura 6(c).

No Edifício 2 o menor valor de completude ocorreu na Face 7 (78,74%) e de correção na Face 8 (89,20%). O que mostra que as falhas na detecção das Faces 1 e 5 citadas anteriormente, não afetaram os parâmetros de completude e correção.

Tabela 2: Parâmetros de completude e correção do Experimento 2

Face	Edifício 1	
	Completude (%)	Correção (%)
1	92,16	99,40
2	93,77	99,41
Média	92,96	99,40
Face	Edifício 2	
	Completude (%)	Correção (%)
1	98,75	94,45
2	96,19	98,60
3	96,85	98,31
4	98,05	93,73
5	90,79	97,43
6	99,87	89,82
7	78,74	98,99
8	99,63	89,20
Média	94,85	95,06

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto um método para a segmentação das faces de telhados de edifícios presentes em dados de varredura a LASER, tendo como base o método RANSAC. Um pré-processamento foi realizado para obter as nuvens de pontos contendo apenas os pontos pertencentes aos telhados de edifícios. Posteriormente, o método RANSAC foi aplicado com o intuito de segmentar os planos desses telhados.

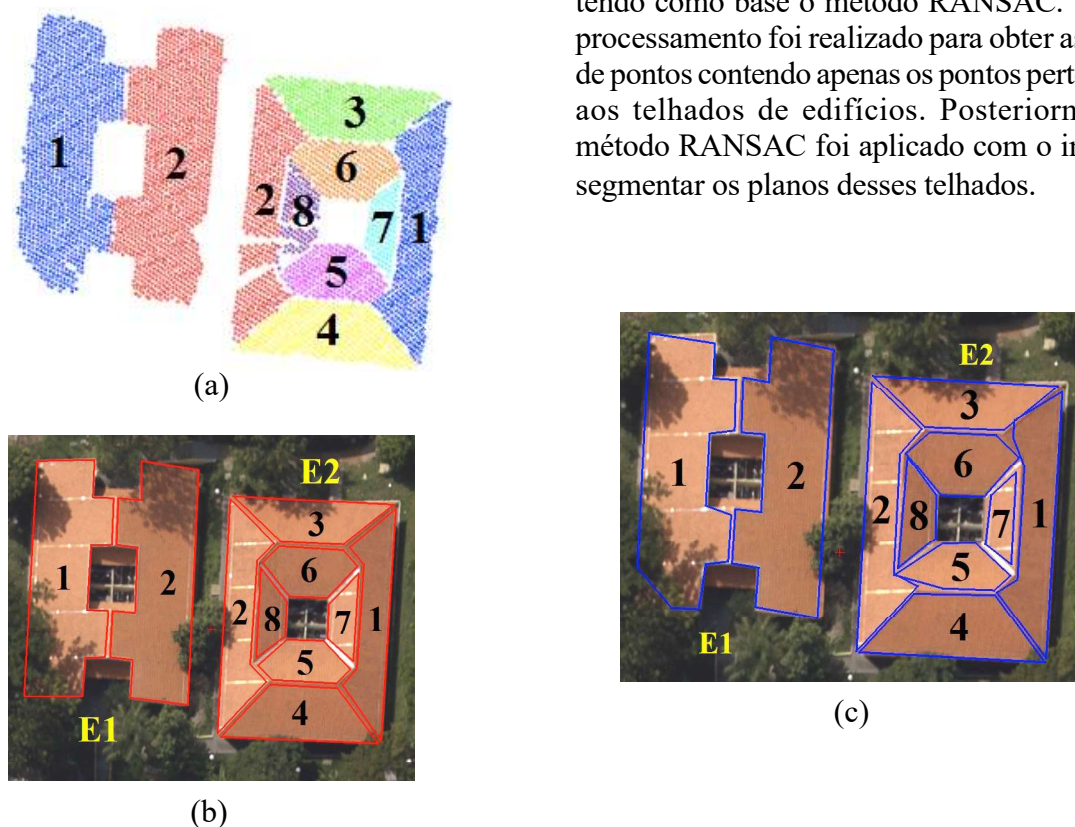


Fig. 6 – (a) Nuvem de pontos segmentada. (b) Polígonos de referência sobrepostos na imagem aérea. (c) Polígonos extraídos pelo método, sobrepostos na imagem aérea.

O principal diferencial deste trabalho foi a elaboração de um método para a determinação automática dos limiares utilizados pelo método RANSAC durante a etapa de análise da consistência entre os pontos e o modelo hipotético obtido. Isso foi feito através da análise de limiares de distância e ângulo obtidos com base em histogramas, como explicado na Seção 2.2. Como o processo de segmentação pode produzir distintos segmentos referentes a um mesmo plano, também foi realizada uma etapa de pós-processamento para detectar e conectar esses segmentos planares a fim de gerar uma segmentação mais completa.

A avaliação do método proposto foi realizada a partir da análise visual dos resultados, através da sobreposição dos contornos extraídos dos planos sobre a imagem aérea; e a partir da análise numérica, através do cálculo dos parâmetros de completeza e correção.

No primeiro experimento foi possível observar que o processo de segmentação deixou lacunas na nuvem de pontos segmentada. Essas lacunas foram causadas por pontos amostrados sobre objetos no telhado ou anomalias na nuvem de pontos LASER. Esse resultado mostra a coerência do método proposto, uma vez que os vetores normais desses pontos certamente não seguem ao padrão de um plano. No segundo experimento o processo de segmentação também deixou lacunas na nuvem de pontos segmentada. Essas lacunas foram causadas por árvores que cobriam parte do telhado e por anomalias na nuvem de pontos LASER.

Dessa forma, pode-se concluir que os resultados obtidos foram satisfatórios, mostrando que o método proposto é capaz de segmentar as faces dos telhados dos edifícios sem que haja a necessidade de especificação dos parâmetros na etapa da análise de consistência do algoritmo RANSAC. O método proposto é eficiente em não detectar pontos cujos vetores normais não obedecem ao critério de paralelismo, como pontos amostrados sobre antenas e cumeeiras. Além disso, o método proposto se mostrou eficaz ao tratar das segmentações fragmentadas a partir da etapa de pós-processamento, tendo como resultado final nenhuma face fragmentada.

Para melhorar o desempenho do método proposto recomenda-se para trabalhos futuros o desenvolvimento de um método para automatizar

a determinação dos demais parâmetros do método RANSAC; acrescentar na etapa de pós-processamento métodos para detectar regiões planas não segmentadas e juntá-las aos planos que as contêm; e estender o método para a reconstrução completa do telhado a partir da determinação das cumeeiras e regularização dos contornos do telhado.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas – FCT/UNESP, à FAPESP pela concessão da bolsa de mestrado do primeiro autor (nº processo 2013/16452-8), à Sensormap pelo fornecimento dos dados de varredura a LASER, e à Engemap pelo fornecimento das imagens aéreas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AWRANGJEB, M.; ZHANG, C.; FRASER, C. S. Automatic extraction of building roofs using LIDAR data and multispectral imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 83, p. 1-18, 2013.

CHEN, D.; ZHANG, L.; LI, J.; LIU, R. Urban building roof segmentation from airborne lidar point clouds. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 20, p. 6497-6515, 2012.

COSTANTINO, D.; ANGELINI, M. G. Features and ground automatic extraction from airborne lidar data. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 38, p. 19-24, 2011.

DAL POZ, A. P. Refinamento fotogramétrico de contornos de telhado extraídos de dados de varredura a LASER. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, p. 1135-1144, 2014.

FAZAN, A. J.; DAL POZ, A. P. Compensação de sombras de edifícios usando imagens aéreas de alta resolução de dados de varredura a LASER. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 62, p. 433-440, 2010.

FAZAN, A. J. **Extração de contornos de telhados de edifícios no espaço-objeto baseada em snakes e programação dinâmica a partir de TIN/LASER e imagens aéreas de alta resolução**. Tese (doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista,

Presidente Prudente, 2014.

FISCHLER, M.; BOLLES, R. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. **Communications of the ACM**, v. 24, p. 381-395, 1981.

HELAVA, U. V. Object space least squares correlation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, p. 711-714, 1988.

TARSHA-KURDI, F.; LANDES, T.; GRUSSENMEYER, P. Hough-transform and extended RANSAC algorithms for automatic detection of 3D building roof planes from lidar data. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing**, v. 36, p. 407-412, 2007.

TARSHA-KURDI, F.; LANDES, T.; GRUSSENMEYER, P. Extended RANSAC algorithm for automatic detection of building roof planes from lidar data. **The Photogrammetry Journal of Finland**, v. 21, n. 1, p. 97-109, 2008.

TSAI, F.; CHANG, H. Evaluations of three-dimensional building model reconstruction from lidar point clouds and single-view perspective imagery. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 40, p. 597-600, 2014.

YAN, J.; JIANG, W.; SHAN, J. Quality analysis on RANSAC-based roof facets extraction from airborne lidar data. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 39, p. 367-372, 2012.