

Extração de segmentos de contornos e cumeeiras de telhados de edifícios em imagens aéreas de alta resolução

Vanessa Jordão Marcato ¹
Aluir Porfírio Dal Poz ¹

¹Faculdade de Ciências e Tecnologias FCT – UNESP/SP
Caixa Postal 468 - 19060-900 – Presidente Prudente - SP, Brasil
vanessamarcato@yahoo.com.br
aluir@fct.unesp.br

Abstract. In this paper, a methodology is proposed for building roof contours and ridges automatic extraction using laser data and high-resolution aerial images. The projection of 3D structures of building onto the image-space is used in order to facilitate the identification of straight features corresponding to building roofs and ridges in this image. First of all the building roof contours and ridges previously extracted from laser data, are projected onto an aerial image. Projected lines are useful to delimit areas where building roof contours and ridges can be found. To extract the building roof contours and ridges from the image, which appear, respectively, as step edges and lines, Canny and Steger detectors need to be selected properly. The Canny detector extracts efficiently the step edges whereas through the use Steger detector is possible to accurately accomplish the line extraction. Thus, it is necessary to identify the situations where are required to retain the results obtained by the Canny edge detector and by the Steger line detector. An experimental evaluation was performed and the results showed that the methodology works successfully in the task of eliminating the duplicity in the Canny detector answers through the use, in this case, of Steger detector answers.

Palavras-chave: Canny detector, Steger detector, building extraction, detector de Canny, detector de Steger, extração de edifícios.

1. Introdução

As pesquisas na área de extração de feições em imagens digitais são desenvolvidas nas mais variadas comunidades científicas desde a década de 1960. Segundo Mayer (1999), as pesquisas na área de extração de edificações iniciaram-se na primeira parte da década de 1980, tendo por base dados de imagem de alta resolução, visto que o objetivo era a reconstrução detalhada de edificações. Nas décadas de 1980 e 1990 foram utilizadas quase que exclusivamente imagens aéreas. Já no final da década de 1990, essa situação mudou com o surgimento dos satélites de imageamento de alta-resolução e dos sistemas de varredura a laser.

Uma tendência atual de pesquisa é a combinação de dados laser com dados de outros sensores (imagens aéreas e de satélite) visando à extração automática ou semi-automática, de forma acurada e confiável, de objetos tais como edifícios e vias. Várias metodologias dessa classe podem ser encontradas na literatura. Como por exemplo, Hala e Brenner (1999) combinaram imagens multiespectrais e dados MDE/LASER (Modelo Digital de Elevação gerado a partir de dados laser) para separar edifícios de vegetação. Sohn e Dowman (2003) sugeriram uma outra metodologia, em que inicialmente os edifícios são extraídos separadamente de uma imagem Ikonos e de dados MDE/LASER e, em seguida, ambos os resultados são combinados para a remoção de inconsistências. E Machado e Mitishita (2006) combinaram imagens aéreas de pequeno formato e dados laser para extrair contornos de telhados. Seguindo esta tendência, esse trabalho apresenta uma metodologia para a extração automática de contornos e cumeeiras de telhados a partir de dados laser e de imagens aéreas de alta-resolução. Esta metodologia utiliza projeções no espaço-imagem de estruturas 3D de edifícios, extraídas de dados laser, para facilitar a extração na imagem de contornos e cumeeiras de telhados. Esse processo de análise de imagem inicia com a detecção de descontinuidades, as quais, para o caso em questão, manifestam-se como bordas degrau (step edges) ao longo de contornos de telhados e como linhas ao longo de cumeeiras. Essa pesquisa

propõe uma solução para esse problema, consistindo em selecionar automaticamente os detectores de Canny (1986) e Steger (1996) para detectar, respectivamente, bordas de grau e linhas. Adicionalmente, são aplicadas técnicas para a eliminação de retas representantes do terreno e para a redução da fragmentação dos segmentos de lados de contornos e cumeeiras.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Detector de Canny

Canny (1986) definiu um conjunto de objetivos para um detector de bordas e descreveu uma metodologia de otimização para alcançá-los, sendo eles:

1)Taxa de Erro: o detector de bordas deverá responder somente para bordas verdadeiras, correspondendo a maximizar o SNR (*Signal-to-Noise Ratio*);

2)Localização: os pontos de borda devem estar bem localizados, ou seja, as distâncias entre os pontos extraídos pelo detector e as respectivas posições verdadeiras devem ser minimizadas;

3)Resposta Múltipla: o detector de bordas não deverá identificar múltiplos pixels de bordas onde somente existe uma borda.

A proposta de Canny é encontrar o filtro f que maximize o produto entre o SNR e a Localização, sujeito à limitação de respostas múltiplas. Para tanto, inicialmente, é realizada a maximização dos dois primeiros critérios (taxa de erro e localização) o que é igual à maximização do produto entre ambos (SNR e L), Canny (1986).

$$\left(\frac{\left| \int_{-w}^w G(-x)f(x) dx \right|}{n_0 \sqrt{\int_{-w}^w f^2(x) dx}} \right) \cdot \left(\frac{\left| \int_{-w}^w G'(-x)f'(x) dx \right|}{n_0 \sqrt{\int_{-w}^w f'^2(x) dx}} \right) \quad (1)$$

em que $f(x)$ é a resposta de impulso do filtro definido no intervalo $[-w; w]$, $G(x)$ é uma borda unidimensional e n_0 a quantificação do ruído da imagem. Assume-se que a borda está centrada em $x = 0$.

O filtro ótimo ainda deve se submeter ao terceiro critério, injeção de resposta múltipla.

$$x_{\max} = 2\pi \left(\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} f'^2(x) dx} \right)^{1/2} \quad (2)$$

a expressão matemática para a distância (x) entre máximos adjacentes na resposta do filtro $f(x)$ devido ao ruído.

O filtro ótimo encontrado por Canny pode ser eficientemente aproximado pela derivada primeira da função Gaussiana unidimensional, isto é,

$$G'(x) = \left(-\frac{x}{\sigma^2} \right) e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

Como a Gaussiana bidimensional é uma função separável, uma imagem pode ser convoluída unidimensionalmente com a derivada primeira da Gaussiana, primeiro numa direção (linha ou coluna) e depois na outra.

2.2 Detector de Steger

Para detectar linhas em uma imagem unidimensional $z(x)$ sem ruídos, basta determinar o ponto onde $z'(x)$ se anula. Para que as linhas mais salientes sejam selecionadas, é necessário utilizar o valor de magnitude da segunda derivada $z''(x)$ no ponto onde $z'(x) = 0$. Se as imagens contêm ruídos, o que ocorre na prática, esse método não é suficiente. Para contornar

este problema, a primeira e a segunda derivadas de $z(x)$ podem ser estimadas convoluindo a imagem com as derivadas do núcleo gaussiano, Steger (1996). O núcleo Gaussiano e suas derivadas de primeira e segunda ordem, com desvio-padrão σ , são dadas por,

$$g_{\sigma}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \tag{4}$$

$$g'_{\sigma}(x) = \frac{-x}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \tag{5}$$

$$g''_{\sigma}(x) = \frac{x^2 - \sigma^2}{\sqrt{2\pi}\sigma^5} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \tag{6}$$

A convolução com o núcleo Gaussiano das linhas conduz a uma descrição do espaço-escala do perfil da linha, como segue:

$$r_a(x; \sigma; w; a) = g_{\sigma} * f_a(x) = \varphi_{\sigma}(x+w) + (a-1)\varphi_{\sigma}(x-w) \tag{7}$$

$$r'_a(x; \sigma; w; a) = g'_{\sigma} * f_a(x) = g'_{\sigma}(x+w) + (a-1)g'_{\sigma}(x-w) \tag{8}$$

$$r''_a(x; \sigma; w; a) = g''_{\sigma} * f_a(x) = g''_{\sigma}(x+w) + (a-1)g''_{\sigma}(x-w) \tag{9}$$

em que, φ é a integral do núcleo Gaussiano, dada por:

$$\varphi_{\sigma}(x) = \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt \tag{10}$$

De uma forma geral, um determinado ponto da imagem é considerado como pertencente a uma linha saliente se, nesse ponto, $r'_a = 0$ e $r''_a > 0$.

Para preservar as linhas mais importantes, é necessário selecionar o desvio-padrão gaussiano tal que $\sigma > \frac{w}{\sqrt{3}}$. Este valor de σ é obtido através da solução de

$\frac{\partial}{\partial \sigma}(r''_a(0, \sigma, w, h)) = 0$. A posição da linha pode ser determinada por, Steger (2000),

$$x = -\frac{\sigma^2}{2w} \ln(1-a) \tag{11}$$

A equação 11 mostra claramente que a linha será extraída na posição correta, ou seja, para $x = 0$, somente se o contraste em ambos os lados da linha forem iguais, isto é, $a = 0$.

No caso 2D, a imagem da primeira derivada corresponde a uma imagem de gradiente. Neste caso, podem-se modelar linhas como uma curva $s(t)$ para o qual se tem na direção transversal um comportamento semelhante ao perfil unidimensional. Assim, dado um ponto p de $s(t)$, deve-se analisar a direção transversal à linha em p , correspondente ao vetor normal $\vec{n}(t)$. Conseqüentemente, podem-se extrair pontos de linhas em 2D utilizando a primeira derivada direcional na direção $\vec{n}(t)$. Dessa forma o problema se resume a determinar a direção de $\vec{n}(t)$ em cada ponto da linha. A direção de $\vec{n}(t)$ pode ser obtida a partir do autovetor correspondente ao autovalor de maior magnitude da matriz Hessiana da imagem suavizada, Steger (2000). A matriz Hessiana é dada por:

$$H(x, y) = \begin{pmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{pmatrix} \tag{12}$$

em que, r_{xx} é a derivada segunda em relação à direção x, r_{yy} é a derivada segunda em relação à direção y e r_{xy} é a derivada mista, todos tomados sobre a imagem suavizada.

3. Metodologia

Os contornos 3D de telhados de edifícios, a imagem aérea e os pontos de apoio são os dados de entrada da metodologia. O primeiro passo consiste em determinar por resseção espacial os parâmetros de orientação da imagem. O segundo passo consiste em transformar os vértices 3D dos contornos de telhados, extraídos de dados LASER, no sistema de coordenadas de imagem (LC) através de técnicas fotogramétricas e, em seguida, gerar janelas retangulares contendo as feições retas projetadas, de tal forma que: 1) cada feição reta projetada é coincidente com o eixo de simetria da janela que a contém; 2) as dimensões das janelas são calculadas em função dos comprimentos e erros de registro das respectivas feições retas projetadas; e 3) o erro de registro é estimado através da lei de propagação de erros aplicada às equações de transformação dos vértices 3D para o espaço-imagem.

No próximo passo, em cada janela previamente gerada, aplica-se sequencialmente o detector de bordas de Canny, um algoritmo de vetorização e outro de poligonização. E em seguida, repete-se o mesmo processo, só que dessa vez usando o detector de linhas de Steger. Em ambos os casos o objetivo é extrair feições retas.

A seguir é brevemente explicado o procedimento algorítmico em geral, mas com ênfase no procedimento específico aplicado a uma janela de feição reta projetada.

Após a aplicação do detector de Steger na primeira janela ($i = 1$), é feita uma busca por feições retas detectadas por ele (m - número de retas detectadas por Steger dentro da janela correspondente), se forem encontradas, é feita uma nova busca ($j = 1$), só que dessa vez por duas feições retas paralelas e bem próximas geradas por Canny que contenham a feição reta detectada por Steger. Se as feições retas de Canny forem encontradas, elas são descartadas e mantém-se a feição reta encontrada por Steger. Ao contrário, elimina-se a feição reta encontrada por Steger. Esse processo é repetido até que $j > m$ e, quando isso acontecer, mantêm-se as feições retas restantes de Canny. Verifica-se então se $i (i = 2) > n$ (número de janelas) e, se sentença for verdadeira, o processo é encerrado. Caso contrário, repete-se todo o procedimento anterior, até que $i > n$.

Se na primeira busca a feição reta gerada por Steger não for encontrada, retêm-se as retas geradas por Canny, devendo-se a seguir ($i = 2$) verificar se o processo continua ($i \leq n$) ou é encerrado ($i > n$).

Nessa parte do trabalho, de análise dos resultados, é necessário que se estabeleçam algumas tolerâncias com relação ao paralelismo e a distância entre as duas retas de Canny, e também com relação à discrepância entre as distâncias entre a reta de Steger e as duas retas de Canny. As tolerâncias adotadas foram 3°, 4 pixels e 1 pixel, respectivamente. Maiores detalhes podem ser vistos em Marcato (2009).

O próximo passo consiste em detectar e conectar as retas próximas e colineares, possibilitando a redução da fragmentação das retas remanescentes. As retas pertencentes ao terreno devem ser eliminadas primeiro, uma vez que este procedimento possibilita reduzir o espaço de fusão e as possíveis falhas.

Para a redução de fragmentação, o método a ser utilizado é a fusão de retas colineares baseada em regras perceptuais, como as de colinearidade e proximidade. Para tanto, é necessário que os valores de distâncias e ângulos entre as retas em questão sejam próximos de 0 (zero).

Uma vez que as retas atendam as condições impostas, essas são fundidas. Dessa forma, os lados de contornos e cumeeiras que possuam lacunas nas quais o processo de extração falhou, são reconstruídos. Novos segmentos de lados de contorno e cumeeiras são gerados, preenchendo as lacunas remanescentes.

4. Resultados e Discussões

A seguir serão apresentados alguns dos resultados obtidos, a partir da aplicação da metodologia, em alguns dos lados de contornos e cumeeiras de edifícios.

Como pode ser observado, na Figura 1, o local da imagem, em questão, é um lado de contorno do edifício. Nesse caso, o detector de Steger (Figura 1(c)) não apresentou resposta para esse lado de contorno, já o detector de Canny (Figura 1(d)) apresentou como resposta para esse lado do contorno uma reta. Dessa forma, o resultado mantido para esse local (Figura 1(e)) foi a resposta de Canny.

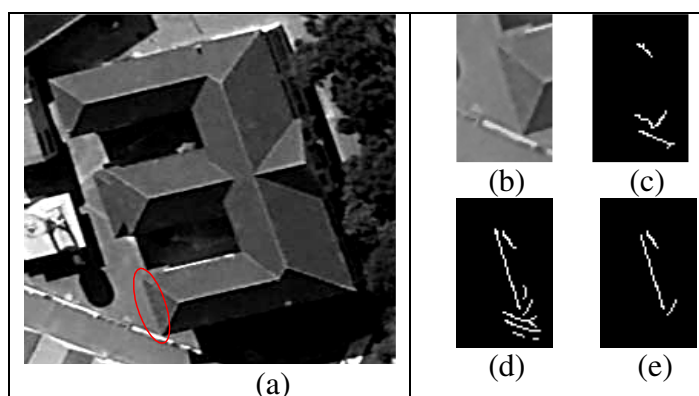


Figura 1 – Lado de contorno 1. (a) localização do lado de contorno no edifício; (b) recorte na imagem contendo o lado de contorno; (c) resultado da detecção de Steger; (d) resultado da detecção de Canny; (e) resultado mantido para o local.

Para o lado de contorno 2 (Figura 2(a,b)), o resultado mantido para esse local foi o do detector de Canny (Figura 2(e)). Nesse caso, o detector de Steger (Figura 2(c)) praticamente não apresentou resposta.

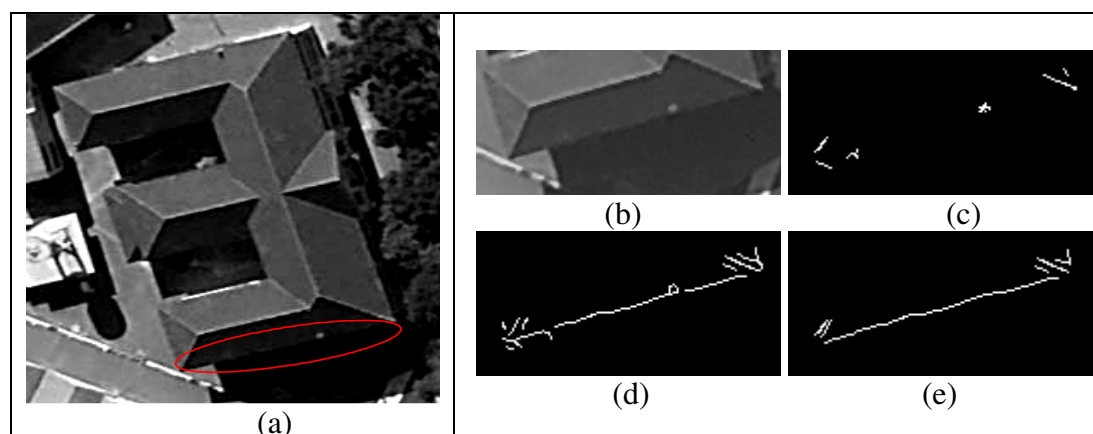


Figura 2 – Lado de contorno 2. (a) localização do lado de contorno no edifício; (b) recorte na imagem contendo o lado de contorno; (c) resultado da detecção de Steger; (d) resultado da detecção de Canny; (e) resultado mantido para o local.

O detector de Canny (Figura 3(d)) apresentou para a cumeeira 1 respostas duplas e o detector de Steger apresentou uma única resposta. Nesse caso é mantida a reta detectada pelo detector de Steger (Figura 3(e)).

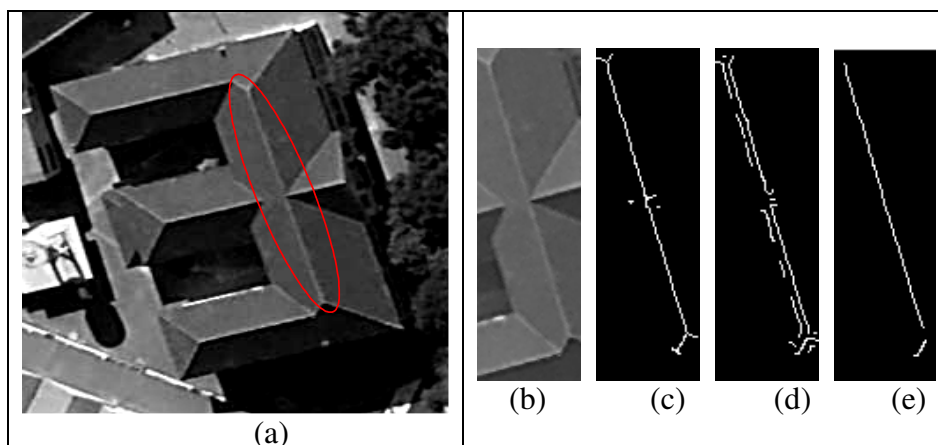


Figura 3 – Cumeeira 1. (a) localização da cumeeira no edifício; (b) recorte na imagem contendo a cumeeira; (c) resultado da detecção de Steger; (d) resultado da detecção de Canny; (e) resultado mantido para o local.

O detector de Canny (Figura 4(c)) apresentou para o lado de contorno 3 respostas duplas e o detector de Steger apresentou uma única resposta. Nesse caso é mantida a reta detectada pelo detector de Steger (Figura 4(d)).

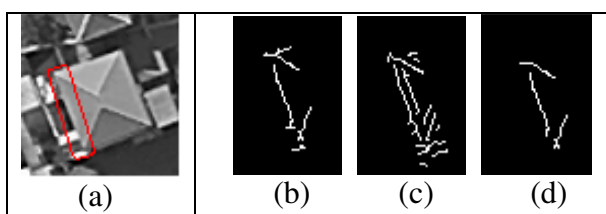


Figura 4 – Lado de contorno 3. (a) localização do lado de contorno no edifício; (b) resultado da detecção de Steger; (c) resultado da detecção de Canny; (d) resultado mantido para o local.

Referente à cumeeira 2 (Figura 5), os resultados apresentados pelos detectores de Canny (Figura 5(c)) e Steger (Figura 5(b)) para essa são característicos de um perfil de linha, ou seja, o detector de Canny apresentou várias respostas para o local e o detector de Steger uma única resposta para a cumeeira. Conseqüentemente, o resultado de Steger foi retido (Figura 5(d)).

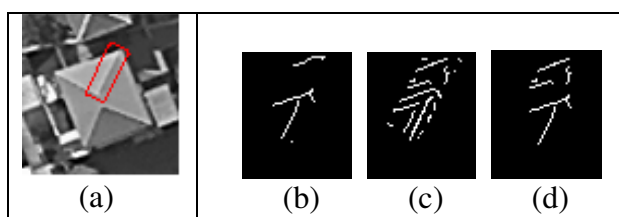


Figura 5 – Cumeeira 2. (a) localização da cumeeira no edifício; (b) resultado da detecção de Steger; (d) resultado da detecção de Canny; (e) resultado mantido para o local.

Para o próximo lado de contorno (Figura 6), o detector de Canny (Figura 6(c)) detectou duas retas paralelas e bem próximas, e a detecção de Steger (Figura 6(b)) detectou a reta que coincide, aproximadamente, com o eixo de simetria das duas retas de Canny. Nesse caso, de acordo com as regras assumidas, a reta conservada é a de Steger.

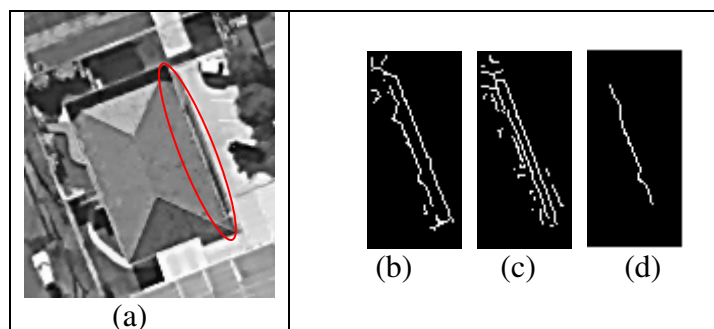


Figura 6 – Lado de contorno 4. (a) localização do lado de contorno no edifício; (b) resultado da detecção de Steger; (c) resultado da detecção de Canny; (d) resultado mantido para o local.

Nessa última cumeeira (Figura 7) verifica-se que o detector de Steger apresentou resposta única para a cumeeira, no entanto, o detector de Canny também apresentou uma única resposta, permitindo então conservar o resultado de Canny.

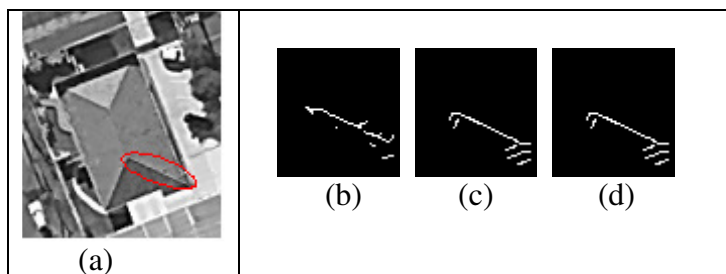


Figura 7 – Cumeeira 3. (a) localização da cumeeira no edifício; (b) resultado da detecção de Steger; (c) resultado da detecção de Canny; (d) resultado mantido para o local.

5. Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo de um problema comum na extração de cumeeiras e contornos de telhados em imagens aéreas de alta resolução, tratando-se da coexistência de padrões de intensidade dos tipos borda degrau e linha. O uso só de um detector de bordas, como o de Canny, gera respostas duplas para as linhas. Já um detector de linhas, como o de Steger, que é baseado em perfis na forma de uma barra, normalmente não responde às bordas degrau. Portanto, é necessário combinar detectores de linha e borda para se obter resultados de melhor qualidade e facilitar as etapas seguintes de análise de imagem.

Pode ser visto através dos resultados experimentais a viabilidade do método. Essa técnica foi empregada em vários edifícios, que se localizavam em diferentes regiões da imagem e, essa correspondeu às expectativas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo financiamento dessa pesquisa através de uma bolsa de iniciação científica (Processo nº 2007/07757-9).

Referências Bibliográficas

Canny, J. A Computational Approach to Edge Detection. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 8, n. 6, p. 679-698, 1986.

Haala, N.; Brenner, C. Extraction of buildings and trees in urban environments. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.54, p. 130-137, 1999.

Machado, A. M. L.; Mitishita, E. A. Detecção automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmera digital de pequeno formato e dados LIDAR. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 12, n. 3, 2006, p. 215-233.

Marcato, V. J. **Seleção automática dos métodos de Canny e Steger para a detecção acurada e confiável de linhas e bordas associadas com contornos e cumeeiras de edifícios**. Presidente Prudente, 2009. Relatório de iniciação científica (FAPESP), Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista.

Mayer, H. Automatic Object Extraction from Aerial Imagery - A Survey Focusing on Buildings. **Computer Vision and Image Understanding**, v. 74, n. 2, p. 139-149, 1999.

Sohn, G.; Dowman, I. J. Building extraction using Lidar DEMs and Ikonos images. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 34, 2003.

Steger, C. Extracting Lines Using Differential Geometry and Gaussian Smoothing; In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 31, Part B3, 1996, p. 821-826.

Steger, C. Subpixel – Precise Extraction of Lines and Edges. **ISPRS: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 33, Amsterdam, 2000.